

Hohenstaufenstadt Göppingen

Abschlussbericht des Forschungsprojektes
Az: 33028/01-25 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Ansätze für Sanierungsmaßnahmen aus der Analyse bestehender Schulen mit Hilfe von Messungen, am Beispiel des Hohenstaufen-Gymnasiums in Göppingen

Göppingen, März 2018

Hohenstaufenstadt Göppingen

Abschlussbericht des Forschungsprojektes
Az: 33028/01-25 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Ansätze für Sanierungsmaßnahmen aus der Analyse bestehender Schulen mit Hilfe von Messungen, am Beispiel des Hohenstaufen-Gymnasiums in Göppingen

Thomas Auer, Philipp Vohlidka, Christian Frenzel, Christine v. Raven, Stefan Behnisch

Göppingen, März 2018

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33028/01-25	Referat	14	Fördersumme	104.220 €
Antragstitel	"Ansätze für Sanierungsmaßnahmen aus der Analyse bestehender Schulen mit Hilfe von Messungen, am Beispiel des Hohenstaufen Gymnasiums in Göppingen "				
Stichworte	Schulen, Schulbau, Sanierung, Denkmalschutz				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
26 Monate	05.11.2015	05.01.2018	9		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Hohenstaufenstadt Göppingen			Tel	07161/650757
	Stadtverwaltung Göppingen			Fax	07161/65098757
	FB 6 - Immobilienwirtschaft			Projektleitung	
	Nördliche Ringstr. 35			Joachim Mürdter	
	73033 Göppingen			Bearbeiter	
				Uwe Bauer	
Kooperationspartner					

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Für das Hohenstaufen-Gymnasiums in Göppingen steht eine grundlegende Sanierung an. Der schlechte Zustand des Gebäudes, hohe Energiekosten und erhebliche Behaglichkeitsdefizite müssen dringend angegangen werden. Das Gebäude wurde 1959 fertiggestellt und somit in den Jahren gebaut, als landesweit sehr viele neue Schulgebäude entstanden. Es gilt als eines der ersten Schulbauten, das zu einem großen Teil mit vorfabrizierten Elementen gefertigt wurde und markiert damit den Übergang von der handwerklichen Bauweise zur Vollmontage industriell gefertigter Baumaterialien. Anfang 2015 wurde es in die Liste der Kulturdenkmäler aufgenommen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Auf Grund des mittlerweile hohen Alters des Gebäudes hat die Stadt Göppingen vor einiger Zeit einen Sanierungsbedarf erkannt. Dennoch sind mögliche Sanierungsmaßnahmen auf Grund des Denkmalschutzes nun schwieriger bzw. sensibler zu realisieren, so dass dies eine zusätzlich zu lösende Aufgabe darstellt. Für die Entwicklung dieser Sanierungsmaßnahmen soll dabei der Blick geweitet werden auf andere Schulen, in denen bereits Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Dabei sollen mindestens fünf repräsentative, sanierte Beispielschulen umfassend analysiert werden, um zu einer Beurteilung der dort umgesetzten Sanierungsmaßnahmen zu gelangen und Rückschlüsse auf zu erarbeitende Sanierungslösungen für das Hohenstaufen-Gymnasium ziehen zu können.

Neben der Erfassung und Analyse der Innenraumqualität durch Messungen (Temperatur, relative Feuchtigkeit, CO₂-Konzentration, Raumakustik) werden die gebauten Schulen auf ihre architektonische, bauphysikalische und gebäudetechnische Beschaffenheit hin umfassend untersucht. Die Analyse wird ergänzt mit den jeweiligen Energieverbräuchen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollen allgemein gültige Handlungsempfehlungen entwickelt werden, worauf bei zukünftigen Schulsanierungen zu achten ist und welche Umsetzungsmaßnahmen nicht zu empfehlen sind. Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen, die durch die Prämisse „Einfach Bauen“ zu einer Steigerung der Energieeffizienz und Aufenthaltsqualität bei gleichzeitiger Reduzierung der laufenden Kosten führen, gewährleisten aufgrund der hohen Repräsentativität der zu untersuchenden Schulen grundsätzlich eine Übertragbarkeit der entwickelten Handlungsempfehlungen für andere Bestandsschulen.

Im Folgenden die durchgeführten Arbeitsschritte:

AP1: Grundlagenerfassung, Analyse Gebäude- und Haustechnikkonzept Hohenstaufen-Gymnasium (TU München, Behnisch Architekten, Transsolar)

AP2: Innenraummessung mit Datenauswertung, Simulation Nutzerbefragungen Hohenstaufen-Gymnasium (TU München, Behnisch Architekten, Transsolar)

AP3: Innenraummessungen und Nutzerbefragungen an bereits sanierten Schulen (TU München)

AP4: Analyse Gebäude- und Haustechnikkonzept der sanierten Schulen (TU München)

AP5: Auswertung, Gegenüberstellung und Beurteilung der Messergebnisse (TU München)

AP6: Entwicklung von Handlungsempfehlungen für zukünftige Schulsanierungen (TU München)

AP7: Anwendung der erarbeiteten Handlungsempfehlungen auf die Sanierung des Hohenstaufen-Gymnasiums (Behnisch Architekten)

AP8: Gebäudesimulation und Entwicklung eines Energie- und Klimakonzepts für das Hohenstaufen-Gymnasium (Transsolar)

AP9: Schlussbericht (TU München)

Ergebnisse und Diskussion

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen der sechs bereits sanierten Schulen konnten in einem kontinuierlichen iterativen Planungsprozess zwischen dem Architektur- und dem Ingenieurbüro auf die Sanierung des Hohenstaufen-Gymnasiums weitestgehend angewandt werden.

Diese Studie zeigt, dass in Anlehnung an die ursprüngliche Fassadenlösung und den Ansatz der Querlüftung mit einzelnen zusätzlichen Maßnahmen in den Aufenthaltsbereichen optimierte Komfortbedingungen realisiert werden können. Das Konzept sieht vor auf der Südseite den Überhang wieder zu aktivieren und in dem Oberlichtbereich die transluzente Wirkung im Verbund mit Bedruckung zu optimieren. Das ursprüngliche Lüftungssystem wird ebenfalls reaktiviert und durch Einbau eines Lüfters unterstützt zur Frischlüftung und Ablüftung über den Tag und in der Nacht. Im Verbund mit der partiellen thermischen Nutzung der massiven Betondecken als exponierte thermische Speichermasse wird der sommerliche Wärmeschutz optimiert.

In der Fassade wird der Brüstungsbereich mit einem gedämmten opaken Panel und die Verglasung mit modernem 2-fach Glas ausgestattet. Die Fassadenlösung wurde ebenfalls hinsichtlich der Tageslichtverfügbarkeit und der Blendungsrisiken betrachtet. Durch die Raumgeometrie, besonders die Relation der Raumhöhe zur Raumtiefe, zeigen die Ergebnisse allgemein sehr gute Tageslichtbedingungen. Hinsichtlich der Blendung stellt eine transluzente Fassadenfläche wie das Oberlicht ein besonderes Risiko dar, jedoch wurde gezeigt, dass mit einer Bedruckung das Blendungsrisiko reduziert werden kann.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wurde auf dem DBU-Forum "Schulbauten - Räume der Zukunft" der Öffentlichkeit vorgestellt. In der Mastervorlesung "Klimagerechtes Bauen" des Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen", Prof. Auer werden die Forschungsergebnisse behandelt.

Fazit

Die Herangehensweise des vorliegenden Forschungsprojekts kann als zielführend betrachtet werden. Durch die umfangreiche Untersuchung der sechs beispielhaften sanierten Schulen konnten wichtige Rückschlüsse für die Sanierungsplanung des Gymnasiums gezogen werden. Die wichtigsten Parameter für eine energieeffiziente Schule sind (in der Reihenfolge):

- 1) Die Minimierung des Strombedarfs für Kunstlicht durch die Wahl eines geeigneten Leuchtmittels sowie einer optimierten Tageslichtnutzung.
- 2) Der Einsatz einer CO₂-armen Wärmeerzeugung.
- 3) Die Minimierung des Hilfsenergiebedarfs beim Einsatz einer maschinellen Lüftung. Dies lässt sich zum Beispiel durch eine Minimierung der Druckverluste durch großzügig dimensionierte Geräte und Kanalnetze zur Luftverteilung oder durch die Wahl einer dezentralen Lüftung erreichen.
- 4) Ein optimaler baulicher sommerlicher Wärmeschutz, um Kühlbedarf zu vermeiden.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	8
2.	Einleitung	9
2.1.	Beschreibung der Ausgangssituation	9
2.2.	Arbeitsplan und Darstellung des Lösungswegs	11
3.	Analyse des Hohenstaufen-Gymnasiums	12
3.1.	Städtebau	12
3.2.	Kubatur und äußere Erscheinung	12
3.3.	Freiflächen	13
3.4.	Typologie, Anordnung, Nutzung	13
3.5.	Pädagogisches Konzept	13
3.6.	Ausstattung und Mobiliar	14
3.7.	Raumwirkung und Belichtung	14
3.8.	Material und Konstruktion	15
3.9.	Technikkonzept/ Messdatenauswertung	16
3.10.	Zustand	17
4.	Analysen sanierter Schulen	18
4.1.	Methodik	19
4.1.1.	Methodik der Messungen	19
4.1.2.	Methodik der Simulationen	20
4.1.3.	Methodik der Umfrage	21
4.2.	Analysen und Ergebnisse	22
4.2.1.	Grundschule in der Haimhauserstraße, München	22
4.2.2.	Eerste Openluchtschool, Amsterdam	25
4.2.3.	Schulanlage Wandermatte, Köniz-Wabern bei Bern	28
4.2.4.	Gymnasium Sonthofen	31
4.2.5.	Mittelschule Buchloe	34
4.2.6.	Gymnasium der Stadt Baesweiler	37

4.3.	Rückschlüsse auf die Aufenthaltsqualität	40
4.3.1.	Luftqualität	40
4.3.2.	Luftfeuchte	40
4.3.3.	Thermischer Komfort	41
4.3.4.	Akustischer Komfort	42
4.3.5.	Visueller Komfort	42
4.4.	Rückschlüsse auf die Technik und den Energiebedarf	43
4.4.1.	Regelung und Instandhaltung der Technik	43
4.4.2.	Von der Energieerzeugung zum Energiebedarf	44
5.	Integrale Planung des Hohenstaufen- Gymnasiums	46
5.1.	Grundlagen	46
5.1.1.	Wetterdaten des Standortes	46
5.2.	Beschreibung des Komfort- und Energiekonzeptes	47
5.3.	Simulation - Klassenraum	50
5.3.1.	Variantenbewertung	50
5.3.2.	Thermischer Komfort	51
5.3.3.	Strahlungskälte – Kalte Oberflächen	52
5.3.4.	Tageslichtqualität	53
5.3.5.	Belendungspotenzial	53
5.3.6.	Luftqualität	54
5.3.7.	Akustik	54
5.4.	Weitere betrachtete Räume	54
5.4.1.	Klassenzimmer an der Relief-Fassade (Raum 201)	54
5.4.2.	Lehrerzimmer (Raum 105)	54
5.4.3.	Biologie – Süd (Raum 103)	55
5.4.4.	Zeichnen – Nordbau (Raum 018)	55
5.4.5.	Verbindungsflur (118d)	55
5.5.	Energie	57
5.5.1.	Energiebedarf – Optimierung der Lüftungseffizienz	57
5.5.2.	Energieerzeugungsfläche - Photovoltaik	57
5.5.3.	Energiebilanz - Potential	57
6.	Fazit	59
7.	Abbildungsverzeichnis	60
8.	Literaturverzeichnis	62

1. Zusammenfassung

Das Hohenstaufen-Gymnasium in Göppingen soll saniert werden. Auf Grund des Denkmalschutzes ist besonders das äußere und innere Erscheinungsbild von Relevanz, um die ursprüngliche Architektur und Funktion zu bewahren.

Um dies zu erreichen, wurde zur Grundlagenermittlung in einem ersten Schritt eine intensive Analyse des bestehenden Gebäudes vorgenommen. Anschließend wurde mit gleicher Methodik eine ganzheitliche Analyse von sechs bestehenden Schulen durchgeführt, die bereits saniert wurden. Die Untersuchungen an diesen Beispielschulen, von denen drei DBU-gefördert sind, sollten zu einer Beurteilung der dort umgesetzten Lösungsansätze führen und Rückschlüsse auf die Sanierung des Hohenstaufen-Gymnasiums zulassen. Die bestehenden Schulen wurden bezüglich ihrer Typologie, Materialität und verbrauchten Haustechnik umfassend analysiert.

Um die Qualitäten zur Aufenthaltsqualität bestimmen zu können wurden in den Schulen in der Heiz- als auch der Kühlperiode Innenraumparameter gemessen. Die objektiven Messdaten wurden ergänzt durch Befragungen, um auch Aussagen die subjektive Wahrnehmung der Gebäudenutzer zu erhalten. Eine dynamische Gebäudesimulation lieferte abschließend vergleichbare Ergebnisse bezüglich des jeweiligen Energiebedarfs sowie der Nutzung von Tageslicht.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind in einem kontinuierlichen iterativen Planungsprozess zwischen dem Architektur- und dem Ingenieurbüro auf die Sanierung des Hohenstaufen-Gymnasiums weitestgehend angewandt worden.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist im Hohenstaufen-Gymnasium eine natürliche Fensterlüftung vorgesehen, der Sonnenschutz auf der Südseite wird über einen außenliegenden beweglichen Lamellenbehang realisiert. Ursprünglich gab es für die Belüftung den Ansatz der natürlichen Quer-

lüftung über Schiebeelemente in der Fassade. Die Ablüftung war über einen Kanal in die Abhangdecke des angrenzenden Korridors integriert. Die Heizkörper im Raum wurden bei sehr hohen Vorlauftemperaturen betrieben. Im Zuge der Umstellung auf einen Anschluss an das Wärmenetz des Stadtteils ist die Systemtemperatur gesenkt worden und die Heizkörper bieten zeitweise nicht mehr ausreichend Heizleistung.

Diese Untersuchungsergebnisse zeigen, dass in Anlehnung an die ursprüngliche Fassadenlösung mit dem Ansatz der Querlüftung und einzelnen zusätzlichen Maßnahmen in den Aufenthaltsbereichen optimierte Komfortbedingungen realisiert werden können. Das Konzept sieht vor, auf der Südseite den Überhang wieder zu aktivieren und in dem Oberlichtbereich die transluzente Wirkung im Verbund mit Bedruckung zu optimieren. Das ursprüngliche Lüftungssystem wird ebenfalls reaktiviert und durch Einbau eines Lüfters unterstützt: Zur Frischlüftung und Ablüftung über den Tag und in der Nacht. Im Verbund mit der partiellen thermischen Nutzung der massiven Betondecken als exponierte thermische Speichermasse wird der sommerliche Wärmeschutz optimiert.

In der Fassade wird der Brüstungsbereich mit einem gedämmten opaken Panel, die Verglasung mit moderner 2-fach Verglasung ausgestattet. Der Bedarf einer 3-fach Verglasung für die Hauptnutzungsbereiche wird auf Grund der relativ hohen internen Lasten im Schulbetrieb nicht als zwingend erforderlich gesehen, was auch dem Erscheinungsbild der Fassade zu Gute kommt.

Die Fassadenlösung wurde auch hinsichtlich der Tageslichtverfügbarkeit und der Blendungsrisiken betrachtet. Durch die Raumgeometrie, besonders die Relation der Raumhöhe zur Raumtiefe, zeigen die Ergebnisse allgemein sehr gute Tageslichtbedingungen. Hinsichtlich der Blendung stellt eine transluzente Fassadenfläche wie das Oberlicht ein besonderes Risiko dar, jedoch wurde gezeigt, dass mit einer Bedruckung das Blendungsrisiko reduziert werden kann.

2. Einleitung

2.1. Beschreibung der Ausgangssituation

Ein Großteil der bestehenden Schulgebäude in Deutschland ist von veralteter Haustechnik, Baumängeln und einer schlechten Gebäudehülle betroffen. Die daraus resultierenden hohen Energieverbräuche sind für Kommunen kostenintensiv und werden zugleich den aktuellen Zielen des sparsamen Umgangs mit den Ressourcen nicht mehr gerecht. Aus diesen Gründen sind deswegen für viele Schulen derzeit grundlegende Sanierungslösungen erforderlich.

Eine grundlegende Sanierung steht auch für das Hohenstaufen-Gymnasium in Göppingen an. Das von Günter Behnisch und Bruno Lambart geplante Gebäude wurde 1959 fertiggestellt und somit in den Jahren gebaut, als landesweit sehr viele neue Schulgebäude entstanden. Heute wird die Schule als offene Ganztagschule mit 30 Klassen und über 700 Schülern geführt. Das Gebäude gilt als eines der ersten Schulbauten, welches zu einem großen Teil mit vorfabrizierten Elementen gefertigt wurde und markiert damit den Übergang von der handwerklichen Bauweise zur Vollmontage industriell gefertigter Baumaterialien. Das Gebäude wurde Anfang 2015 vom Landesdenkmalamt in die Liste der Kulturdenkmäler aufgenommen.

Auf Grund des mittlerweile hohen Alters des Gebäudes hat die Stadt Göppingen vor einiger Zeit einen Sanierungsbedarf erkannt. Dennoch sind mögliche Sanierungsmaßnahmen auf Grund des Denkmalschutzes nun schwieriger bzw. sensibler zu realisieren, so dass dies eine zusätzlich zu lösende Aufgabe darstellt. Die teilweise ungedämmte Hülle, eine zu damaliger Zeit übliche Bauausführung, verursacht hohe Transmissionswärmeverluste. Laut dem vorliegenden Energieausweis verbraucht das Gebäude, das an das bestehende Fernwärmenetz angeschlossen ist, 197,2 kWh/m²a Heizenergie und 15,3 kWh/m²a Strom, was sich in entsprechend hohen laufenden Kosten für die Stadt widerspiegelt. Dennoch hat die geplante Sanierung neben der Reduzierung des hohen Energieverbrauchs auch eine Erhöhung der Aufenthaltsbedingungen zum Ziel. Konstruktiv bedingt die Fassade durch Strahlungsasymmetrie und Kaltluftabfall bei niedrigen Außenlufttemperaturen auch suboptimale Behaglichkeitszustände für die Schülerinnen und Schüler, die in Fassadennähe sitzen. Doch auch der Sommerfall ist problematisch: durch einen unzureichenden sommerlichen Wärmeschutz kommt es in den hauptsächlich südorientierten Klassenzimmern oft zu einer Überhitzung der Räume, was die Lern- und Aufmerksamkeitsbereitschaft aller Anwesenden deutlich erschwert.



Abb. 1: Blick vom Freiluftatrium

Die geplante Sanierung soll deshalb sowohl den aktuell sehr hohen Energieverbrauch reduzieren, als auch die Aufenthaltsqualität erhöhen. Diese raumklimatischen Verbesserungen können durch die heutigen technischen Möglichkeiten problemlos erfüllt werden. Dennoch stellt sich die Frage, ob der Königsweg wirklich das hochaufgerüstete Technikkonzept ist, oder ob nicht auch eine intelligente Sanierung mit einer einfachen Technik die gewünschten Behaglichkeitsziele erbringt, ganz im Sinne von „Einfach Bauen“. Ein reduziertes Technikkonzept welches dabei gleichermaßen die Investitionen und die laufenden Kosten gering hält, ist vor allem für die Träger von Schulen ein sehr wichtiger Punkt. Ziel des Forschungsprojekts ist es diesen Entscheidungsträgern bei zukünftigen Schulsanierungen sinnvolle Ansätze für Sanierungsmaßnahmen zur Verfügung zu stellen.

Für die Entwicklung dieser Sanierungsmaßnahmen wurde dabei der Blick auf sechs andere Schulen geweitet, in denen bereits Sanierungsmaßnahmen durchgeführt

wurden. Darunter ist mit der Openluftschool auch eine Schule vertreten, die ebenfalls unter Denkmalschutz steht. Diese repräsentativen Beispielschulen werden umfassend analysiert, um zu einer Beurteilung der dort umgesetzten Sanierungsmaßnahmen zu gelangen und Rückschlüsse auf zu erarbeitende Sanierungslösungen für das Hohenstaufen-Gymnasium ziehen zu können.

Darüber hinaus sollen allgemein gültige Handlungsempfehlungen entwickelt werden, worauf bei zukünftigen Schulsanierungen zu achten ist und welche Umsetzungsmaßnahmen nicht zu empfehlen sind. Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen, die durch die Prämisse „Einfach Bauen“ zu einer Steigerung der Energieeffizienz und Aufenthaltsqualität bei gleichzeitiger Reduzierung der laufenden Kosten führen, gewährleisten aufgrund der hohen Repräsentativität der zu untersuchenden Schulen grundsätzlich eine Übertragbarkeit der entwickelten Handlungsempfehlungen für andere Bestandsschulen.



Abb. 2: Blick auf den 4-geschossigen Riegel mit seitlichem Fresko

2.2. Arbeitsplan und Darstellung des Lösungswegs

Um den Anforderungen an Energieeffizienz, verwendeten Materialien und Aufenthaltsqualität für die Sanierung des Hohenstaufen-Gymnasiums gerecht zu werden, führte die TU München eine intensive, ganzheitliche Analyse der Schule durch. Anschließend erfolgte die Analyse von sechs weiteren Schulen, von denen fünf in den letzten Jahren saniert wurden, darunter die unter Denkmalspflege stehende Openluchtschool in Amsterdam. Auch die in die Untersuchung mit aufgenommene Grundschule an der Haimhauserstraße in München steht bereits unter Denkmalschutz. Bei ihr interessierte uns, welche Vorteile ein so beständiges und solides Gebäude aus der Jahrhundertwende - mit hohen Räumen und 80 cm starken Mauerwerkswänden - bringt. Die Grundschule befand sich während unserer Analysen gerade in der Planung für eine anstehende Sanierung.

Die Untersuchungen an diesen Beispielschulen, von denen drei DBU-gefördert sind, sollten zu einer Beurteilung der dort umgesetzten Lösungsansätze führen und Rückschlüsse auf die Sanierung des Hohenstaufen-Gymnasiums zulassen.

Um Aussagen zur Aufenthaltsqualität der zu analysierenden Schulen zu bekommen wurden in einem ersten Schritt die Innenraumparameter mit Hilfe von Indoor Climate Meter (IC-Meter) gemessen werden. Die Daten wurden in zwei ähnlichen Klassenräumen erhoben, um etwaige Unterschiede des Nutzerverhaltens zu berücksichtigen. Der Messzeitraum umfasste sowohl Monate der Winter- als auch der Sommerperiode.

Folgende Daten werden von den Messgeräten aufgenommen: Temperatur, relative Feuchtigkeit, CO₂-Konzentration und Schall. Ergänzend wurden Befragungen der Schüler und Lehrer dieser Klassenzimmer vorgenommen, um neben den objektiven Messdaten auch die subjektive Wahrnehmung der Gebäudenutzer zu erhalten.

Außerdem wurden die Beispielschulen auf ihre bauphysikalische und gebäudetechnische Beschaffenheit hin umfassend untersucht. Eine dynamische Gebäudesimulation liefert abschließend vergleichbare Ergebnisse bezüglich des jeweiligen Energiebedarfs sowie der Nutzung von Tageslicht.

Auf Basis der Analyseverfahren wird anschließend aufgezeigt, durch welche Konzeptlösungen bezüglich Energieeffizienz und Behaglichkeit gut funktionieren und wo Mängel auftreten. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse der untersuchten Beispielschulen lassen sich Rückschlüsse ziehen und Handlungsempfehlungen ableiten, worauf bei zukünftigen Schulsanierungen zu achten ist.

Diese definierten Handlungsempfehlungen wurden an der konkreten Sanierungsplanung des Hohenstaufen-Gymnasiums in Göppingen angewandt, das beauftragte Architekturbüro ist Behnisch Architekten. Das Büro berücksichtigte in einem iterativen Planungsprozess die erarbeiteten Lösungsmaßnahmen. Begleitend wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Architekturbüro von dem Klimaengineeringbüro Transsolar ein Energie- und Klimakonzept mit dem Ziel der Minimierung des Primärenergiebedarfs sowie des Invests und der Betriebskosten bei gleichzeitiger Optimierung des Nutzerkomforts erarbeitet. Dabei wurden fortlaufend thermische Simulationen durchgeführt, um für repräsentative Zonen das thermische Verhalten und den erforderliche Wärme- und Kältebedarf zu bestimmen sowie eine optimale Tageslichtnutzung aller Bereiche zu entwickeln.

Nachfolgend die Auflistung der bearbeiteten Arbeitspakete:

AP1: Grundlagenerfassung, Analyse Gebäude- und Haustechnikkonzept Hohenstaufen-Gymnasium (TU München, Behnisch Architekten, Transsolar)

AP2: Innenraummessung mit Datenauswertung, Simulation und Nutzerbefragungen Hohenstaufen-Gymnasium (TU München, Behnisch Architekten, Transsolar)

AP3: Innenraummessungen und Nutzerbefragungen an bestehenden Schulneubauten (TU München)

AP4: Analyse Gebäude- und Haustechnikkonzept der bestehenden Schulneubauten (TU München)

AP5: Auswertung, Gegenüberstellung und Beurteilung der Messergebnisse (TU München)

AP6: Entwicklung von Handlungsempfehlungen für zukünftige Schulsanierungen (TU München)

AP7: Anwendung der erarbeiteten Handlungsempfehlungen auf die Sanierung des Hohenstaufen-Gymnasiums (Behnisch Architekten)

AP8: Gebäudesimulation und Entwicklung eines Energie- und Klimakonzepts für das Hohenstaufen-Gymnasium (Transsolar)

AP9: Schlussbericht (TU München)

3. Analyse des Hohenstaufen-Gymnasiums

3.1. Städtebau

Einst ein Werk der Avantgarde hat die Schule heute an Strahlkraft verloren. Sie ist mit den Jahren etwas aus dem Stadtbild verschwunden. Von der Hohenstaufenstraße aus ist das Gymnasium fast nicht mehr wahrnehmbar. Lediglich das für einen Bau der 1950er-Jahre typische Betonrelief der Giebelfassade des Hauptbaus schimmert durch das Grün und zeigt an, dass sich hier ein öffentliches Gebäude verbirgt. Die Ikone der Nachkriegsmoderne, auf Schwarzweißfotos aus der Entstehungszeit steht sie noch auf einer grünen Wiese, befindet sich nun fast in einem Wald. Der fließende Raum ist ausgefüllt von grünem Volumen, ein Schicksal, das die Schule mit vielen Bauten dieser Zeit teilt – Fluch und Segen zugleich. Auf den zweiten Blick erkennt man einen Weg zum Eingang an der Nordseite des Gebäudes. Davor, daneben und teilweise auch fast darin wachsen Ahorne, Eiben, Rhododendren, Linden, sogar Mammutbäume und viel Efeu. In direkter Nachbarschaft liegen Wohngebäude: Mehrfamilienhäuser, kleine Zeilen, genossenschaftliches Wohnen in Rauputz mit kleinen Fenstern und Fensterläden und akkurat geschnittenen Ligusterhecken davor. Eine erfrischend normale Nachbarschaft, noch ohne Parkplatzorgie und „Kiss and Go“-Anlieferzone.

3.2. Kubatur und äußere Erscheinung

Die Schule besteht aus drei parallel stehenden, ost-westgerichteten, höhengestaffelten Riegeln, welche mit ihren Schmalseiten zur Straße zeigen. Die Höhenstufung, Bedingt durch die innere Organisation der Funktionen, lässt eine Bauplastik entstehen, die sphinxgleich an der Hohenstaufenstraße ruht. Der hohe mittlere Riegel beherbergt auf einer Länge von 100 m die Klassenräume, die niedrigeren und kürzeren seitlichen Riegel beherbergen

die Fachräume. Gläserne Erschließungsbrücken verbinden die einzelnen Gebäudeteile und umschließen zusammen mit den seitlichen Riegeln das außenliegende Atrium. Die Brücken wirken aufgrund der dünnen, wenig spiegelnden Gläser tatsächlich außerordentlich transparent. Ein Querschnitt durch das Gebäude offenbart ein durchlässiges Erdgeschoss – eine differenzierte Raumsequenz, welche sich in drei in ihrem Charakter unterschiedliche Hofteile gliedert. Der nördliche Riegel und das Hauptgebäude flankieren einen schmalen, langen und introvertierten Raum, unter dem Hauptgebäude selbst erstreckt sich eine überdachte, von den tragenden Stützen gesäumte Pausenhalle, die im Süden in das rechteckige und weite Freiluftatrium übergeht.

Diese Räume vermitteln sowohl Ruhe und Geborgenheit als auch eine angemessene Großzügigkeit. Zwei kleine Erweiterungsbauten sind an den ehrwürdigen Bestand geheftet. Losgelöst vom Hauptvolumen befindet sich im Südosten der Turnhallenbau, der den räumlichen Abschluss des Schulhofs bildet.

Die strenge Grundstruktur des Konstruktionsrasters zeichnet sich in den Fassaden des Gebäudes ab, Sichtbetonstützen und -deckenstirnen gliedern die Ansichten. Es handelt sich nicht um gezähmten Vorzeigebeton, sondern um den ursprünglichen Beton, der so ist, wie er aus der rauen Schalung kommt. Eine feine Stahlkonstruktion, ausgefacht mit hellgrauen Paneelen im Sturzbereich und mit senfgelben Paneelen im Brüstungsbereich, schließt die Öffnungen im Betonskelett. Die ehemals charakteristischen Augenbrauen der Fenster, die horizontalen metallenen Bris-Soleil-Elemente der Fassade, wurden zugunsten eines konventionellen Sonnenschutzes aufgegeben, wenn auch unter Protest des Autors Behnisch.

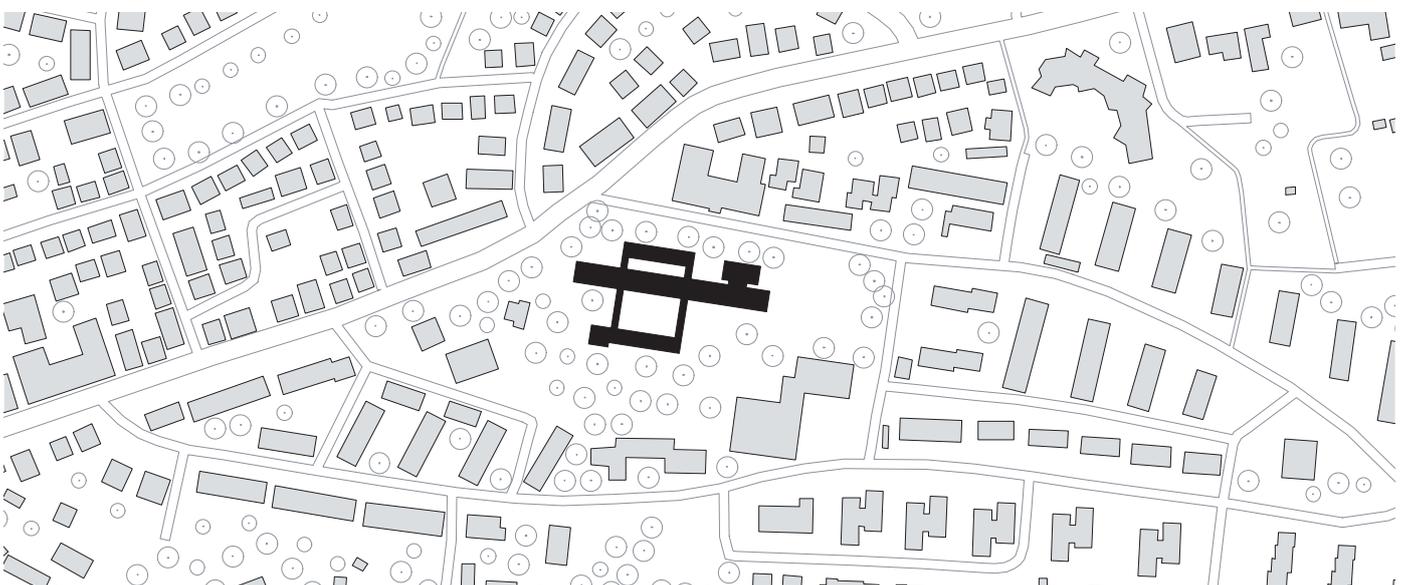


Abb. 3: Lageplan

3.3. Freiflächen

Ein ausgefranst verlegter Plattenweg führt hin zum Haupteingang, gesäumt von englischem Rasen und Rhododendronbüschen, eher repräsentatives Abstandsgrün als nutzbare Freifläche. Erst bei einem Rundgang um das Gebäude werden die profanen Dinge wie Stellplätze, Fahrräder, Mülltonnen etc. am seitlichen Zugang an der Rembrandtstraße entdeckt, unweit vom Haupteingang, aber doch so versteckt, dass sie nicht Bestandteil der Inszenierung sind. Vor dem Betreten des Gebäudes, des mittleren Haupttrakts, wirft man einen ersten Blick durch einen gläsernen Verbindungsbau in den schmalen Patio und unter das aufgeständerte Hauptgebäude, und wie noch öfters beim Durchwandern dieses Gebäudes verschwimmen die Grenzen zwischen innen und außen: Blickt man jetzt in eine großzügige Pausenhalle, in den Pausenhof oder in einen Garten? In der recht kleinen Eingangshalle angekommen, erkennt man, dass sich die eben betrachteten Flächen des Erdgeschosses größtenteils im Außenbereich befinden. Da im damaligen Schulbauprogramm Flächen für Aufenthalts- oder Versammlungsbereiche wie etwa eine Aula nicht vorgesehen waren, schufen die Verfasser einen multifunktionalen Außenraum, den sogenannten „geschlossenen Freiplatz“, indem sie den Hauptbau aufständerten. Es war der Wunsch von Behnisch, „dass der Schulkörper sich mal als Ganzes erlebt“ [1]. Der großformatige Betonplattenboden überzieht alle drei Teile des Hofes und geht vom Patio homogen in den Atriumhof über. Dieser ist von einer fest installierten Möblierung freigehalten, lediglich im Randbereich sind feine blaue Bänke und Betonpflanzkübel angeordnet, hier finden im Sommer alle großen Veranstaltungen statt und es wird situativ möbliert.

Zwischen dem eigentlichen Schulbau und der Turnhalle liegt der asphaltierte Pausenhof, eine flache Treppenanlage führt die Schüler zu der niedriger gelegenen Turnhalle. Dieser Pausenhof ist von einer Vielzahl eindrucksvoller Bäume überdeckt, Altersgenossen des Gebäudes wie etwa die bedrohlich nah an die Fassade gesetzten Mammutbäume oder aber wie die eben erst gepflanzten Obstbäume. Der Garten erinnert an eine botanische Sammlung und die etwas wilde Anmutung täuscht darüber hinweg, dass diese Anlage einer intensiven Pflege bedarf. Ob die üppig grünen Dächer auch als solche geplant waren oder ob sich hier die Natur ein Stück zurückerobert hat, ist für den Besucher nicht mehr eindeutig zu klären.

3.4. Typologie, Anordnung, Nutzung

Konzipiert ist die Schule als eine dreiflügelige Gangschule mit einhüftiger Platzierung der Unterrichtsräume im Süden. Dieser Typus wird als eine Mischung aus Innenhofschule und Schustertyp bezeichnet. Dies ermög-

licht sowohl eine optimale Belichtung der Klassenzimmer über ausschließlich nach Süden orientierte horizontale Fensterbänder als auch lichtdurchflutete nach Norden orientierte Flure. Die Treppenhäuser befinden sich in den jeweiligen Raumzonen.

3.5. Pädagogisches Konzept

Das Gebäude funktioniert als neutrales Lern- und Arbeitsgehäuse und ist zuerst einmal dem klassischen Plenumsunterricht verpflichtet: Klassenzimmer, Fachräume, Lehrerzimmer, Flure. Die Struktur des Gebäudes ist gewissermaßen zeitlos und ebenso wie die ca. 70 m² großen Klassenzimmer immer noch gut nutzbar. Eine feste Bestuhlung gibt es nur in den Fachklassen, z. B. in den Naturwissenschaften, in den Klassenräumen ist die Bestuhlung frei wählbar, es werden je nach Situation verschiedene Formationen aufgestellt. Die jungen Schüler sind im angefügten Stelzenbau zuhause, die älteren im Hauptgebäude.

Allerdings fehlt, weil alle Klassenräume belegt sind, Platz für Teamräume, Besprechungsräume oder Lernateliers: So sind neue Lernkonzepte nur schwer in das Gebäude zu integrieren. Dies ist allerdings weniger zurückzuführen auf die nutzungsneutrale Grundstruktur des Hauses als vielmehr auf seine Überbelegung.

Ein weiteres Problem ist der mittlerweile an mindestens drei Tagen stattfindende Nachmittagsunterricht. Es gibt für die Zwischenzeiten nur einen kleinen Aufenthaltsbereich im Erdgeschoss hinter dem großen Fenster direkt unter dem Betonrelief am Westgiebel. Die Mensa konnte im benachbarten Haus der Jugend untergebracht werden. Not macht erfinderisch, und so suchen die Schüler sich selbst ihre Rückzugsräume: Ein beliebter Aufenthaltsort wurde der Raum unter den Treppen im Erdgeschoss – ein überraschend subtiler Umgang mit dem Denkmal.

Inzwischen wird das Schulleiterhaus, in dem sich eine Wohnung für die Schulleiter und den Hausmeister befindet, umgenutzt. Dort entsteht ein Schülerhort.

3.6. Ausstattung und Mobiliar

Das Mobiliar in den Klassenzimmern ist ein in Würde gehaltenes Standardmobiliar, schöne und schlichte Modelle, die gut mit den festen Einbauten harmonieren. Die Räume sind mit Einzeltischen ausgestattet und können individuell möbliert werden. Die Unterrichtszimmer sind in der Regel mit einer klassischen Tafel ausgestattet, ebenso mit fest installierten Schrankmöbeln in der Wandverkleidung der Flurwand. Hier sind feine Details zu finden, wie etwa die stellenweise angeordneten Lochungen für die Querlüftung oder die integrierten Lautsprecher des Mu-



Abb. 4: Blick in ein Klassenzimmer

siksaals. Ergänzend zu den Schränken der Klassenzimmer werden in den Fluren in Nischen eingebaute Garderobenschränke angeboten.

3.7. Raumwirkung und Belichtung

Die schlichte und repetitive Grundstruktur strahlt tiefe Ruhe aus, überall im Gebäude spürbar durch den Wechsel von schwerem Betonstragwerk zu filigranem Fassadengitter. Behnisch formulierte seine Absichten am 13. März 1959 in der Neuen Württembergischen Zeitung: „[...] das Gebäude sollte still und dienend ehrlich seinen Zweck erfüllen, [...] ohne sich laut in den Vordergrund zu drängen. Es sollte einen einheitlichen Charakter bis ins Detail haben, in Material und Farbe beschränkt.“ [2]

Das Konzept der Materialfarbe und der damit verbundene Einsatz von hochwertigen Materialien ist klassisch und führt zu einer festlichen und zeitlosen Atmosphäre im Inneren. Schwarze Steinzeugfliesen belegen die Böden aller öffentlichen Zonen, ein über 50 Jahre bewährtes Konzept, die Eigenfarbe des Kunststeins homogenisiert alle Gebrauchsspuren. Weiße Kalksandsteinwände wurden der Sichtbetonkonstruktion vorgemauert. Sie reflek-

tieren das einfallende Licht der gegenüberliegenden Fassade. Allgegenwärtig ist das von außen hereindringende grüne Leuchten, welches von der üppigen Pflanzenwelt der Außenanlagen durch die großen Verglasungen tritt. Großflächige dünne Verglasungen, in den Klassen als Fensterband, in den Erschließungsräumen geschosshoch, schaffen lichtdurchflutete Räume. Die Sonne könnte in den Sommermonaten fast schon als Bedrohung empfunden werden, gäbe es nicht das schützende Blätterdach, das man als lebenden Sonnenschutz und festen Bestandteil des Hauses ansehen könnte.

So entsteht trotz der hohen Verglasungsanteile im Sommer ein teilweise recht introvertierter Charakter. Mit den Jahreszeiten wechseln dessen Eigenarten.

Eine besonders schöne Stimmung entsteht im ersten Obergeschoss in den Fluren zum schmalen Patio. Hier wird die grün leuchtende efeubewachsene Wand jenseits des Patios als Raumabschluss wahrgenommen und nicht die dazwischenliegende Fassade, was den Gängen eine Großzügigkeit verleiht, die sie flächenmäßig nicht aufweisen. Beim Übergang in einen anderen Bauteil durch die raumhoch verglasten Brückenbauten scheint man das

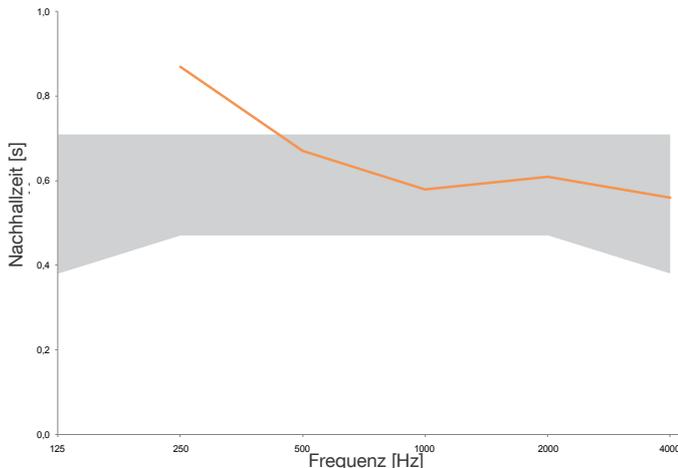


Abb. 5: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Göppingen

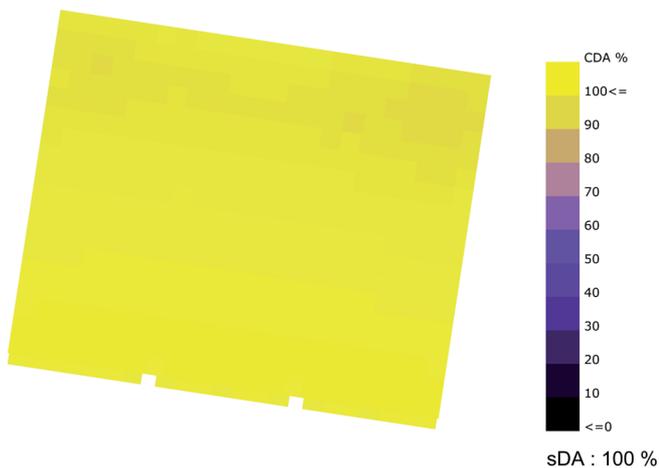


Abb. 6: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Göppingen

Gebäude zu verlassen und blickt in die benachbarten Baumkronen. Dominieren in den öffentlichen Bereichen die mineralischen Materialien, so sind die Unterrichtsräume von Holzoberflächen geprägt: Eichenfischgrätparkett auf dem Boden und eine Eichenwandvertäfelung zum Flur hin schaffen mit warmen Oberflächen eine angenehme Lernatmosphäre. Die Trennwände sind verputzt und weiß gestrichen ausgeführt, lediglich in den besonderen Räumen, wie dem Lehrerzimmer, sind die Wände allseitig mit Holz belegt. Die Leuchtstoffröhren an der Decke sind ohne jede Steuerungstechnik und erhellen die Klassenzimmer, wenn das natürliche Licht nicht mehr ausreicht. Abhängig vom jeweiligen Klassenzimmer besitzen sie ein Lamellenraster, öfters findet man aber auch einfach nackte Leuchten an der Decke, sodass Blendung entsteht.

3.8. Material und Konstruktion

Die Schule wurde als Stahlbetonskelett in Ortbetonbauweise erstellt, das Betonskelett wurde in handwerklich

gefertigte Holzschalungen gegossen. Lediglich die Brückengebäude werden von schlanken Stahlstützen getragen. Die damaligen Planer waren ihrer Zeit offenbar voraus, die zuerst angedachte innovative Umsetzung als Systembau konnte von der ausführenden Firma technisch noch nicht realisiert werden. Erst bei der Fachhochschule Ulm wurde eine Fertigteilbauweise umgesetzt, später entstand das von Fertigteilherstellern als Produkt vermarktete „System Behnisch“. Das Konstruktionsraster der 30 cm starken quadratischen Stützen beträgt 3,1 m und die Flachdecken liegen auf Unterzügen auf, die im Konstruktionsraster angeordnet sind. Das Tragwerk aus Stahlbeton ist einschalig und ungedämmt, nach heutigen Standards eine riesige Wärmebrücke.

Die Wände zwischen den Klassenzimmern sind aus Backsteinen gemauert, verputzt und weiß gestrichen. Die Wand zwischen Flur und Klassenzimmer ist aus nicht tragendem Sichtmauerwerk aus Kalksandstein zum Flur hin vor die Stützen gestellt. Es werden jeweils abwechselnd drei Steine horizontal, dann vertikal angeordnet, so entsteht ein großflächiges Ornament. Die Innenseite dieser Wand und die tragenden Stützen sind in den Klassenzimmern von einer raumhaltigen Wandverkleidung aus Eichenfurnier verdeckt, hier sind alle notwendigen Schrankmöbel untergebracht. Gelochte Gipskartondecken am Deckenrand reduzieren wirkungsvoll die Nachhallzeiten, mit Ausnahme der Frequenz von 250 Hz liegen alle im empfohlenen Bereich. Auffällig sind in den Klassenräumen die für eine bessere Akustik abgeschrägten Decken am Raumende. Die Beurteilung der Akustik fällt allerdings im Vergleich zu den anderen untersuchten Schulen, die in den Befragungen durchwegs gut bewertet werden, beim Hohenstaufen-Gymnasium eher durchwachsen aus: Die Note befriedigend wurde nach gut am zweithäufigsten vergeben.

Die raumhohen Fassadenelemente zwischen den Stützen aus schlanken, weiß lackierten Stahlprofilen ohne thermische Trennung sind jeweils in sechs Felder geteilt: Die zwei unteren Felder der Brüstung bestehen aus einem opaken emaillierten Sandwichpaneel mit minimaler Dämmung. Diese wurden im Gegensatz zum Stahlbetonskelett bereits vorgefertigt. Darüber liegen zwei Felder als Drehkippensterflügel mit Zweischeibenverglasung, die zwei Felder im Sturzbereich bestehen ebenfalls aus einer Zweischeibenverglasung, in die ein textiles Gewebe integriert ist. Es vermittelt den Eindruck einer Milchglasfüllung und soll bei gleichzeitiger Lichtdurchlässigkeit die solare Direktstrahlung reduzieren. Unter diesem opaken Feld waren ursprünglich die Bris-Soleil-Gitter als starrer Sonnenschutz angeordnet, um die darunterliegenden Fenster zu verschatten. Für eine bessere Regelbarkeit der Sonneneinstrahlung entschied man sich, die Gitter durch außenliegende, manuell zu bedienende Jalousien

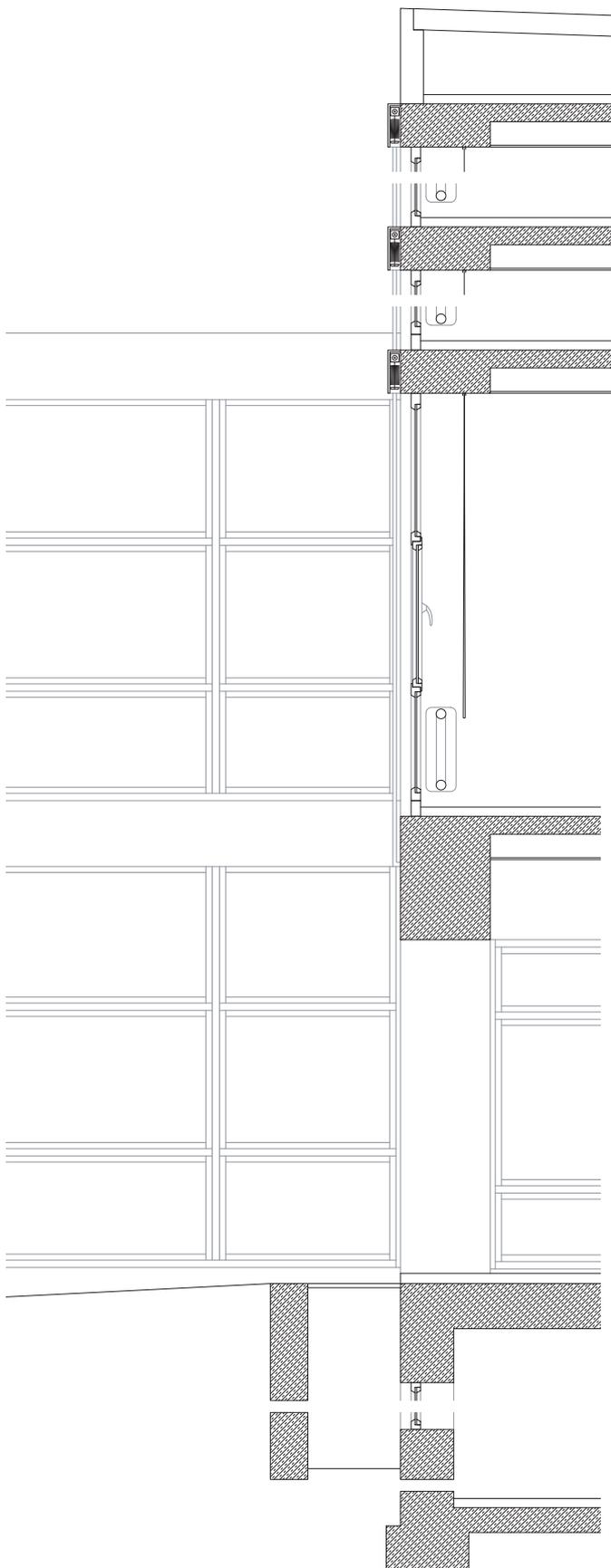


Abb. 7: Fassadenschnitt

zu ersetzen. Prinzipiell ist dies für eine Südorientierung eine gute Lösung, würden die Jalousien von den Nutzern immer rechtzeitig bedient – zumindest diejenigen, die noch funktionieren. Im Laufe der Zeit sind viele der Elemente kaputtgegangen, eine Reparatur blieb oft aus. Im Sommer führt die Kombination aus unzureichendem Schutz vor solarer Einstrahlung und Nutzerverhalten zu einer ernstzunehmenden Überhitzungsproblematik. Das zeigen die Messwerte und dies wird in der Befragung bestätigt: Mehr als die Hälfte der Befragten beurteilen den sommerlichen Komfort mit den Noten 5 und 6, weil es im Sommer viel zu heiß wird, um konzentriert zu lernen.

3.9. Technikkonzept/ Messdatenauswertung

Auch wenn die Schule bisher von größeren Eingriffen weitestgehend verschont blieb, gab es technische Veränderungen, die aus energetischer Sicht zwar teilweise nachvollziehbar sind, als Konsequenz aber Komforteinbußen für die Nutzer mit sich brachten. So fand vor einigen Jahren ein Austausch des Wärmeerzeugers statt: Der alte Dampf-Heizkessel wurde entfernt, seitdem bezieht die Schule ihre Wärme aus dem externen „Nahwärmenetz Ost“ der Stadtwerke Göppingen, das von einem Blockheizkraftwerk und einem Spitzenlastkessel versorgt wird. Durch diese Umstellung sind die an der Fassade angebrachten Radiatoren nun nicht mehr dampfbetrieben, sondern wassergeführt. Die geringere Energiedichte des Wassers in Kombination mit der deutlich niedrigeren Vorlauftemperatur der Fernwärme von 75 °C jedoch reicht für die alten und jetzt unterdimensionierten Heizkörper nicht mehr zum Heizen des Gebäudes aus. Die Grafik der repräsentativen Winterwoche beispielsweise zeigt deutlich, dass die Innenraumtemperatur jeden Tag bei Unterrichtsbeginn unter 20 °C liegt. Auch bei der Befragung gab es häufig die Anmerkung, dass es im Winter sehr kalt sei und die Schüler mit Jacken im Unterricht sitzen. Undichte Fenster sind ein weiterer Kritikpunkt. Weil die meisten Nutzer die Innenraumtemperatur im Winter ohnehin schon als unangenehm empfinden, werden die Fenster während des Unterrichts selten geöffnet, die CO₂-Konzentration steigt dementsprechend schnell an. Wird zwischen den Unterrichtsstunden bzw. während der Pausen nicht stoßgelüftet, starten die Schüler in die nächste Stunde mit Werten über dem Grenzbereich, noch bevor der Unterricht überhaupt begonnen hat. So kommt es dann auch vor, dass CO₂-Werte von über 3.500 ppm auftreten. Auch von den Schülern und Lehrern wird die Luftqualität mit einer durchschnittlichen Note von 4 im Vergleich recht schlecht bewertet, die am häufigsten vorkommenden Wörter in der Befragung sind „verbraucht“, „stickig“ und „riecht“.

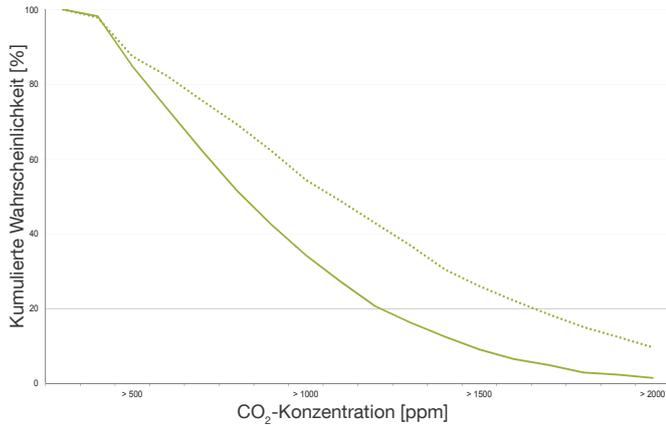


Abb. 8: Kumulierte Wahrscheinlichkeit

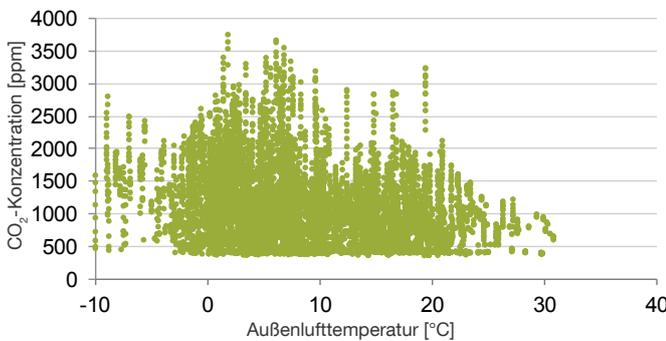


Abb. 9: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur

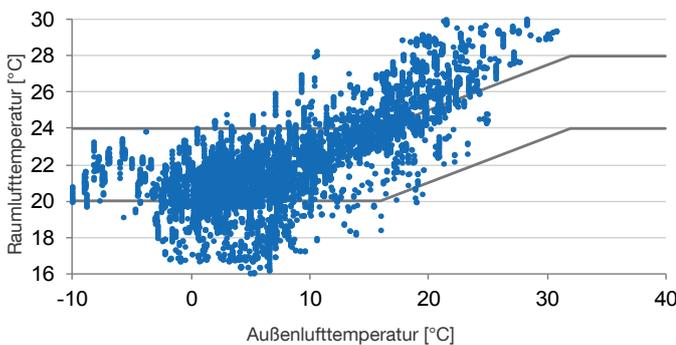


Abb. 10: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur

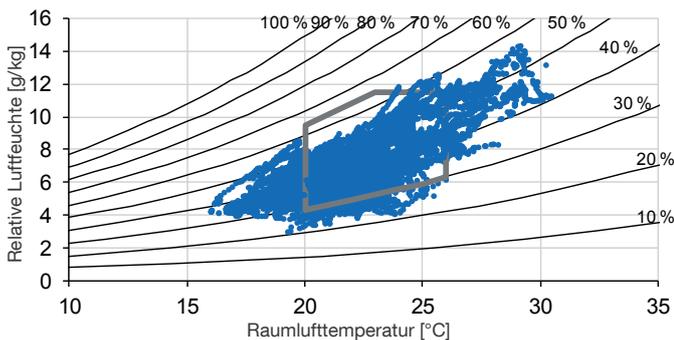


Abb. 11: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte

Die ursprünglich im Rahmen der Fensterelemente integrierten, öffnbaren Lamellen hatten früher einen Luftwechsel sichergestellt, ohne dass die Fenster geöffnet werden mussten. Wegen der Zugluft im Winter hat man sie aber vor langem dauerhaft verschlossen. Diese Lamellen waren Bestandteil des ursprünglichen Querlüftungssystems, das ohne Ventilatoren nur mit dem natürlichen Druckgefälle arbeitete. Lüftungsschlitze in den Flurwänden führten über Lüftungskanäle in der abgehängten Flurdecke zu Auslässen in der gegenüberliegenden Fassade und stellten so eine Querlüftung her. Auch die Lüftungsschlitze wurden geschlossen, sodass keine Querlüftung mehr möglich ist.

3.10. Zustand

Das Hauptproblem der Schule ist zugleich auch Merkmal des überaus charmanten Charakters. Der Denkmalschutz lobt das „baulich sehr gut überlieferte Beispiel der Schularchitektur der 1950er-Jahre“ [3]. Das Hauptgebäude befindet sich weitestgehend in einem etwas ramponierten, aber durchaus akzeptablen Originalzustand: Alles ist alt und noch original, mit viel Patina und Gebrauchsspuren, die nun von fast 60 Jahren Schulgeschichte erzählen. Die Fenster mit den wunderbaren dünnen Stahlprofilen sind so verzogen, dass sie teilweise nicht mehr aufgehen, durch die hier entstandenen Spalten pfeift der Wind, in die Turnhalle wächst gar der allgegenwärtige Efeu herein. Fensterscheiben in den Treppenhäusern sind teilweise trüb geworden, und doch gibt es immer noch genügend Ausblicke in die Landschaft. Das Gebäude ist in Würde gealtert und schultert Unglaubliches. Die schwarzen Kunststeinfliesen sind zeitlos und edel, der Ersatz von gesprungenen Fliesen ist erst erschwert, seitdem der Farbton nicht mehr serienmäßig erhältlich ist. Das Parkett hält sicher nochmals 60 Jahre, wie man es schon aus den Bauten der Gründerjahre gewöhnt ist. Die vertikalen Wandflächen aus Holzeinbaumöbeln, Holzvertäfelungen und Kalksandstein sind noch tadellos, ein Zustand, der sicherlich nicht mit handelsüblichen Trockenbauwänden zu erreichen wäre. Lediglich den Sichtbetonoberflächen wurde keine echte Patina gegönnt, hier haben ein grauer Anstrich und eine vermutlich zu gut gemeinte Betonsanierung viel von der Tiefe und natürlichen Marmorierung des Materials geschluckt. Ein Standard an robusten Materialien, der heute nicht mehr selbstverständlich ist, stellt im Hohenstaufen-Gymnasium unter Beweis, dass robuste Materialien einer Schule sehr wohl ein langes Leben verleihen.

In den 1990er-Jahren wurden drei Ergänzungsbauten vom Büro Behnisch & Partner behutsam geplant. Sie sollten die große Raumnot lindern und wurden 2001 bezogen. Ein Treppenhaus ist zugunsten eines kleinen Besprechungsraums aufgegeben worden.

4. Analysen sanierter Schulen

Folgende Schulen, nach Baualter sortiert, wurden untersucht (die Sanierung der mit * gekennzeichneten Schulen wurden von der DBU gefördert):



Grundschule in der Haimhauserstraße, München (1898)



Eerste Openluchtenschool voor het Ge-
zonde Kind, Amsterdam (1930)



Schulanlage Wandermatte, Köniz-Wabern bei Bern (1956)



Gymnasium Sonthofen, Sonthofen (1974) *



Mittelschule Buchloe, Buchloe (1976) *



Gymnasium der Stadt Baesweiler, Baesweiler (1978) *

4.1. Methodik

4.1.1. Methodik der Messungen

Mit unterschiedlichen Messungen untersuchten wir die fünf Schulen, um die Komfortparameter vergleichen zu können. Wir haben dafür in jeder Schule zwei exemplarische Klassenzimmer mit identischer Orientierung und Kubatur ausgewählt.

Diese liegen entweder direkt nebeneinander bzw. übereinander. Die ausgewählten Klassenzimmer sollten – je nach Orientierung des Gebäudes – die Extremfälle für das thermische Verhalten widerspiegeln: wenn möglich nach Osten bzw. Süden orientiert. Außerdem sollten die Räume keine Fachklassenzimmer sein, sondern „normale“ Unterrichtsräume. Für die Langzeitmessung des thermischen und hygienischen Komforts der Klassenzimmer kamen Geräte des Herstellers IC-Meter zum Einsatz, die Raumlufttemperatur, Luftfeuchte, CO₂-Konzentration sowie den Schallpegel im 5-Minutentakt aufzeichneten. Zudem erfassten sie die jeweiligen Außenlufttemperaturen der nächstgelegenen Wetterstation. Die Geräte sind mit einer SIM-Karte versehen, sodass die erfassten Daten über das Mobilfunknetz an eine Cloud gesendet, von dort abgerufen und in ein Datenverarbeitungsprogramm zur Auswertung importiert werden können. Der Messzeitraum der untersuchten Schulen ist nicht identisch, jedoch achteten wir darauf, sowohl Daten der kalten als auch der warmen Jahreszeit zu sammeln. Die Messhöhe der Sensoren betrug 1,2 m, an der Innenwand gegenüber der Fassadenseite. Über die erfassten Daten des Schallpegels, die Aufschluss über eine Belegung des Raums geben, war es möglich die Nutzungszeiten zu bestimmen. Die abgebildeten Punktgrafiken zeigen somit 5-Minutenwerte, ausschließlich im Belegungszeitraum.

Die CO₂-Konzentration soll objektiv Aufschluss über die Luftqualität geben, sie dient jedoch nur als Indikator für andere Belastungen: Gerüche oder leichtflüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen, sogenannte VOCs, lassen sich gar nicht, oder nur mit grossem Aufwand nachweisen.

Die üblicherweise in Innenräumen gemessenen CO₂-Konzentrationen sind für den Menschen unkritisch, sie zeigen jedoch bedingt eine Korrelation zu dem subjektiven Empfinden von „stickiger, verbrauchter“ Luft. Für die Darstellung verwenden wir zwei Grafiken. Die kumulierte Wahrscheinlichkeit zeigt an, zu welchem prozentualen Anteil die CO₂-Konzentrationen mindestens vorliegt. Die zwei Verlaufslinien unterscheiden dabei zwischen Außenlufttemperaturen kleiner und größer als 12°C. Diese Unterteilung dient der Annahme, dass unter dieser Temperaturgrenze die Nutzer die Fenster auf Grund von Zugerscheinungen manuell nicht mehr öffnen. Die

zweite Grafik zeigt das Verhältnis der CO₂-Konzentration abhängig zur Außenlufttemperatur. Zudem sieht man die vier Kategorien der nach DIN EN 13779 [4] empfohlenen Grenzwerte. Dabei reicht Kategorie I bis 400 ppm, Kategorie II bis 600 ppm, Kategorie III bis 1.000 ppm und Kategorie IV größer als 1.000 ppm über der CO₂-Konzentrationen der Außenluft, welche einheitlich bei allen Schulen auf 400 ppm angesetzt ist.

Lufttemperatur und Luftfeuchte geben Aufschluss über den thermischen Komfort. Unberücksichtigt bleibt die Strahlungstemperatur (mittlere Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen). Das Mittel aus Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur bildet die sogenannte operative Temperatur – die der Empfindung des Menschen entspricht. Die Ermittlung der Strahlungstemperatur wäre messtechnisch jedoch sehr aufwändig.

Die Ermittlung der Strahlungstemperatur wäre messtechnisch sehr aufwändig, zudem ist der Unterschied zwischen Luft- und Strahlungstemperatur bei den gut gedämmten Schulen relativ gering. Es ist davon auszugehen, dass bei drei Schulen der thermische Komfort etwas schlechter ausfällt, als die Messresultate dies zeigen: in München und Göppingen aufgrund der geringen Dämmstärke, in Amsterdam aufgrund des großen Glasanteils. Die operative Temperatur fällt im Winter wohl geringer aus und im Sommer etwas höher. Der thermische Komfort ist also bei diesen drei Schulen geringfügig schlechter als dargestellt. Umgekehrt verhält es sich beim Gymnasium Sonthofen. In dieser Schule ist der thermische Komfort besser, als die Messung der reinen Lufttemperatur zeigt. Die Unschärfe ist jedoch in einem akzeptablen Rahmen, denn eine korrekte Betrachtung der operativen Temperatur würde die Aussagen der Untersuchungen nicht verändern. Eine aufwändige Ermittlung der Strahlungstemperatur würde in dem Kontext der durchgeführten Untersuchungen damit keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn liefern.

Für die Darstellung der thermischen Behaglichkeit gibt es zwei verschiedene Grafiken: die erste zeigt die gemessenen Raumlufttemperaturen und setzt diese ins Verhältnis zu den vorherrschenden Außenlufttemperaturen. Hinterlegt ist der empfohlene Bereich, der sich mit steigender Außenlufttemperatur bis zu einem gewissen Grad erhöht. Dieser Bereich ist an die DIN EN 15251 [5] angelehnt, auch wenn in diesem Fall nicht die operative, sondern die von uns ermittelte Lufttemperatur dargestellt ist. In der zweiten Grafik ist die gemessene Raumlufttemperaturen im Verhältnis zur Raumluftfeuchte dargestellt. Der empfohlene Behaglichkeitsbereich nach DIN 1946-6 [6] ist

grau hinterlegt. Hier liegt die Temperaturempfehlung unabhängig von der Außenlufttemperatur zwischen 20 und 26 °C. Nach Definition sollte die relative Luftfeuchte im Idealfall zwischen 30 % und 65 % liegen sowie den Wert der absoluten Feuchte von 11,5 g/kg nicht überschreiten. Zusätzlich gibt es noch zwei Grafiken die den Verlauf einer repräsentativen kalten sowie warmen Woche zeigen. Anhand dieser kann man das thermische Verhalten bei sich ändernden Außentemperaturen, als auch die Entwicklung der CO₂-Konzentration und der relativen Feuchte ablesen.

Mit dem Softwareprogramm AkuCheck der Bergischen Universität Wuppertal ermittelten wir die Nachhallzeit in den jeweiligen Klassenräumen. Sie gibt Auskunft über die vor allem im Schulbau wichtige Sprachverständlichkeit. Die nach DIN 18041 [7] für Unterrichtsräume empfohlenen Nachhallzeiten bei unterschiedlichen Frequenzen sind abhängig vom Raumvolumen und differenzieren deshalb von Schule zu Schule leicht. Da wir die Messungen im unbesetzten Raum durchgeführt haben, fügten wir in der Software virtuell eine Belegung mit 25 Personen hinzu. In den Grafiken ist die ermittelte Nachhallzeit in schwarzer Linie mit dem hinterlegten grauen Bereich der empfohlenen Nachhallzeit zu sehen.

4.1.2. Methodik der Simulationen

Für die Bewertung und Vergleichbarkeit der Energieverbräuche war ursprünglich geplant, von allen Schulen die Strom- und Wärmeverbräuche einzuholen bzw. die Daten aus den, sofern vorliegenden, DBU-Schlussberichten der jeweiligen Schule zu verwenden. Im Laufe der Bearbeitung stellte sich aber heraus, dass die Zählerinformationen hinsichtlich des Energieverbrauchs nicht vergleichbar sind. So sind mit unter Grundschulen, Mittelschulen und Gymnasien, teilweise als Ganztagschulen ausgebildet, vertreten. Um eine direkte Vergleichbarkeit der energetischen Performance herstellen zu können entschieden wir uns deshalb die sechs Schulen unter normierten Randbedingungen mit der Simulationssoftware TRNSYS thermisch zu simulieren.

Dabei stellte sich die Frage welcher Parameter für einen energetischen Vergleich geeignet ist, ein möglichst „gerechtes“ Bild aufzuzeigen. Es ging uns vor allem darum, die baulichen Qualitäten transparent zu machen und nicht etwa technische Parameter wie die Effizienz der Fernwärmeversorgung der Kommune. Die Nutzenergie beschreibt hauptsächlich die bauliche Qualität, ohne aber die Art der Wärmeübergabe und die stromverbrauchende Anlagentechnik zu berücksichtigen. Eine Betrachtung der Endenergie führt wiederum zu einem verzerrten Bild bei allen Gebäuden, die Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteerzeugung einsetzen. Deshalb definierten wir die Systemgrenze neu und führten den Begriff des „Raumbedarfs“ ein. Dieser umfasst die Werte für Heizen, Kühlen, Hilfsenergie und Kunstlicht in kWh/m²a. Dabei wird ein Klassenzimmer im obersten Stockwerk mit den entsprechend vorhandenen Bauteilen und den im Raum vorhandenen haustechnischen Systemen wie z. B. dem Übergabesystem bei gleichzeitiger Berücksichtigung von raumexternen Stromverbrauchern wie der Lüftungsanlage simuliert. Durch die Simulation ist es möglich bauliche und haustechnische Unterschiede herauszuarbeiten und gleichzeitig Nutzereinflüsse wie z. B. die Unterrichtszeiten zu normieren.

Dabei wurde sowohl der ideale Nutzer als auch eine optimale Mess- Steuer- und Regelungstechnik (MSR) – gemäß den Vorgaben der Planer – angesetzt. So ist z. B. eine Annahme, dass der Nutzer ab einer CO₂-Konzentration höher als 1.400 ppm das Fenster aufmacht, auch wenn dies nicht mit der Realität übereinstimmen wird. Somit schneiden natürlich belüftete Schulen beim Raumbedarf-Heizen schlechter ab als in der Realität, da in der Simulation mehr Wärme für die Erwärmung der frischen Luft aufgebracht wird. Auch bei der Berechnung des Strombedarfs für künstliche Beleuchtung setzten wir den „idealen Nutzer“ an, der nur dann Kunstlicht zuschaltet wenn dies erforderlich ist. In der Realität ist der Strombedarf für Kunstlicht sicherlich größer, diese Annahme ermöglicht jedoch eine Vergleichbarkeit der Schulen herzustellen.

CO₂-Äquivalent-Faktoren [kg/kWhEnd]

Strom-Mix: 0,617
Gas-BHKW: 0,196
Erdgas: 0,241
Holz-Pellets: 0,018
Fernwärme Göppingen: 0,230

Den winterlichen thermischen Komfort regelte man einheitlich auf eine minimale operative Raumtemperatur von 20 °C. Der thermische Komfort im Sommer ist nicht vereinheitlicht, sondern gemäß der Planung simuliert. Auch die Übergabesysteme inklusive deren Regelung sind entsprechend den Angaben der Planer in der Simulation abgebildet. Um die Effizienz der Versorgungssysteme bestimmen zu können verwendeten wir einheitliche Parameter. Um auch eine Bewertung der Energiequellen einfließen zu lassen, ist sowohl, als auch die Bilanzierung der Primärenergie oder der CO₂-Emissionen möglich. Die Betrachtung der Primärenergie liefert ein verzerrtes Bild bei den Schulen, die an eine Fernwärme angeschlossen sind, da Fernwärmenetze häufig Müllverbrennung einsetzen, was zu sehr guten Primärenergiefaktoren führt. Deshalb entschieden wir uns dazu, das CO₂-Äquivalent zu bilanzieren. Die Faktoren stammen aus der Datenbank von GEMIS, Version 4.93 [8]. Bei Schulen, die an ein Wärmenetz angeschlossen sind, holten wir die Faktoren entweder direkt bei den zuständigen Wärmeversorgern ein bzw. ermittelten sie anhand der von den Stadtwerken zur Verfügung gestellten Daten selbst. Photovoltaikanlagen, die Strom zum Eigennutzung bzw. zur Netzeinspeisung produzieren wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht in die Bilanz mit aufgenommen. Der Fokus sollte bewusst auf dem Zusammenwirken der Gebäudehülle und der Anlagentechnik liegen. Als dritter Wert zur Vergleichbarkeit, neben Raumbedarf und CO₂-Äquivalent, liefert die Betrachtung der Energiekosten, die für den Gebäudebetrieb (Heizen, Kühlen, Lüften und Kunstlicht) erforderlich sind. Zur Vereinfachung nehmen wir pauschal für jede Kilowattstunde Wärme 10 ct., für Strom 20 ct. an. Die wirtschaftliche Betrachtung von Energie zeigt durchaus eine gewisse Korrelation zur „ökologischen Wertigkeit“. Sowohl das CO₂-Äquivalent als auch die Kosten des Gebäudebetriebs gründen auf den zuvor ermittelten Simulationsergebnissen des Raumbedarfs.

Für eine Bewertung des visuellen Komforts erfolgte eine dynamische Tageslichtsimulation mit den Programmen

Radiance und Daysim. Das Setup dafür ist die Software Honeybee, ein Plug-In der Software Grasshopper. Diese ermittelt den Faktor der kontinuierlichen Tageslichtautonomie (cDA) und gibt Aufschluss darüber, zu welchem Anteil im Klassenzimmer die von der DIN EN 15251 geforderte Beleuchtungsstärke von 500 lux durch Tageslicht bereitgestellt wird. Bei Schulgebäuden wie dem Gymnasium Sonthofen, die über eine automatische Regelung des Sonnenschutzes verfügen, erfolgte eine Implementierung der Steuerung nach Angaben des Planungsbüros. Bei Schulen mit einem manuell steuerbaren Sonnenschutz, wie z. B. die Schule Wandermatte, wurde der Sonnenschutz so geregelt, dass der Nutzer diesen schließt, sobald er von direktem Sonnenlicht geblendet wird. Da die Grundschule in München nur über Vorhänge zum Verdunkeln verfügt, wurde hier kein Sonnenschutz berücksichtigt.

4.1.3. Methodik der Umfrage

Um auch eine subjektive Meinung der realen Nutzer der Schulen zu erhalten erfolgte eine anonymisierte Befragung der Schüler sowie der Lehrkörper der beiden Klassenräume, in denen auch die Messungen durchgeführt wurden. Dabei konnten die Schulen selber auswählen, ob Sie die Befragung online oder über einen Fragebogen ausfüllen. Die Erstellung der Onlinebefragung erfolgte auf der Online-Plattform SurveyMonkey, welche die Möglichkeit bietet Antworten individuell zu filtern und auszuwerten. Schulen, die den Fragebogen händisch ausfüllen wollten, bekamen den Fragebogen zugeschickt, die Ergebnisse wurden wiederum auf SurveyMonkey eingepflegt. Zusätzlich zu Göppingen haben drei der sechs untersuchten Schulen an der Umfrage teilgenommen.

Die Ergebnisse (ab Seite 40) sind in Kuchendiagrammen dargestellt und zeigen die prozentuale Verteilung aller Teilnehmer der Umfrage. Diese konnten die verschiedenen Kriterien nach dem Schulnotensystem (1 = Sehr gut, 6 = ungenügend) bewerten.

4.2. Analysen und Ergebnisse

4.2.1. Grundschule in der Haimhauserstraße, München



Während Schulbauten der 1970er-Jahre teilweise Außenwandstärken von 20 cm und manche Neubauten einen zwölfteiligen Schichtaufbau aufweisen, besteht die Grundschule an der Haimhauserstraße aus einem einschaligen, 80 cm starken Mauerwerk. Die um die Jahrhundertwende sehr verbreitete Bauweise aus Vollziegeln ist materialintensiv, aber einfach. Bei einer routinemäßigen statischen Untersuchung entdeckte man im Rahmen der Sanierungsvorbereitung folgenden Sachverhalt: Der Fugenmörtel entpuppte sich bei Bohrkernentnahmen als nicht ausreichend fest. Offensichtlich wurden feine Sande ausgesiebt und für den Putz verwendet, sodass nur grobkörniger Zuschlag für den Mörtel übrigblieb. Nun müssen zur Ertüchtigung unzählige nachträgliche Bohrlochinjektionen durchgeführt werden – auch wenn das Mauerwerk 120 Jahre lang verlässlich getragen hat. Diese Maßnahme treibt die Kosten für die Sanierung erheblich in die Höhe.

Auf eine Dämmung der Außenfassade wird verzichtet. Für die anstehende Sanierung wurden zunächst mehrere Varianten der zusätzlichen Innendämmung durchgerechnet, jedoch kam man zu dem Ergebnis, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis unwirtschaftlich ausfiel, und so entschied man sich letztendlich gegen große Dämmmaßnahmen. Die Brüstung sowie die Laibung sind mit 15 mm dicken Kalzium-Silikatplatten gedämmt. Die Trennwände zwischen den einzelnen Klassenräumen und dem Flur sind in der gleichen Bauweise errichtet und weisen solide 60 cm auf. Das Haus ist unterkellert, wobei das Untergeschoss auf Souterrainebene liegt und hohe Fenster zum Außenraum besitzt. Alle Decken wurden in der damals modernen Stahlverbundbauweise errichtet und sind heu-

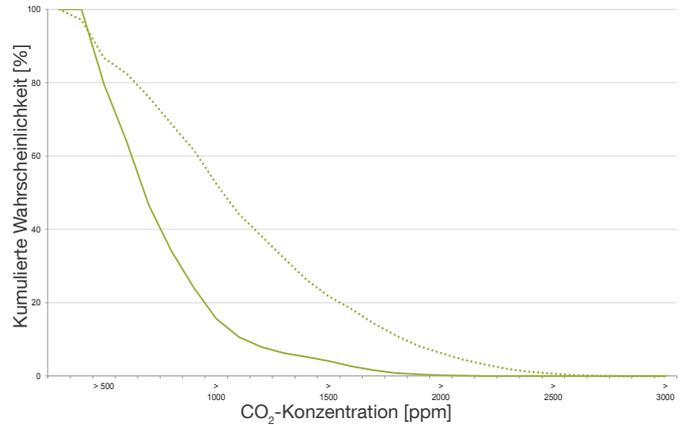


Abb. 12: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, München

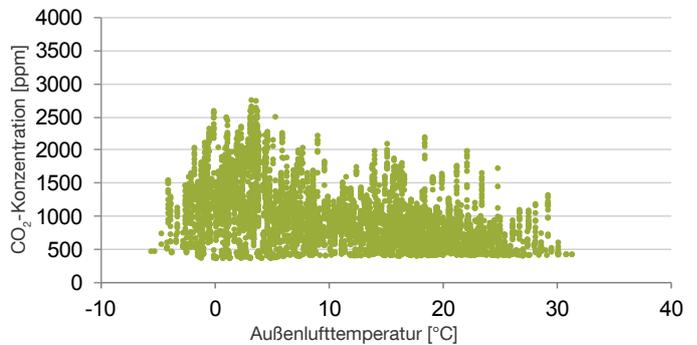


Abb. 13: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, München

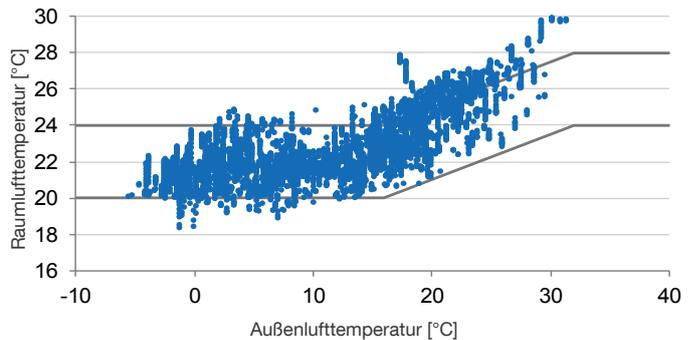


Abb. 14: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, München

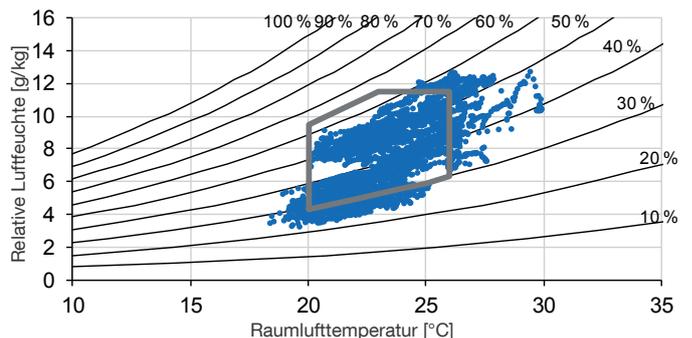


Abb. 15: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, München

te noch in gutem Zustand. Hierbei wurden Stahlträger in einem Abstand von 3,5 bis 4 m von der Außenwand zur Trennwand zwischen Klasse und Flur über eine Distanz von gut 7 m gespannt, darauf liegen als zweite Trag-schicht Stahlträger im Abstand von ca. 70 cm. Anschließend wurde die Deckenschalung gebaut und mit Beton verfüllt. Das hoch denkmalgeschützte Rabitzgewölbe in den Fluren besteht aus einer Stahlunterkonstruktion und einem Rabitzgitter als Träger für den Putz. Zwischen Gewölbe und Deckenunterseite befindet sich ein Hohlraum. Treppe und Treppenhaus bestehen aus unbewehrtem Beton. Die Oberfläche ist gleichmäßig gestockt.

Als Theodor Fischer vor mehr als 100 Jahren Schulen gebaut hat, gab es noch nicht die Möglichkeiten der mechanischen Lüftung. Die Zu- und Abluft der Klassenräume konnte zumeist nur einseitig über die Fenster geregelt werden, weil eine Querlüftung über die Flure zu großen akustischen Problemen führt. Der Architekt Fischer hat ein spezielles Lüftungssystem, die sogenannte „Berliner Lüftung“ für diese mehrgeschossigen Gebäude angewendet. Diese Art der Schachtlüftung bedeutet, dass die verbrauchte Luft über einen Entlüftungsschacht aus dem Raum strömt und die frische Zuluft über Undichtigkeiten von Fenstern, Türen und Fugen nachströmt.

Wie in den meisten Schulen aus dieser Zeit wurden auch hier die Lüftungsschächte im Zuge der erwähnten Sanierung in den 1960er-Jahren mehrheitlich geschlossen, sodass aktuell nur über die Fenster gelüftet wird. Bei der nun anstehenden Sanierung will das ausführende Architekturbüro karlundp Architekten die Schächte wieder öffnen und als Lüftungsschächte reaktivieren.

Diese Öffnung der Schächte in Kombination mit Stoßlüften kann dafür sorgen, dass die CO₂-Konzentration während der Unterrichtszeit reduziert wird. Momentan

zeigen die durchgeführten Messungen, dass an kalten Tagen die CO₂-Konzentration über den Tag stetig steigt und erst nach Beenden des Unterrichts wieder absinkt. In den Sommermonaten treten aufgrund der natürlichen Fensterlüftung keine erhöhten CO₂-Konzentrationen auf. Generell benötigen Schächte, die an die Außenluft grenzen, also über Dach geführt werden, nach DIN 18017 keine Absperrvorrichtung gegen Feuer- und Rauchüber-

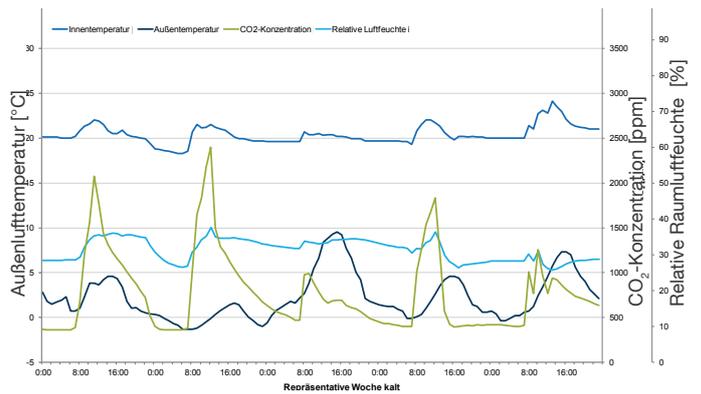


Abb. 16: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), München

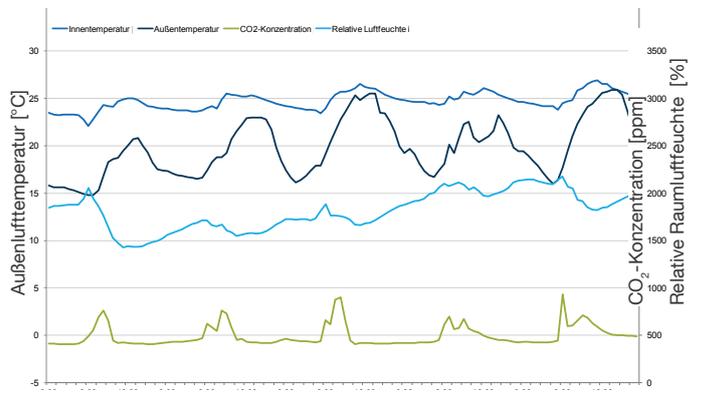


Abb. 17: Warme repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), München

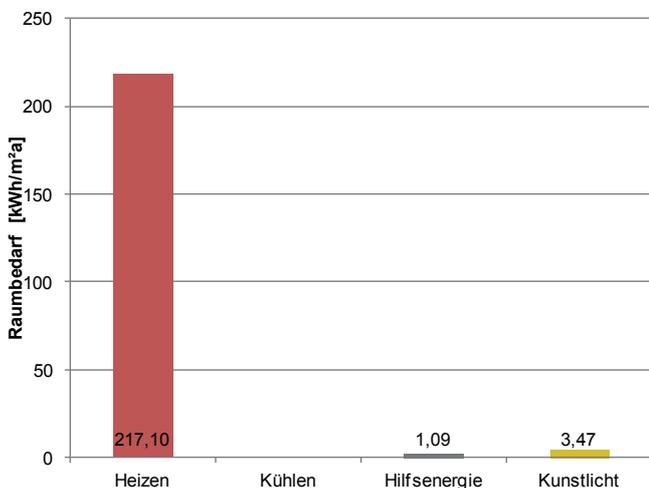


Abb. 18: spez. Raumbedarf, München im unsanierten Zustand

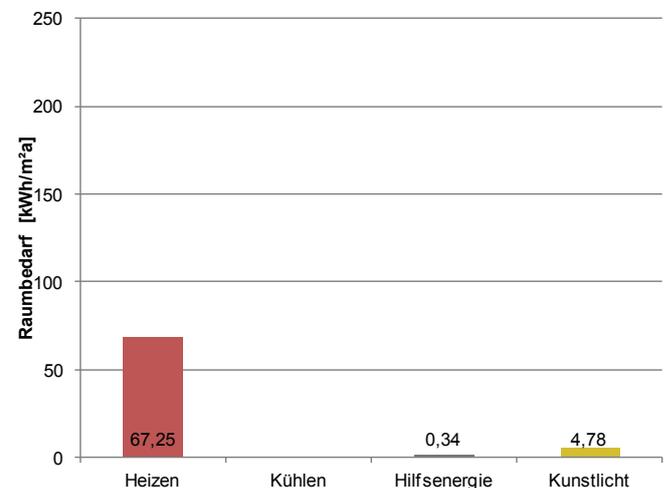


Abb. 19: spez. Raumbedarf, München im sanierten Zustand

tragung. Da die Schächte der Theodor-Fischer-Schule allerdings im kalten Dachraum enden, also innerhalb der Gebäudegrenzen und in einem anderen Brandabschnitt als das zugehörige Zimmer, muss der Feuerwiderstand sichergestellt werden. Derzeit entwickelt ein Brandschutzsachverständiger mithilfe eines Original-Brandversuchs ein Konzept zum wirksamen Schutz gegen die Brandübertragung in den Dachraum. Ziel der Konzeption ist, mit geringem baulichen Aufwand die historischen Lüftungsschächte in ursprünglicher Form und Funktion zu belassen. Ein Brandschutz-Prüfsachverständiger bewertet anschließend das Konzept, wodurch für ähnliche historische Schachtlüftungen ein Präzedenzfall geschaffen werden könnte.

Von jedem Klassenzimmer führt ein Schacht bis in den Dachraum. In den jeweiligen Klassenzimmern wird dabei die warme, verbrauchte Luft unterhalb der Decke abgeführt. Durch den thermischen Auftrieb steigt die Luft nach oben in das Kaldach der Schule. Unterstützt wird das System noch durch die Sogwirkung, die im luftdurchströmten Kaldach entsteht. Frische Luft gelangt durch Stoßlüften in den Unterrichtspausen in die Klassenzimmer. Dieses Lüftungssystem von Theodor Fischer findet sich auch in anderen Schulen in München und wurde bereits in der Schule Freimann in anderer Art und Weise reaktiviert. Für die Möglichkeit der Nachtauskühlung der Räume wird ein Oberlicht über einen elektrischen Antrieb geöffnet.

Unter den Fenstern befinden sich Heizkörper, die – aufgrund des schlechteren Dämmstandards der Fassade – mit einer hohen Vorlauftemperatur betrieben werden. Die Heizung wird von einem Gaskessel versorgt. Die Heizkörper sind aus der Zeit der Sanierung in den 1960er-Jahren, werden jedoch im Zuge der momentanen Sanierung erneuert. Der Gaskessel wurde vor zehn Jahren neu eingebaut und wird jetzt nicht ausgetauscht oder ersetzt, weil die Schule, sobald der Anschluss an das Fernwärmenetz der Stadt München in diesem Teil der Stadt besteht, darüber versorgt werden soll.

Der Temperaturverlauf aus den Messungen in der Heizperiode zeigt, dass die Innentemperatur während der Nutzungszeit fast immer im komfortablen Bereich zwischen 20 und 24°C liegt, nur morgens kann es vorkommen, dass die Temperatur wegen Abschalten der Heizung und Nachtauskühlung zu Unterrichtsbeginn auf unter 20°C abfällt. Die dicken Mauerwerkswände und offenen Decken in den Klassenräumen speichern im Sommer tagsüber die Wärme und geben sie nachts an den Raum zurück. Durch die Nachtlüftung können so die internen Wärmelasten aus dem Gebäude geführt werden. Auf eine mechanische Kühlung wird verzichtet.



Abb. 20: Klassenraum in München

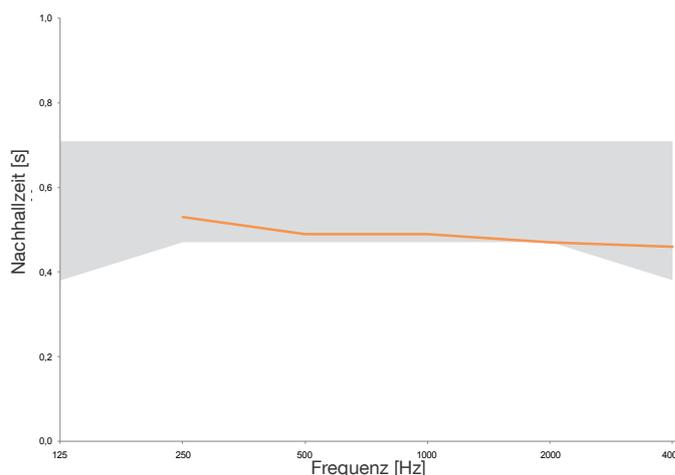


Abb. 21: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, München

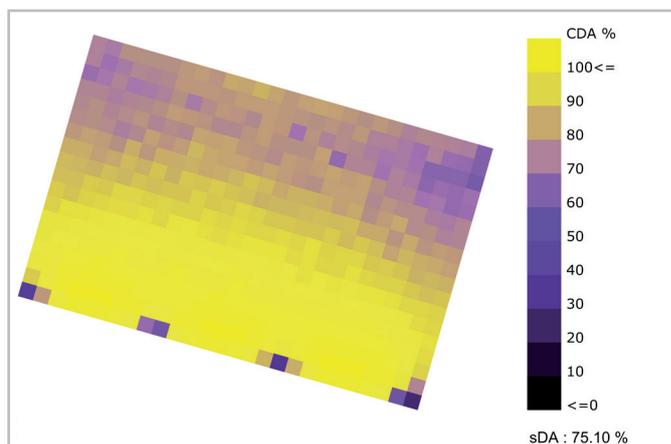


Abb. 22: Continuous Daylight Autonomy (cDA), München

4.2.2. Erste Openluchtschool, Amsterdam



Der Architekt Duiker betrachtete seine Gebäude als Objekte mit einer limitierten Lebenserwartung und verglich sie mit Autos und Flugzeugen. Während die Tragstruktur für eine größere Zeitspanne ausgelegt war, plante er die Fassade – und damit die Fenster – für eine weitaus kürzere Lebensdauer. So reichten die Öffnungsflügel der Originalfenster der Openluchtschool über die volle Höhe zwischen Brüstung und Unterkante der darüberliegenden Decke. Sie hatten eine feine dreigeteilte Sprossung und keinen feststehenden Mittelholm, sondern schlossen ausschließlich gegeneinander. Mit geöffneten Fenstern erschienen so auch die innenliegenden Klassen wie Freiluftklassenzimmer.

Der Architekt Komter führte in den 1950er-Jahren ein feststehendes unteres Fensterband ein und darüberliegende horizontalgesprossete Öffnungsflügel mit beidseitig feststehenden Rahmenelementen. Die Fenster drehen sich vertikal auf einem Drittel. Auch diese Fensterkonstruktion ist filigran. Erst bei Blick auf den Originalzustand wird man der Möglichkeit gewahr, dass es noch unsichtbarer geht.

Bei der Sanierung 2010 standen die Architekten vor der Frage, die komterschen Fenster zu erhalten und energetisch aufzurüsten, neue Fenster nach aktuellen energetischen Standards bauen zu lassen oder einen Nachbau der duikerschen Originalfenster zu wagen. Letzteres wurde versucht, jedoch mit dem Ergebnis, dass die großen Scheiben auch mit heutigen Baumethoden für die Schlankheit und Konstruktion der Rahmen zu schwer waren. Sie waren manuell nicht zu bedienen, erst recht nicht mit einer Zweifachverglasung. Letztendlich entschieden sich die Architekten für die Weiterverwendung der Fenster von Auke Komter. Sie ersetzen jedoch die Einfach- durch eine Doppelverglasung.

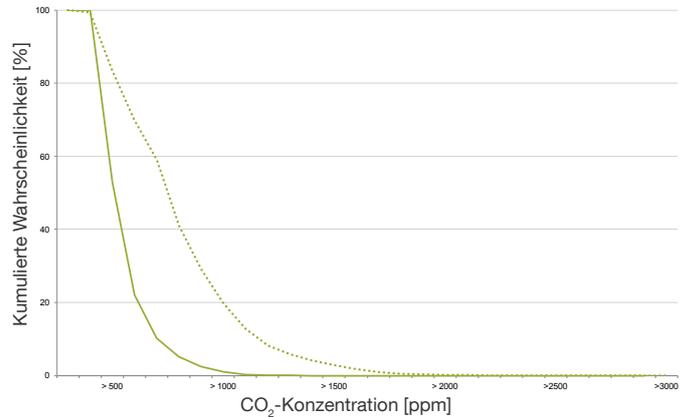


Abb. 23: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Amsterdam

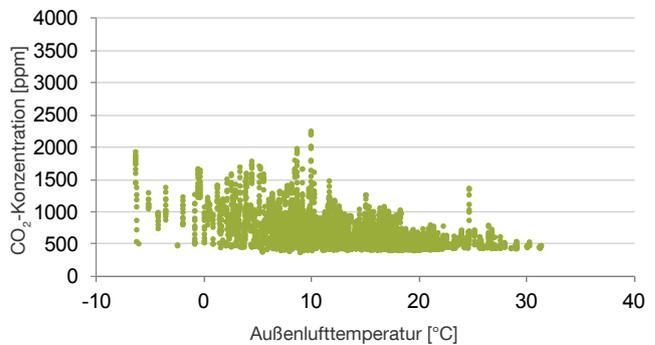


Abb. 24: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Amsterdam

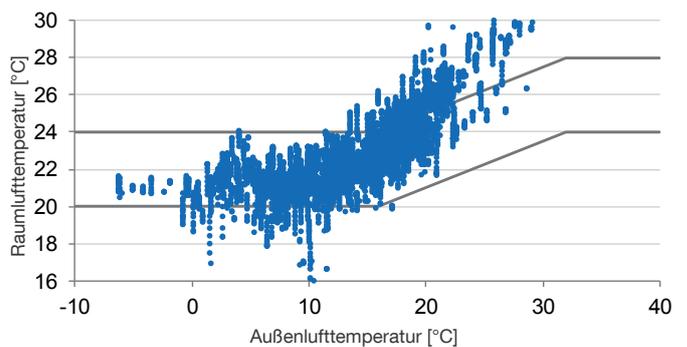


Abb. 25: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Amsterdam

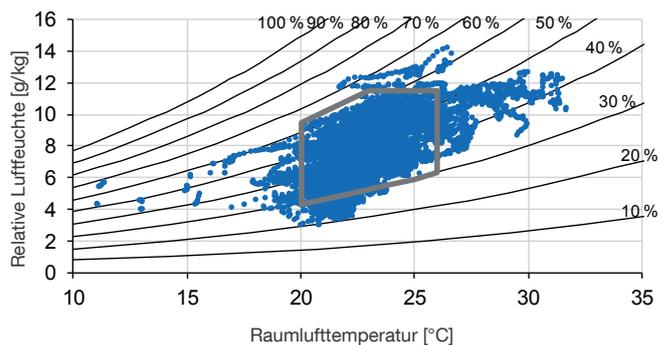


Abb. 26: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Amsterdam

Bei der Sanierung 2010 mussten vornehmlich organisatorische und energetische Probleme gelöst werden. Die Grundstruktur des Hauses, das Stahlbetongerüst, war noch in sehr gutem Zustand.

Bei vielen anderen untersuchten Schulen in diesem Projekt bildet die Dämmung den intensivsten Eingriff der Sanierung. An der Openluchtschool wurde nahezu gänzlich darauf verzichtet. Auch bei anderen Entscheidungen sprach das Team aus Bauherren und Architekten den denkmalpflegerischen Argumenten mehr Gewicht zu als den energetischen. Mit den neuen Stoffstores und Vorhängen haben sie sich beispielsweise erneut für einen innenliegenden Sonnenschutz entschieden. Die Kombination aus dem innenliegenden Sonnenschutz und den großen, in alle Richtungen orientierten Fenstern bringt ein großes Überhitzungsrisiko der Räume mit sich – nicht nur im Sommer. Aus diesem Grund haben sich die Planer für den Einsatz einer Klimaanlage entschieden. In der Datenauswertung der untersuchten Räume sieht man dennoch, dass sich schon bei Außentemperaturen um die 20 °C die Innenraumtemperaturen jenseits der 28 °C-Grenze bewegen können. Insgesamt beträgt der Anteil der Messdaten, die über dem empfohlenen Komfortbereich liegen, knapp über 20 %. Im Vergleich zu den anderen sanierten Schulen, deren Gebäudehüllen mit Wärmedämmung versehen wurden, zeigt sich hier auch sehr deutlich eine Temperaturschwankung während des Tages: bei hohen, noch mehr aber bei niedrigen Außentemperaturen.

Obwohl seine Schulen heute in haustechnischer Hinsicht veraltet sind, war Jan Duiker zu seiner Zeit ein Pionier bezüglich Haustechnik. Er bemängelte die schlechte Luft und den ungenügenden Tageslichteinfall in den Klassenräumen normaler Schulen. Duiker appellierte an die Verantwortlichen, für ein gutes Raumklima an den Schulen zu sorgen. In Zusammenarbeit mit dem Ingenieur Jan Jacobus de Ridder entwickelte er eine in den Beton integrierte Fußbodenheizung, beheizte Garderoben und eine Warmluftheizung, die er patentieren ließ. Jan Duiker entwarf Details, die das Haustechnikkonzept mit funktionalen und ästhetischen Elementen verknüpfte. So sind beispielsweise die Kleiderstangen zum Aufhängen der Kinderjacken elegant aus Heizungsrohr geformt und sorgten für stetig warme und trockene Jacken der Kinder.

Bereits in den 1930er-Jahren lies Duiker also Heizrohre in die Schalung einlegen und betonierte diese mit ein. Seine Idee, die Freiluftklassenzimmer mittels Bodenheizung zu beheizen, war damals äußerst fortschrittlich – auch wenn sie heute als Energieverschwendung gelten würde. So konnte der Unterricht möglichst lange im Jahr im Freien stattfinden. Die sanierenden Architekten erzählen die Geschichte, dass diese Heizung lediglich wenige Tage in Be-

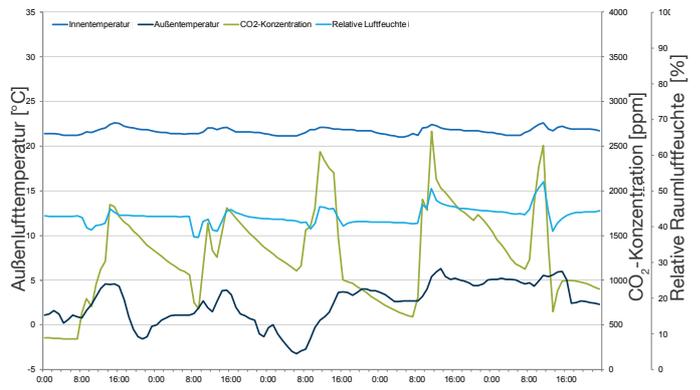


Abb. 27: Kalte repräsentative Woche (07.11.-11.11.2016), Amsterdam

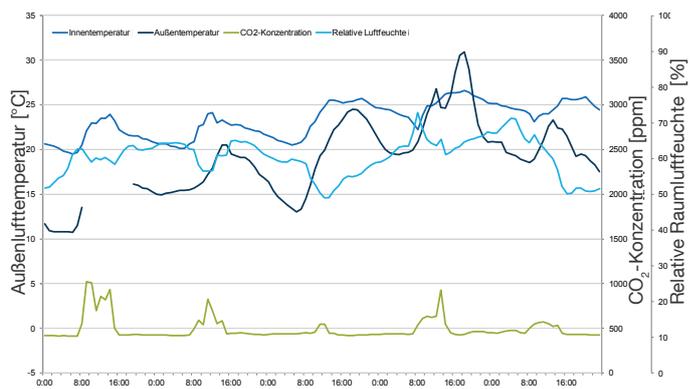


Abb. 28: Warme repräsentative Woche (20.06.-24.06.2016), Amsterdam

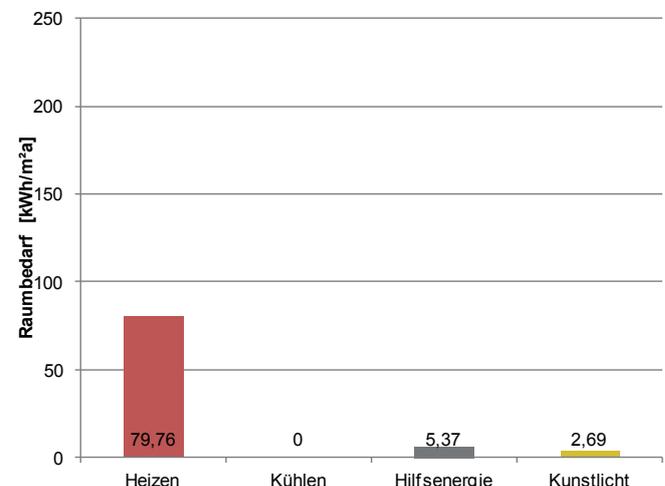


Abb. 29: spez. Raumbedarf, Amsterdam

trieb war: Das Wasser wurde für eine Weile abgelassen und die Rohre rosteten im Inneren. Nach erneuter Inbetriebnahme verstopften sie schließlich und seither konnte die Fußbodenheizung nicht mehr in Betrieb genommen werden. Stattdessen wurden die Klassenzimmer mit Heizkörpern an den Brüstungsinne-seiten ausgestattet. Wegen der hohen Transmissionswärmeverluste der dünnen, ungedämmten Gebäudehülle ist es fraglich, ob die systembedingt begrenzte Heizleistung der Fußbodenheizung ausgereicht hätte, die Räume auf ein behagliches Temperaturniveau zu beheizen, ohne dass die Fußbodentemperatur ein unangenehmes Niveau erreicht. Auch den Kaltluftabfall an den Fenstern hätte dieses System nicht verhindert.

Weil die thermische Qualität der Hülle auch nach der letzten Sanierung sehr begrenzt ist, wurden die bestehenden Heizkörper durch neue Flachheizkörper ersetzt. Die dafür benötigte Wärme und die Wärme für das Warmwasser in den Sanitärbereichen wird von zwei Gasbrennwertkesseln im Keller erzeugt.

Um eine gute Luftqualität auch dann gewährleisten zu können, wenn die Außentemperatur zu niedrig ist, um die Fenster ohne Komforteinbußen zu öffnen, entschieden sich die Planer, eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung einzubauen. Eine Weile suchte das Planungsteam nach einem geeigneten Aufstellort – letztendlich fiel die Wahl auf die einst legendäre Dachterrasse. Hier wird die frische Luft angesaugt und mit der Wärme der Abluft vorerwärmt, bevor sie über eine Teilklimaanlage je nach Bedarf weiter beheizt bzw. gekühlt werden kann und in den bestehenden Schächten links und rechts der Treppen vertikal zu den jeweiligen Räumen verteilt wird. In den kleinen Abstellkammern der Klassenzimmer erfolgt nochmals eine individuelle Vorwärmung der Zuluft, die mittels eines Touchpads geregelt werden kann. Von dort aus führen die Leitungen sichtbar oberhalb der Tafel bzw. des elektrischen Whiteboards in den Raum und verteilen die Zuluft mittels Mischlüftung. Über die Klassentür wird die verbrauchte Luft in das Treppenhaus entlassen, wo sie durch thermischen Auftrieb ins Dachgeschoss steigt und abschließend wieder von der Lüftungsanlage angesaugt wird.

Bei der Datenauswertung zeigt sich, dass die Lüftungsanlage für eine gute Luftqualität sorgt: Während der Nutzungszeit liegt die CO₂-Konzentration bei Außentemperaturen unter 12 °C nur in 4,1 % der Fälle über 1.400 ppm.



Abb. 30: Klassenraum in Amsterdam

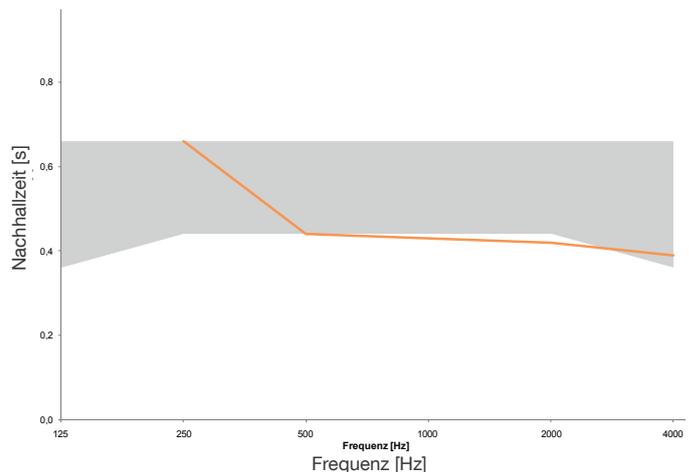


Abb. 31: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Amsterdam

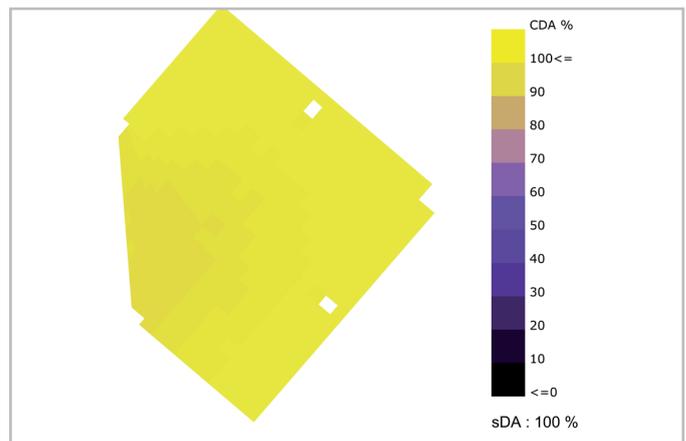


Abb. 32: Continous Daylight Autonomy (cDA), Amsterdam

4.2.3. Schulanlage Wandermatte, Köniz-Wabern bei Bern



Im Gegensatz zu vielen anderen Schulen unserer Betrachtung war der Anlass zu dieser Sanierung die Umwandlung der Schule in Basisstufenklassen und nicht primär der mangelhafte Bauzustand oder nicht erfüllte Regularien. Die Grundsubstanz des Bestandsbaus war gut, aber in die Jahre gekommen. Es gab keine schwerwiegenden Bauschäden. Das heißt, dass die Sanierung auf baulich-konstruktiver Ebene wesentlich früher stattfand als bei vielen anderen Schulen und somit zu einem Zeitpunkt, an dem Materialien und Konstruktionen noch nicht in desolaten Zustand geraten waren.

Emil Meyer und Fritz von Niederhäusern ließen den Klassentrakt in den 1950er-Jahren als Stahlbetonskelettbau errichten. Während die beiden Giebelseiten und die Rückfassade mit einschaligem Mauerwerk ausgemauert und verputzt sind, kommt der Frontfassade eine Sonderstellung zu. Reliefartige Fertigbetonteile bis auf Brüstungshöhe kreieren ein interessantes Schattenspiel. Großzügige deckenhohe Fensterbänder füllen den jeweils darüberliegenden Teil der Geschosse aus. Jedes Fensterband ist in vier nahezu quadratische Fensterformate unterteilt, die wiederum durch eine jeweils auf einem Drittel liegende horizontale und eine vertikale Sprosse in unterschiedlich große Öffnungsformate unterteilt werden. In hellem Rosa gehaltene, außenliegende Stoffstores orientieren sich am Bestand – sie sind ein Klassiker im Schulhausbau in der Schweiz. Der Sonnenschutz ist zugleich ästhetisch prägender Bestandteil der Fassade. Die zwischenzeitlich eingebauten Rafflamellenstores wurden ersetzt. Die pro Fensterband durchgehenden roten Sturzblenden bilden mit dem roten Dachrand der Pausenhalle eine Einheit.

Eine weitere Ausnahme in der Fassade bildet das rückwärtige Treppenhaus. Statt der äußeren Putzschicht ent-

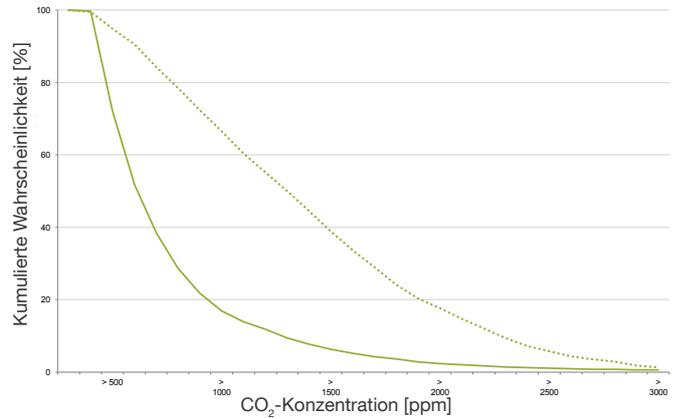


Abb. 33: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Köniz-Wabern

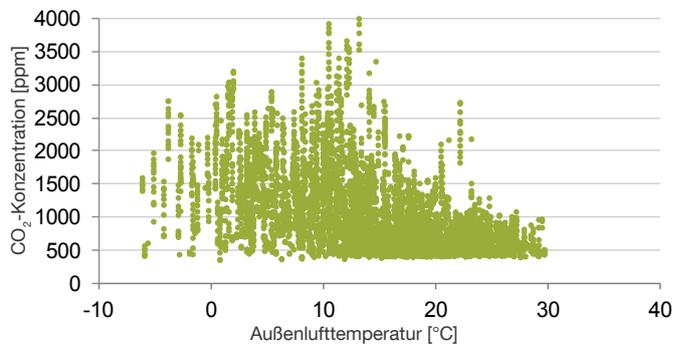


Abb. 34: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Köniz-Wabern

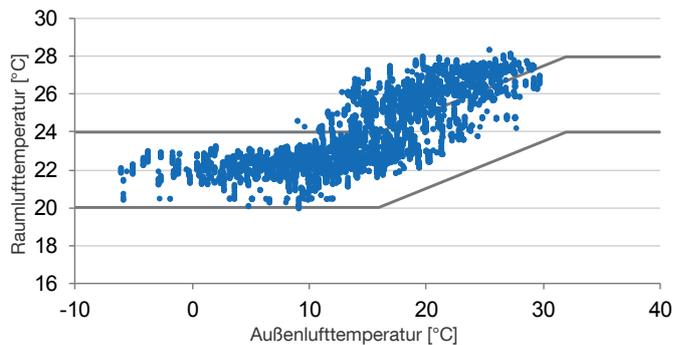


Abb. 35: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Köniz-Wabern

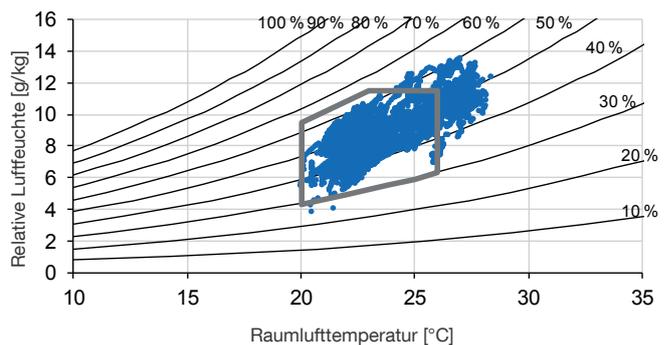


Abb. 36: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Köniz-Wabern

schieden sich die Architekten der 1950er-Jahre hier für Sichtmauerwerk.

Im Zuge der Sanierung 2015 mussten sämtliche Putz- und Sichtmauerwerksflächen lediglich gereinigt werden. Selbst die Betonsanierer hatten bei den Brüstungselementen nicht viel zu tun und mussten diese nur reinigen und mit neuer Schlämme versehen.

Während der Neubau mit dem Minergie-P-Label zertifiziert ist, können die Maßnahmen für eine energetische Aufwertung des Bestands als sehr behutsam bezeichnet werden. Der Minergie-Standard ist in der Schweiz das wichtigste Label für energieeffiziente Gebäude. Der Minergie-P-Standard wurde 2003 eingeführt und ist eine Steigerung des ersteren. Gut gedämmte und luftdichte Gebäudehüllen und der Einsatz von erneuerbaren Energien sind die zentralen Anforderungen. Die Grundprinzipien für ein Minergie-P-Haus und ein nach deutschem Standard gebautes Passivhaus sind sehr ähnlich, wenn auch der Weg zum Zertifikat sich unterscheidet. Minergie versucht nur die Ziele vorzugeben, dem Planer den Weg dazu aber offen zu lassen.

Die größte energetische Maßnahme am Bestandsbau der Schulanlage stellt die Ertüchtigung der Fenster dar. Die Fensterrestauratoren ersetzen bei den bestehenden Verbundfenstern die äußere Scheibe durch eine energetisch verbesserte Zweifach-Isolierverglasung. Sämtliche Blend- und Flügelrahmen wurden lediglich repariert und alle Beschläge erhalten. Außenliegende Brüstungsstangen aus einem unauffälligen Stahlprofil gewährleisten die Einhaltung der heutigen Anforderungen für Absturzsicherungen.

Bis auf die Dämmung der Außenwand gegen das Erdreich im ausgebauten Souterrain der Schule entschied sich das Planungsteam gegen weitere Dämmmaßnahmen. Selbst bei den nur 180 mm starken Brüstungselementen beließ man es bei den bauzeitlichen 40 mm Korkinnendämmung. Ursprünglich waren weitere Maßnahmen vorgesehen, die aus wirtschaftlichen Gründen und Überlegungen zur Verhältnismäßigkeit dann aber nicht ausgeführt wurden.

Größte konstruktive Eingriffe in den Bestandsbau verursachte die Entscheidung, das zuvor nur als Lager genutzte Untergeschoss auch für die Lehre nutzbar zu machen. Entlang der Fassade zum Schulhof wurden gut 1,5 m abgegraben und Fensteröffnungen gesägt, in welche neue Holzfenster mit Dreifachverglasung eingesetzt wurden. Neben diesen Umbaumaßnahmen bildet das Dach das einzige völlig neue Element der Außenhaut. Vom Straßenraum aus ist es kaum sichtbar. Die bestehenden Sparren deckte man mit einer neuen Schicht aus

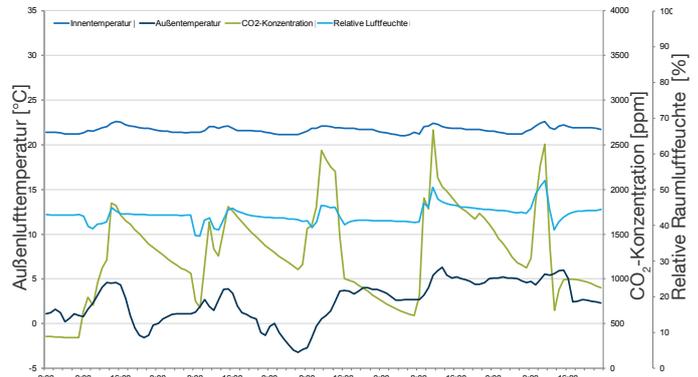


Abb. 37: Kalte repräsentative Woche (07.11.-11.11.2016), Köniz-Wabern

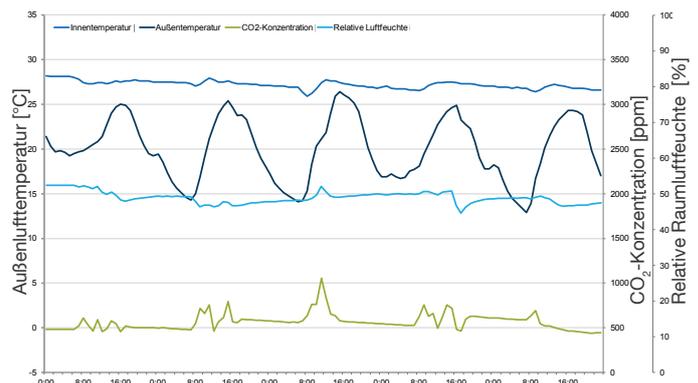


Abb. 38: Warme repräsentative Woche (29.08.-02.09.2016), Köniz-Wabern

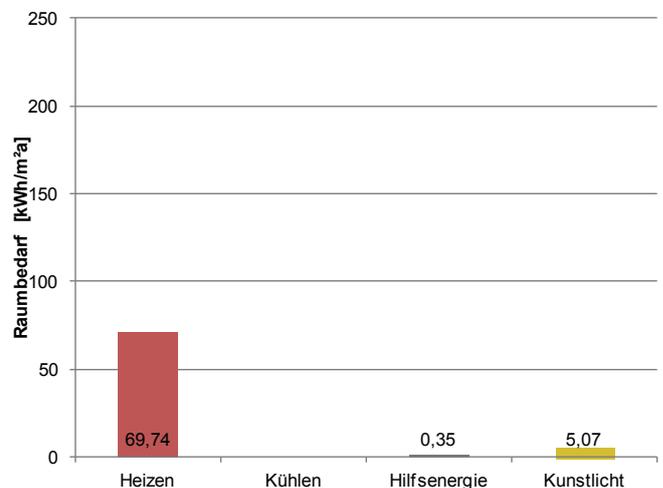


Abb. 39: spez. Raumbedarf, Köniz-Wabern

Weichfaserplatten, Dachlattung und dem Bestand nahekommenden Flachpfannenziegeln. Auf der Südost- und somit der dem Schulhof zugewandten Seite verlegte man statt der Dachziegel vollflächig integrierte Photovoltaikmodule.

Das Technikkonzept der Klassenräume ist schnell erklärt, weil die Schule mit sehr wenigen technischen Anlagen und Systemen auskommt. Für den Heizfall sind in den Klassenzimmern Radiatoren unter den Fenstern angebracht, die über die Thermostatventile individuell von den Lehrern oder dem Hausmeister geregelt werden. Während der Heizperiode zeigen die durchgeführten Messungen, dass es keine Probleme mit einer Unterschreitung der Solltemperatur gibt, auch nicht zu Unterrichtsbeginn. Die Wärmeerzeugung erfolgt für die gesamte Schulanlage inklusive Kindergärten mit einer neuen Holzpelletanlage. Es gibt in den Klassenzimmern weder eine Kühlung noch eine mechanische Lüftung. Die Fenster werden händisch von den Schülern und Lehrern geöffnet. Lediglich in den Toiletten ist eine mechanische Abluftanlage eingebaut. Obwohl die Schule eine Südost-Orientierung aufweist und dementsprechend in den Sommermonaten mit großen solaren Lasten umgehen muss, wurde auf eine maschinelle Kühlung verzichtet. Dabei zeigen die Messwerte, dass schon bei Außentemperaturen ab 15°C deutlich erhöhte Innentemperaturen auftreten. In der Grafik des Wochenverlaufs einer exemplarischen Woche im Sommer erkennt man, dass auch nachts die Temperatur nicht unter 25 °C sinkt, woraus zu schließen ist, dass die Fenster nachts nicht zur Auskühlung der Klassenräume geöffnet wurden. In der warmen Jahreszeit ist tagsüber die CO₂-Konzentration in den Klassenräumen konstant niedrig, was auf einen guten Umgang mit der natürlichen Lüftung schließen lässt. Auch die Feuchtigkeitswerte liegen durchwegs über den empfohlenen 30 % rel. Luftfeuchte. Allerdings zeigt sich auch in dieser Schule die Problematik der Luftqualität im Winter, weil die Fenster an kalten Tagen nicht zum Lüften geöffnet werden. So liegt bei Außentemperaturen unter 12 °C die CO₂-Konzentration in fast 45 % der Fälle über einem Wert von 1.400 ppm und steigt vereinzelt sogar auf fast 4.000 ppm. In der Verlaufsgrafik der kalten Woche sieht man außerdem, dass zwischen den Unterrichtsstunden kaum mit Stoßlüftung gearbeitet wird.

Da das Treppenhaus offen mit den Fluren verbunden ist, mussten aus Brandschutzgründen die Türen zwischen Klassenräumen und Flur komplett abgedichtet werden. So ist nun leider eine Querlüftung – trotz einhüftig angeordneter Klassenräume – nicht möglich.



Abb. 40: Klassenraum in Köniz-Wabern

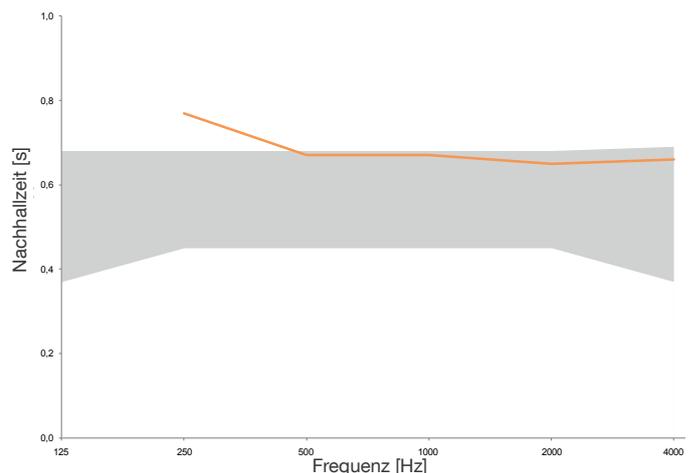


Abb. 41: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Köniz-Wabern

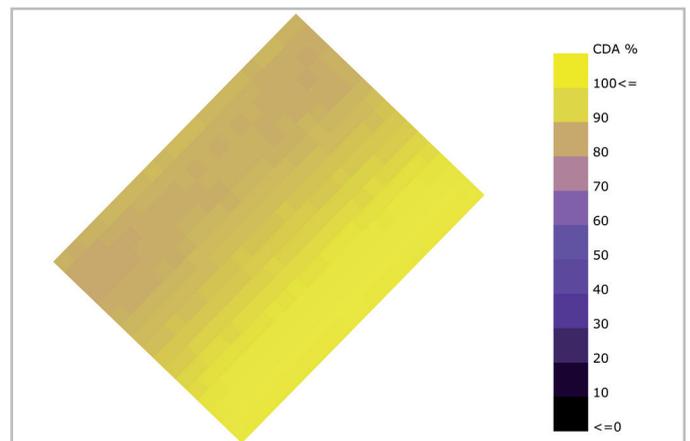


Abb. 42: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Köniz-Wabern

4.2.4. Gymnasium Sonthofen



Die Konstruktion wurde auf das Traggerüst zurückgebaut. Die Fluchtbalkone wurden zugunsten einer besseren Tageslichtausnutzung und einer wärmebrückenfreien Konstruktion zurückgebaut. So erreicht das untersuchte Klassenzimmer in der Tageslichtsimulation nun einen cDA-Wert von sehr guten 100 %. Statische Ertüchtigungen des Bestands wurden z. B. für den vergrößerten Luftraum der Eingangshalle notwendig, hier stützt ein brüstungshoher Fachwerkträger die Balkone im großen Luftraum. Alle anderen bestehenden Decken konnten nach durchgeführten Tests ohne Verstärkungen weiterverwendet werden. Die Aufstockung der Fachklassen erfolgte mit Leichtbauwänden aus Holz, Holzstapeldecken und zusätzlichen Verstärkungen durch Stahlkonstruktionen, um weiter auf die bestehenden Fundamente ablasten zu können. Völlig neue Anbauten, wie die Fluchttreppenhäuser, wurden in Ortbeton erstellt.

Der Sichtbeton der Originalbauteile wurde zugunsten einer Homogenisierung der Materialien aufgegeben: Die Sichtbetonoberflächen wurden gestrichen, genauso wie Trockenbauwände und Stahlbauteile. Auch das dem Systembau immanente orthogonale System wurde teilweise durch Schrägstellung von neuen Wänden gebrochen, was in Trockenbau- und Ortbetonbauweise möglich ist, der Systembaukasten aber nicht zuließ. Alle sanierten Gebäudeteile erhielten eine neue, einheitliche Verkleidung. Die Fassade sieht nun komplett anders aus, sodass es sich auf den ersten Blick um einen Neubau zu handeln scheint. Hier wurde auf die Verwendung von ökologischen Materialien Wert gelegt. Die Betonfertigteilkonstruktion wurde mit einer 20 cm starken Cellulose-Dämmung (WLG 045) thermisch ertüchtigt und mit einer hinterlüfteten Bretterschalung verkleidet. Nahezu bündig mit der Bretterschalung liegen die Holz-Aluminium-Verbundfenster. Um einer Überhitzung der Klassenzimmer durch so-

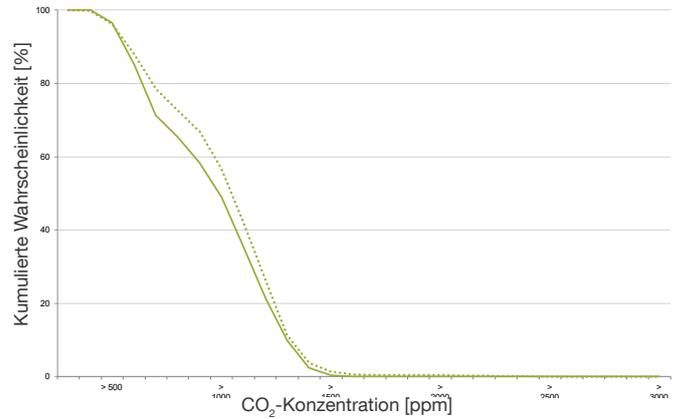


Abb. 43: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Sonthofen

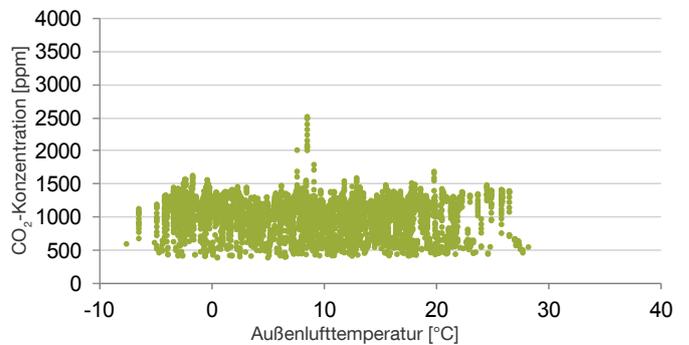


Abb. 44: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Sonthofen

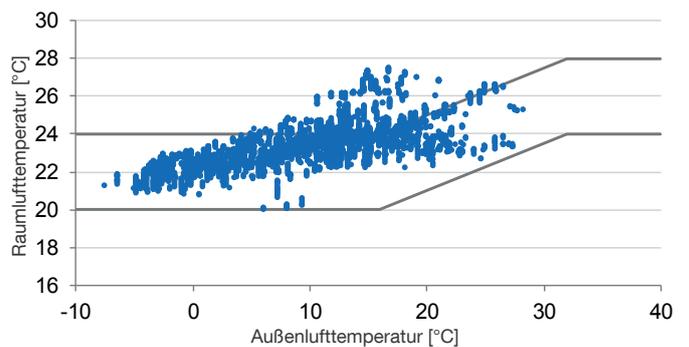


Abb. 45: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Sonthofen

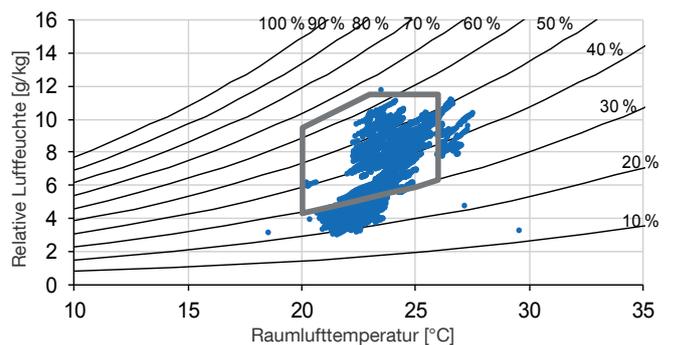


Abb. 46: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Sonthofen

lare Einträge vorzubeugen, ist der elektrische Sonnenschutz nun integriert und wettergeschützt zwischen der Zweischeibenisolierverglasung und einer zusätzlichen Scheibe angeordnet. Zu Reinigungs- und Wartungszwecken kann die vorgesetzte Scheibe geöffnet werden und bietet somit einfachen Zugang zu den Lamellen. Häufig wird von den Schülern und Lehrern aber beklagt, dass der Sonnenschutz leicht kaputtgeht und dann auch lange nicht repariert wird. Heruntergefahren drehen sich die Lamellen je nach Sonnenstand um 90 Grad und leiten somit Tageslicht in den Raum und erlauben den Ausblick in den Außenraum. Bei der Nutzerbefragung kam aber häufig der Kritikpunkt, dass die Lamellen den Raum eben nicht komplett verdunkeln und oft Spiegelungen das Lesen auf den Whiteboards erschweren. Zusätzliche feststehende Lamellenelemente garantieren in kleinen Teilbereichen den Sonnenschutz bei geöffnetem Fenster, mindern allerdings den Tageslichteintrag bei bewölktem Himmel. Dennoch bewertet die Mehrheit der Befragten den visuellen Komfort mit sehr gut bis gut. Opake gelbe Paneele geleiten die außenliegenden Regenfallrohre über die Fensterbänder. Brüstungen und Stürze zwischen den Betondecken bestehen aus Holztafeln. Das Dach wurde als rollnahtgeschweißtes Edeldach ausgebaut.

Im Zuge der Modernisierung erfolgte auch der komplette Austausch der Anlagentechnik, bestehende Trassenwege konnten aber für die neue Anlagentechnik wiederverwendet werden. Ein nachgeschaltetes zweijähriges Monitoring überwachte die Funktionsweise der Anlagentechnik, so konnten Fehlerquellen kontinuierlich nachjustiert werden. Die Wärme wird nun von drei verschiedenen Systemen erzeugt, weil jeder Gebäudeteil andere Anforderungen stellt. Die beiden sanierten Gebäudeteile benötigen durch die reduzierte Heizlast und das neue Übergabesystem niedrigere Vorlauftemperaturen. Als Wärmequelle wird hierfür Grundwasser genutzt, das mit einer Wärmepumpe mit 70 kW Leistung auf das erforderliche Temperaturniveau von 35 °C gebracht wird. Die unsanierten Gebäudeteile benötigen weiterhin Hochtemperaturwärme. Ein erdgasbetriebenes Blockheizkraftwerk (BHKW) mit 50 kW elektrischer Leistung erzeugt neben Strom, der u. a. die Wärmepumpe betreibt, als Abfallprodukt Wärme mit 80 kW thermischer Leistung. Damit heizt es die Sporthalle und das Jugendhaus bzw. versorgt die Schule, wenn die Leistung der Wärmepumpe nicht ausreicht. Das BHKW läuft nur, wenn sowohl die Wärme abgenommen werden kann als auch der produzierte Strom zu einem möglichst hohen Anteil selbst verwendet wird. Bei Spitzenlasten, wenn durch sehr kalte Außentemperaturen sehr viel Heizwärmebedarf anliegt, werden die beiden Systeme durch einen Gasbrennwertkessel ergänzt.

Durch den Grundwasserbrunnen besteht die Möglichkeit, das kühle Wasser bei zu hohen Innenraumtemperaturen

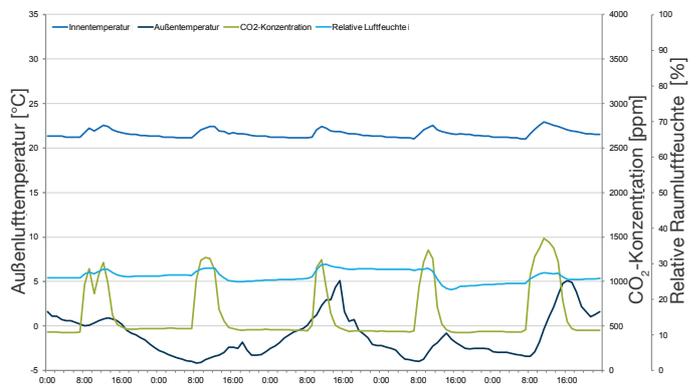


Abb. 47: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Sonthofen

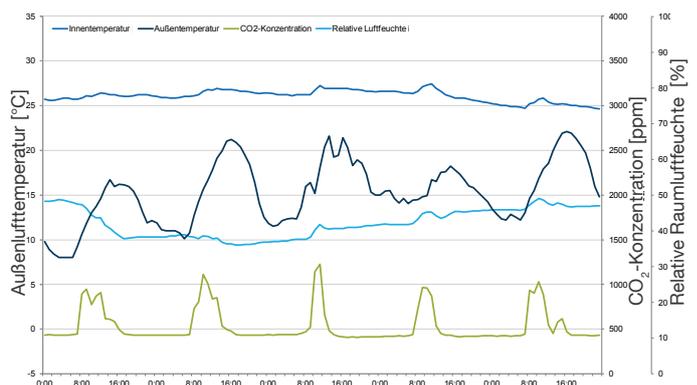


Abb. 48: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Sonthofen

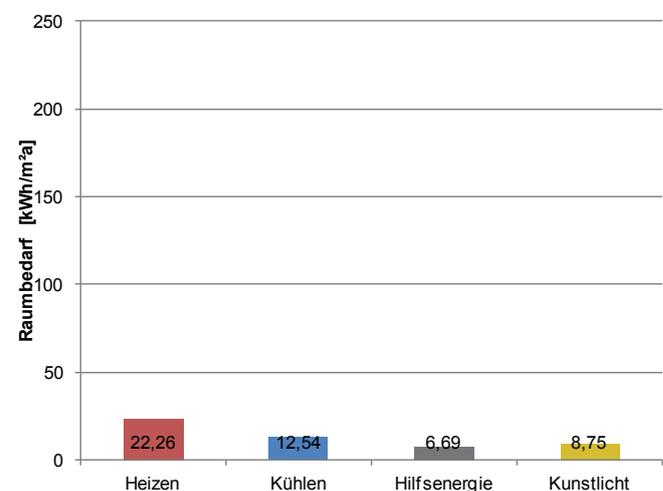


Abb. 49: spez. Raumbedarf, Sonthofen

auch zum Kühlen zu verwenden. Die Wärmeübertragung in den Klassenzimmern erfolgt sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen über Deckenstrahlplatten, die direkt in die abgehängten Akustikdecken integriert sind.

In den Fachklassenzimmern kommen statt der Deckenstrahlplatten teilweise auch Wandstrahlplatten zum Einsatz. Die Messergebnisse zeigen, dass sich die Raumlufttemperaturen häufig im Behaglichkeitsbereich befinden, allerdings lässt sich die Tendenz erkennen, dass bei Außentemperaturen ab 10 °C etwas zu hohe Raumlufttemperaturen vorherrschen. Wegen des bis zu den Sommerferien sehr gemäßigten Sommers im Messzeitraum gab es nur wenige Nutzungsstunden, in denen höhere Außentemperaturen als 25 °C vorherrschten. In diesem Temperaturbereich sieht man, dass die Raumlufttemperaturen nicht weiter als bis 27 °C ansteigen. Die Ergebnisse aus der Nutzerbefragung hierzu sind hingegen recht eindeutig: 60 % beurteilen die Innenraumtemperatur im Sommer von ausreichend bis ungenügend, weil es in den Räumen oft zu heiß wird. Im Winter wird die Innenraumtemperatur deutlich besser und allgemein als angenehm bewertet, drei Viertel der Befragten geben die Note sehr gut bis gut. Um einen ausreichenden Luftwechsel zu gewährleisten und die CO₂-Konzentration zu regulieren, wurde auch die alte Lüftungsanlage ersetzt. Insgesamt gibt es drei Lüftungsgeräte: eins im Fachklassengebäude und zwei im Haupthaus. Die neue Lüftungsanlage, die als Quelllüftung ausgelegt ist, bringt die Zuluft unterhalb der Decke mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten in den Raum. Die Leitungsführung ist in den Klassenzimmern in der abgehängten Decke integriert, im Fachklassentrakt sind die Leitungsführungen zumindest im oberen Geschoss offen im Raum sichtbar. Die Lüftungsanlage ist sowohl CO₂- als auch temperaturgesteuert. Zusätzlich zu den Deckenstrahlplatten wird die Zuluft der Lüftungsanlage vorkonditioniert und je nach Anforderungen beheizt oder gekühlt. Neben einer Wärmerückgewinnung verfügt sie auch über eine Feuchterückgewinnung, die Möglichkeit des zusätzlichen Luftbefeuchtens gibt es nicht. Vor allem bei niedrigen Außenlufttemperaturen zeigen die ausgewerteten Daten, dass die relative Luftfeuchte besonders in der kalten Jahreszeit mit 20 bis 30 % kontinuierlich unter dem empfohlenen Wert von 30 % liegt, jedoch aufgrund der Feuchterückgewinnung 20 % nicht unterschreitet. Fast ausschließlich wegen zu geringer Luftfeuchte im Winter liegen deshalb nur 62 % der Nutzungszeit im definierten Komfortbereich. Hinsichtlich der CO₂-Konzentration wiederum liefert die Lüftungsanlage erwartungsgemäß gute Werte: So liegt ein ppm-Wert von über 1.400 in 3,7 % der Nutzungszeit vor. Dennoch geben fast 50 % der Befragten der Luftqualität nur die Note befriedigend. Oft wird die Aussage getätigt, die Luft sei stickig, vor allem in den Sommermonaten. Dann wird auch zusätzlich über die Fenster gelüftet.



Abb. 50: Klassenraum in Sonthofen

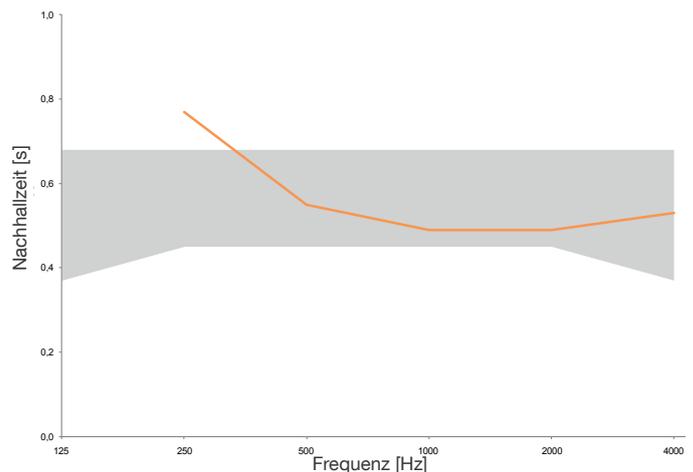


Abb. 51: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Sonthofen

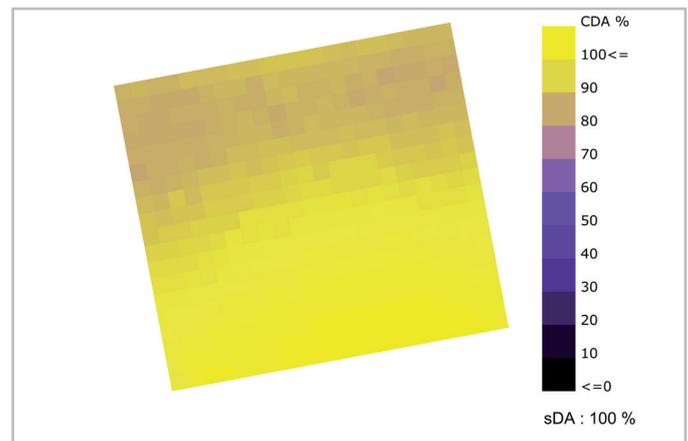


Abb. 52: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Sonthofen

4.2.5. Mittelschule Buchloe



Die ursprüngliche Bauweise ist typisch für Schulen aus den 1970er-Jahren, gerastert und effizient mit Stützen, Trägern und Decken aus Stahlbeton. Fluchtbalkone wurden vorgehängt und die Flachdächer bekieselt. Die innere Aufteilung erfolgte durch nicht tragende Leichtbauwände. Großformatige Fensterelemente hatten keine zusätzliche Beschattung und im Inneren blieb der Beton größtenteils sichtbar.

Es ist eine ehrliche Bauweise ihrer Zeit, doch aus heutiger Sicht ist sie höchst problematisch. Um den angestrebten Passivhausstandard zu erfüllen, wurde massiv in die Gebäudehülle eingegriffen. Die auskragenden Betonelemente wurden zurückgeschnitten und eine Holzkonstruktion mit insgesamt 30 cm Dämmung als neue Fassade vorgehängt. Den äußeren Abschluss der Fassade bildet eine umlaufende horizontal liegende Holzschalung aus sägerauen Lärchenbrettern.

Um den Alterungsprozess der Fassade gleichmäßig zu steuern, wurde die Holzschalung vorvergraut. Einen großen Anteil der Fassadenfläche nehmen die anthrazitfarbenen Holz-Aluminium-Fenster mit einer Dreifachverglasung ein. Gleichfarbige außenliegende und elektrisch betriebene Jalousien dienen der Beschattung. Ein Lehrer klagt, dass die Jalousien zu anfällig seien und bei zu starkem Wind automatisch hochführen. In der Eingangshalle und der Aula markiert der bestehende Boden aus beigem Naturstein den öffentlichen Bereich im Erdgeschoss. In ihrer ursprünglichen Planung wurde die Aula auch als Stadtsaal und für öffentliche Veranstaltungen gedacht. Wirklich stimmig ist der Materialmix der neuen mit den bestehenden Oberflächen nicht.

Abgehängte, quadratische Paneele rastern die Decken in den Gängen und Klassenräumen. Sämtliche Instal-

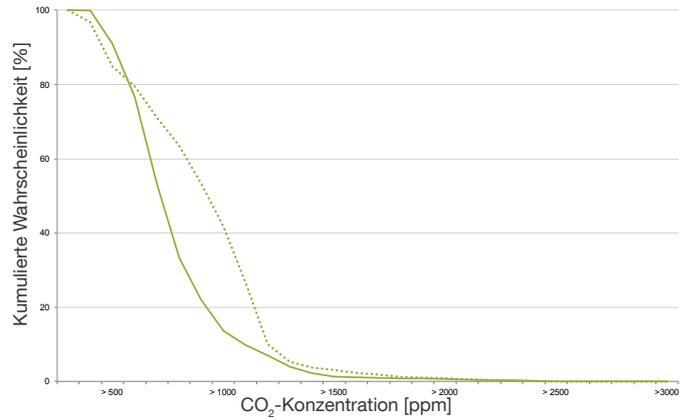


Abb. 53: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Buchloe

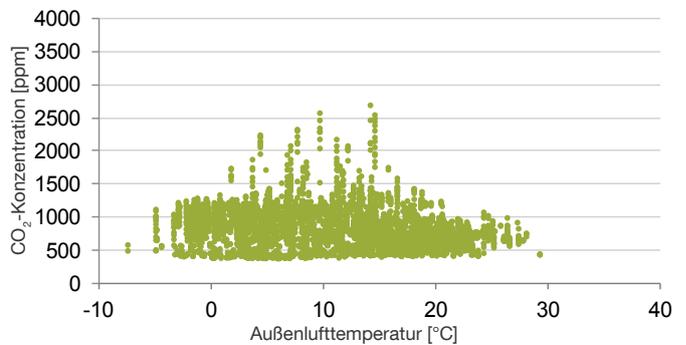


Abb. 54: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe

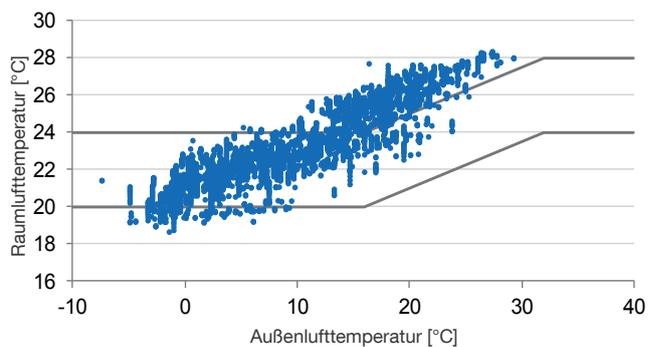


Abb. 55: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe

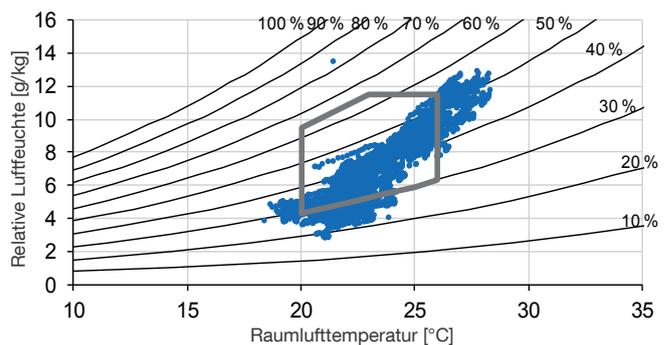


Abb. 56: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Buchloe

lationen sind hinter der Decke versteckt und passende quadratische Leuchten, zumindest im Flurbereich, sind direkt integriert. In den Klassenzimmern sind die Paneele gelocht und haben damit eine schallabsorbierende Wirkung. In Kombination mit den Gipskartonwänden, dem Teppichboden und der Einrichtung ist die Summe an schallabsorbierenden Flächen in den Klassenzimmern jedoch so groß, dass die gemessenen Nachhallzeiten, bis auf die Frequenz 125 Hz, deutlich zu kurz sind und es zu einer Überdämpfung kommt. Daraus resultiert, dass Worte verschluckt werden, je weiter man von der Schallquelle entfernt ist. Entgegen den Messwerten beurteilen die Schüler die Akustik in den Zimmern aber durchwegs als sehr gut oder gut.

Weil über die neue, stark gedämmte Gebäudehülle auf Passivhausstandard nur noch wenig Wärme verloren geht, wurde auch die Gebäudetechnik auf die veränderten Anforderungen umgestellt. Die Klassenzimmer verfügen über keine statischen Heizflächen mehr, lediglich die Lüftungsanlage beheizt die Unterrichtsräume. Die dafür benötigte Wärme stammt aus dem Wärmeverbund mit dem benachbarten Schwimmbad. Dort befindet sich ein gasbetriebenes Blockheizkraftwerk, das sowohl Wärme als auch Strom produziert.

Die zentrale Lüftungsanlage befindet sich im Technikraum des Dachgeschosses und verfügt sowohl über eine Wärme- als auch über eine Feuchterückgewinnung. Das von der Nahwärme versorgte Heizregister erwärmt die Zuluft bei Bedarf zusätzlich, wenn die Vorerwärmung durch die Wärmerückgewinnung nicht ausreicht. Vertikale Schächte im Bereich der Toiletten verteilen die Luft auf die unterschiedlichen Stockwerke. Die horizontale Verteilung der Zu- und Abluft zu den jeweiligen Räumen erfolgt in den abgehängten Decken der Flure. In den Zimmern ist der Zuluftkanal meist nicht mehr in der abgehängten Decke integriert, weil die bestehenden Unterzüge aus statischen Gründen nicht durchbohrt werden konnten. Stattdessen ist er im hinteren Teil des Raums sichtbar unter der Decke montiert, wo die frische Luft mittels Auslässen in den Raum gebracht wird. Die Abluft wird in Türnähe in der Wand zum Flurbereich abgesaugt und zur Lüftungszentrale zurückgeführt.

Die in jedem Raum installierten CO₂- und Temperaturfühler steuern die variable Volumenstromregelung und somit die benötigte Luftmenge raumweise. Laut Hausmeister ist die Steuerung der beiden Fühler teilweise problematisch: So kann es vorkommen, dass trotz zu kalter Innenraumtemperaturen die Lüftungsanlage die Raumluft nicht aufheizt, wenn der CO₂-Fühler gute Luftqualität meldet. Dennoch bewerteten bei der Nutzerbefragung über 80% den winterlichen Komfort mit sehr gut bzw. gut. Das größere Problem besteht im sommerlichen Verhalten. Das bestä-

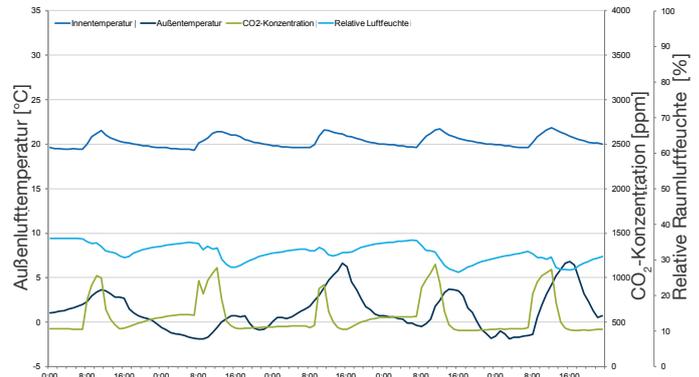


Abb. 57: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Buchloe

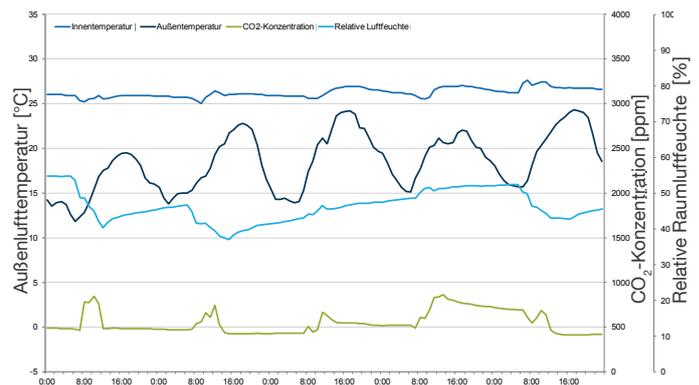


Abb. 58: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Buchloe

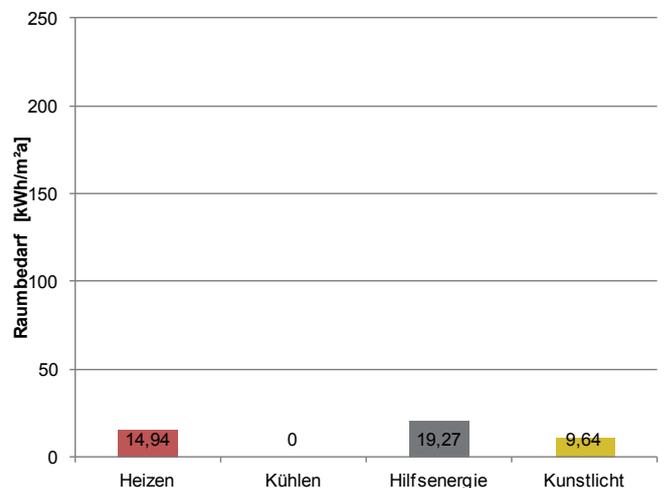


Abb. 59: spez. Raumbedarf, Buchloe

tigen sowohl die Messwerte als auch die Befragung: Ab Außentemperaturen von 15 °C erreichen die Innentemperaturen 26 °C, ab 20 °C Außentemperatur liegt der Großteil der Raumtemperaturen über dem Komfortbereich. Der außenliegende Sonnenschutz scheint das Überhitzungsproblem nicht alleine lösen zu können. Auch in der Befragung wird von deutlich zu hohen Temperaturen in den Klassenzimmern berichtet, die Hälfte aller Befragten gab dem sommerlichen Komfort die Noten 4 bis 6. Eine mögliche Nachtauskühlung über die Lüftungsanlage wird nicht betrieben, wegen der vielen schallabsorbierenden Oberflächen könnten die thermischen Speichermassen der Konstruktion aber ohnehin nur unzureichend genutzt werden. Zusätzlich gibt es viele Aussagen von Schülern, dass die Luft im Sommer stickig ist und schlecht riecht. Generell hinterlässt die Lüftungsanlage der Mittelschule Buchloe einen zwiespältigen Eindruck: Der Wert von 1.400 ppm wird nur in 3 % der Nutzungszeit überschritten und der Großteil der Befragten gab der Luftqualität die Noten 1 bis 3. Auf der anderen Seite klagen Lehrer über eine zu geringe Luftfeuchte im Winter, die Schüler bewerten die Luftfeuchte hingegen durchwegs als sehr gut und gut. Dass die Fenster trotz der Lüftungsanlage offenbar sind, wird positiv gesehen. Sie werden im Sommer wie auch im Winter von Lehrern und Schülern aufgemacht. Man lasse sich doch nicht von einer Lüftungsanlage dominieren.



Abb. 60: Klassenraum in Buchloe

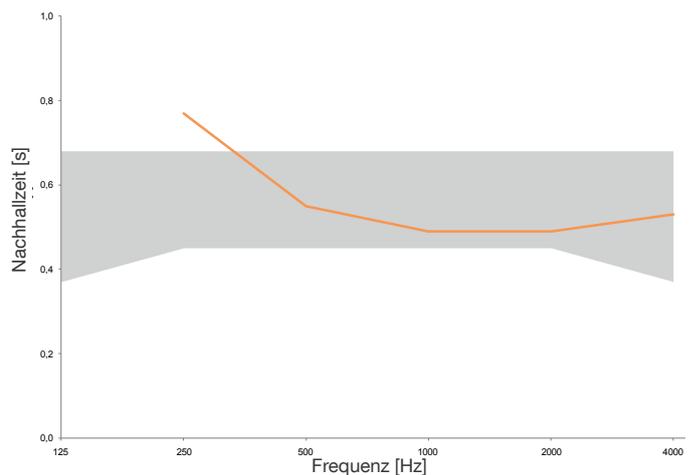


Abb. 61: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Buchloe

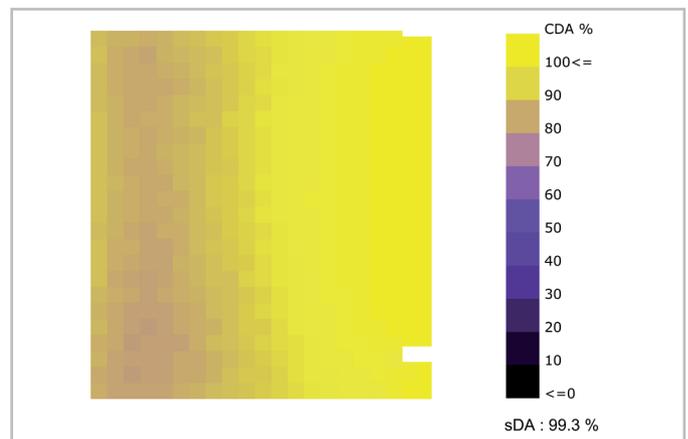


Abb. 62: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Buchloe

4.2.6. Gymnasium der Stadt Baesweiler



Die Sanierung einer solchen, vor der Novellierung der Wärmeschutzverordnung in den 1980er-Jahren entstandenen Schule und ihre Aufrüstung zum Passivhausstandard bedeuten zwangsläufig eine starke Veränderung der äußeren Hülle. Geforderte Dämmstandards, die Herstellung der erforderlichen Luftdichtigkeit und die Reduktion von Wärmebrücken sind mit einer gestalterisch unauffälligen Innendämmung nicht zu erreichen.

In den Bestandsbauten von 1978 füllten klar gegliederte und großzügige Fenster in horizontaler Ebene den gesamten Zwischenraum des Stahlbetonskeletts aus, wobei sich jedes einzelne Fenster in ein schmales Oberlicht und ein leicht liegendformatiges Fenster gliederte. Brüstungselemente aus Betonfertigteilen füllten den unteren Stützenszwischenraum einer jeden Etage aus.

Mit der Sanierung rückte die ästhetische Bedeutung der Konstruktion in den Hintergrund und die Übereinstimmung von Erscheinung und Konstruktion ging verloren. Die neuen Fensterformate haben nichts mit der Konstruktion zu tun, die sich in farbigen Stahlbetonstützen ausdrückt. Der unregelmäßige, verspielte Rhythmus der neuen Öffnungen stimmt nicht mehr mit der Regelmäßigkeit der alten Konstruktion überein. Die Intention der Architekten war es, hiermit die Baugeschichte und damit auch die unveränderte Tragstruktur der Schule nach außen ablesbar zu machen. Die farbigen Stahlbetonstützen tauchen nun ohne erkennbare Logik direkt hinter den Fensterscheiben auf. Die unterschiedlichen Farben und Formate der HLP-Platten erlauben den Ersatz von beschädigten Platten ohne farblichen Unterschied zur restlichen Fassade.

Da in vielen Bereichen die neue Gebäudehülle die alten Öffnungen überlappt, sank der Fensterflächenanteil teils deutlich: In den beiden untersuchten Klassenzimmern

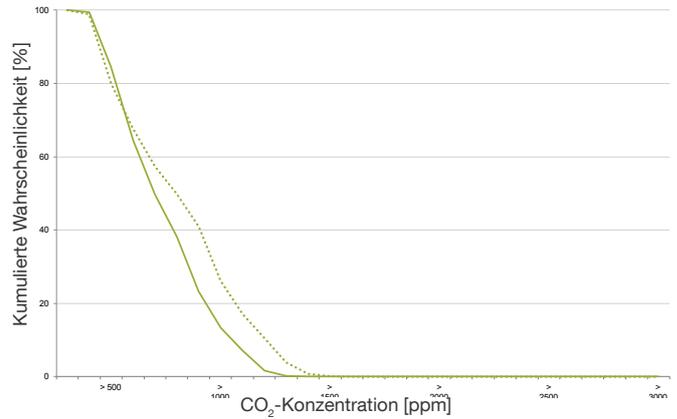


Abb. 63: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Baesweiler

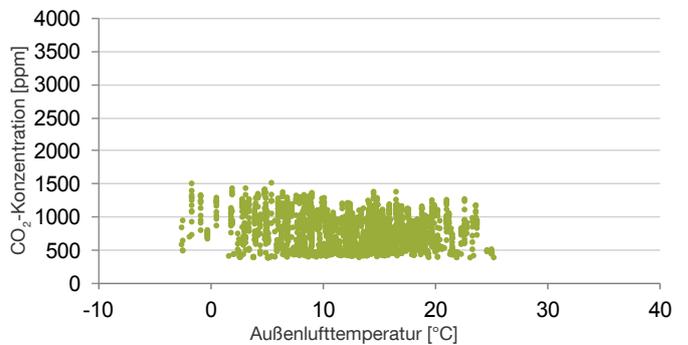


Abb. 64: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Baesweiler

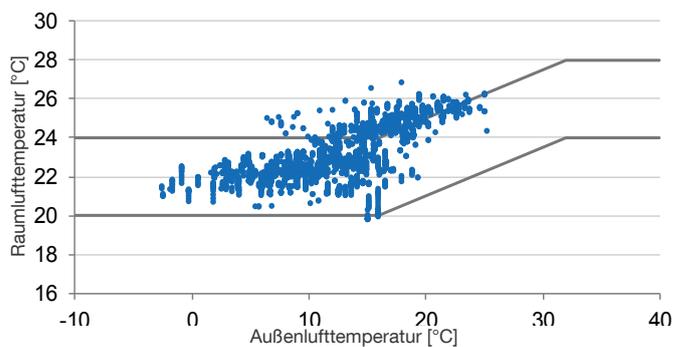


Abb. 65: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Baesweiler

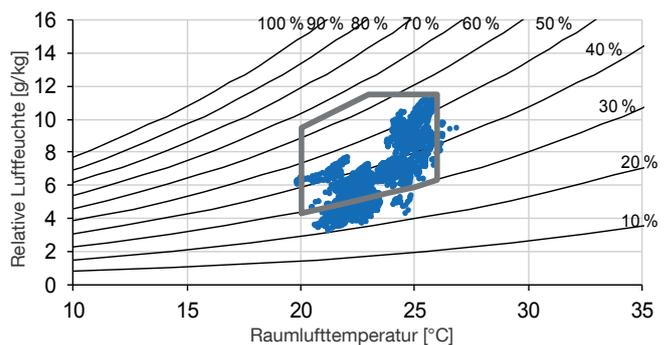


Abb. 66: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Baesweiler

sank er um 25 bzw. 44 %. Neben den Fenstern, jetzt dreifachverglaste Kunststofffenster mit Aluschale, wurden auch sämtliche Außentüren ausgetauscht. Da aufgrund der 45-Grad-Drehung zur Ost-West-Achse alle Räume von solaren Einträgen betroffen sind, besitzen alle Fenster einen Sonnenschutz in Form von außenliegenden, elektrisch gesteuerten Jalousien.

Während viele Materialien 2009 bis 2014 ausgetauscht werden mussten, war die Konstruktion noch in sehr gutem Zustand und musste kaum ertüchtigt werden. Bei der Sanierung mussten PCB- und asbesthaltige Baustoffe aus den Innenräumen entfernt werden. Holzverkleidungen und die Innendämmung in den Stützenzwischenräumen wurden ebenfalls herausgenommen.

Als materialintensivste Sanierungsmaßnahme kann ganz klar das Dämmen beschrieben werden. Die bereits zu einem früheren Zeitpunkt nachgerüsteten flach geneigten Aluminiumdächer wurden mit 36 cm Mineralwolle gedämmt. Sie sind nach der Sanierung vom Straßenraum aus nicht mehr zu sehen. Ebenso erhielten Kellerdecke und Bodenplatten eine neue Dämmschicht. Vor die Außenwände aus Mauerwerk und Beton setzten die Architekten eine Mineralwoll dämmschicht von 30 cm, welche mit einer Hinterlüftung von 2 cm und den grauen Fassadenpaneelen die Außenhaut bildet. Ein großes Problem trat auf, als man feststellte, dass die Betonfertigteile, an denen man teilweise die neue Fassadenbekleidung befestigen wollte, mit heutzutage unzulässig gewordenen Stahllankern mit der Stahlbetonkonstruktion verbunden waren. Mit hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand mussten diese durch Schwerlastverankerungen aus Edelstahl ersetzt werden.

Neben der Gebäudehülle, die sowohl die heutigen Anforderungen an Transmissionswärmeverluste als auch an Wärmebrückenfreiheit bei Weitem nicht mehr erfüllte, fand auch ein Austausch der kompletten haustechnischen Anlagen statt. Ein Großteil der Heizwärme wird statt mit dem ehemaligen Ölkessel nun durch regenerative Energien mittels Erdsonden erzeugt. Insgesamt 13 Sonden nutzen in 140 m Tiefe die über das gesamte Jahr fast durchgehend konstante Temperatur des Erdreichs. Ein Medium entzieht dem Erdreich die Wärme und übergibt sie an eine strombetriebene Wärmepumpe. Diese hebt die Wärme auf das notwendige Temperaturniveau. Ein zusätzlicher mit Erdgas betriebener Brennwertkessel unterstützt die Wärmepumpe bei Lastspitzen zum Heizen des Gebäudes.

Beide Wärmeerzeuger speisen einen Pufferspeicher, um ein zu häufiges Takten sowohl der Wärmepumpe als auch des Kessels zu verhindern. Die Heizzentrale für alle Trakte inklusive Turnhalle ist im Keller von Trakt I angeordnet.

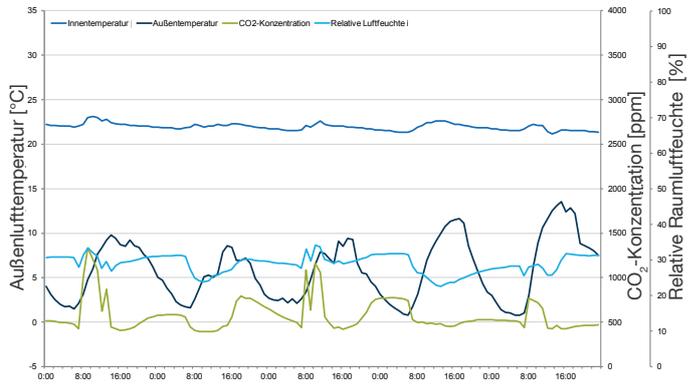


Abb. 67: Kalte repräsentative Woche (25.04.-29.04.2016), Baesweiler

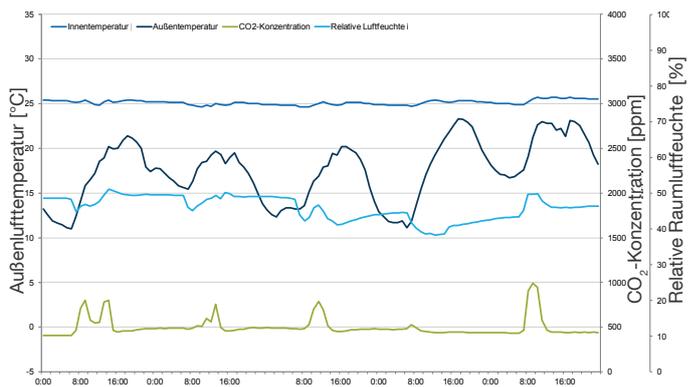


Abb. 68: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Baesweiler

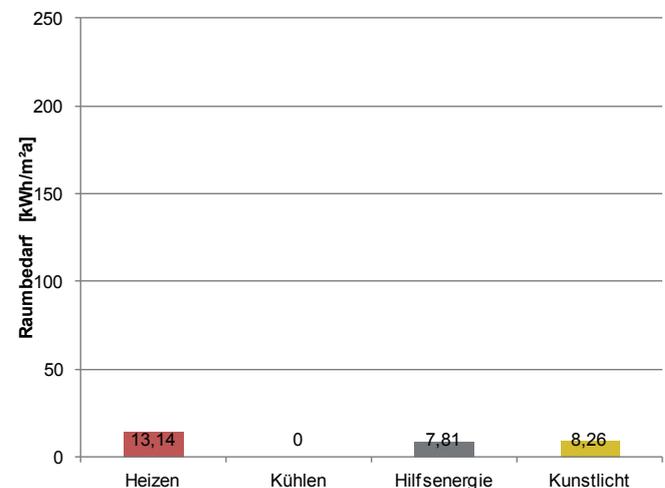


Abb. 69: spez. Raumbedarf, Baesweiler

Das Warmwasser für die Duschen in der Sporthalle wird ebenfalls durch regenerative Energien erzeugt. In diesem Fall ist eine knapp 68 m² große, thermische Solaranlage in die Südwest-Fassade integriert. Auch hier erfolgt die Kombination mit einem eigenen Gasbrennwertkessel und einem nachgeschalteten Pufferspeicher.

Wie bei einem Passivhaus üblich, wurde die Schule mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Im Heizfall erfolgt eine Vorkonditionierung der Zuluft, die Lüftungsanlage stellt damit das primäre Wärmeübergabesystem dar. Statische Heizkörper im Bereich der Tür unterstützen bei Bedarf die Lüftungsanlage beim Erwärmen der Räume.

Die Lüftungsanlage ist für jeden Gebäudetrakt einzeln als zentrale Lüftungsanlage mit konstantem Volumenstrom ausgebildet. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass der gewählte Volumenstrom (ca. 600 m³/h je Klassenzimmer) ausreichend ist. In dem untersuchten Klassenzimmer wurde eine CO₂-Konzentration größer 1.400 ppm in weniger als 1 % der Nutzungszeit verzeichnet. Da es vor der Sanierung keine Lüftungsanlage gab, konnten bestehende Schächte nicht genutzt werden. Die Zu- und Abluftkanäle sind nun sichtbar an der Decke montiert, die horizontale Verteilung erfolgt nicht wie üblicherweise im Flurbereich, sondern direkt durch die Klassenzimmer hindurch. Die Trennwände wurden dafür durchbohrt, was zu den vorher erwähnten Schallproblemen führte.

Um den sommerlichen Wärmeschutz zu gewährleisten und Überhitzungsprobleme zu vermeiden, wird die Lüftungsanlage, in Abhängigkeit von der Jahreszeit, zur Nachtkühlung verwendet. Dabei kühlt die kalte Außenluft die verbleibenden thermischen Speichermassen der alten Betonstruktur in der Nacht ab, sodass diese tagsüber die entstehende Wärme wieder aufnehmen können. Ursprünglich war auch geplant, die Erdsonden im Sommer zum Kühlen des Gebäudes zu nutzen. Da die Datenauswertung des Monitorings aber aufzeigte, dass die Nachtauskühlung zu akzeptablen Konditionen führt, entschloss man sich, auf die zusätzliche Kühlung mit den Erdsonden zu verzichten und diese nur zur Regeneration des Erdsondenfeldes zu nutzen. Auch die von uns aufgezeichneten Daten bestätigen diese Aussage. Tagsüber reduziert ein zentral gesteuerter außenliegender Sonnenschutz die solaren Einträge. Dieser kann von den Lehrkräften manuell übersteuert werden. Die Lamellen des Sonnenschutzsystems sind drehbar und passen ihren Öffnungswinkel dem der solaren Einstrahlung an.



Abb. 70: Klassenraum in Baesweiler

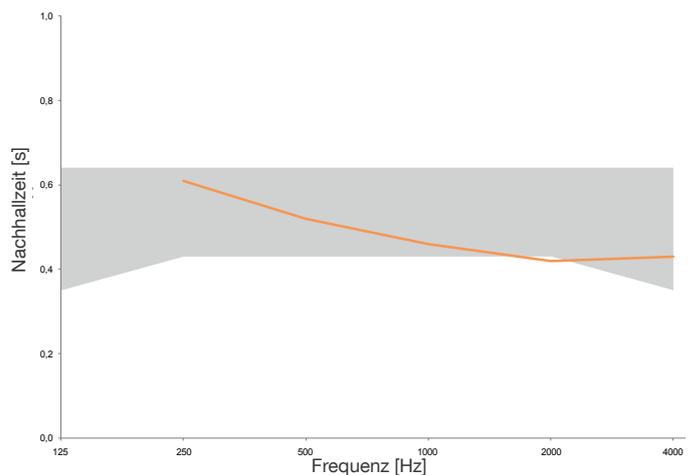


Abb. 71: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Baesweiler

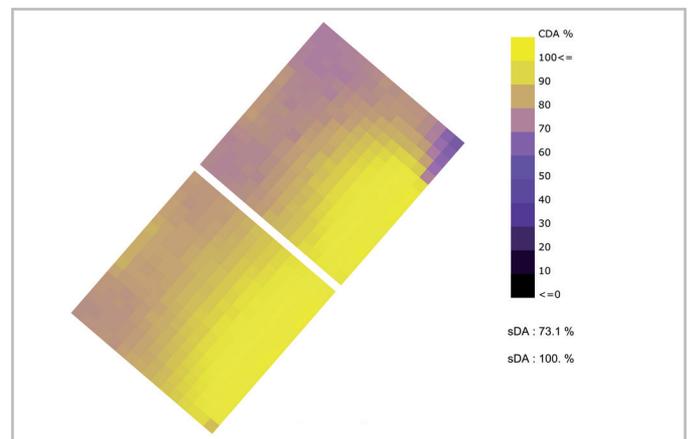


Abb. 72: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Baesweiler

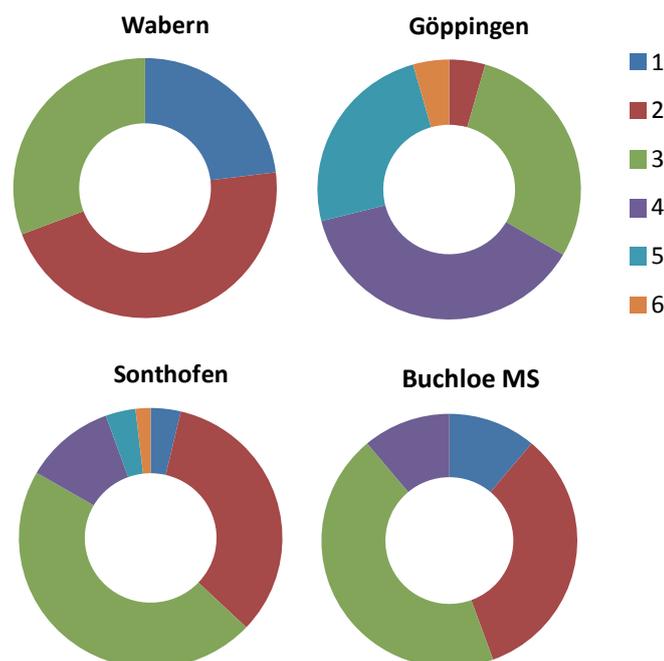
4.3. Rückschlüsse auf die Aufenthaltsqualität

4.3.1. Luftqualität

Betrachtet man die CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außentemperatur, so zeigen alle Schulen im Sommer eine sehr gute Luftqualität. Anders als bei den mechanisch belüfteten Schulen erkennt man bei den natürlich belüfteten Schulen im Winter eine hohe CO₂-Konzentration und damit eine Beeinträchtigung der Luftqualität. Aufgrund von Zugserscheinungen bleiben im Winter häufig die Fenster verschlossen, so dass die CO₂-Konzentration im Laufe der Schulstunde ansteigt. Werte bis 3.000 ppm und höher waren keine Seltenheit. Es zeigt sich aber auch, dass dies häufig in den Pausen nur unzureichend „korrigiert“ wird; sprich nicht die nötige Stoßlüftung vorgenommen wird. Beispielsweise zeigt der winterliche Verlauf der CO₂-Konzentration der Schule Wandermatte in Wabern, dass nur an einem Tag eine intensive Lüftung in der Mittagspause stattfindet und die Werte im Tagesverlauf bis auf 2.500 ppm ansteigen. So liegt morgens, bei Unterrichtsbeginn, bereits eine CO₂-Konzentration von 1.200 ppm vor – sprich da liegt die Belastung bereits knapp vor dem Schwellwert für gute Luft. Es stellt sich also die Frage, ob es ausreicht, in einer natürlich belüfteten Schule einfach nur öffnenswerte Fenster anzubieten. Offensichtlich muss man die Strategie der natürlichen Lüftung in der Planung berücksichtigen.

Das beinhaltet einerseits klare Hinweise für die Nutzer und andererseits eine gewisse Grundlüftung, die über eine Quer- oder Kaminlüftung organisiert ist.

Die erstellten Grafiken zur Häufigkeitsverteilung der CO₂-Konzentration zeigen auf, wie oft während der Nutzungszeit gewisse Schwellenwerte überschritten werden. Bei den drei natürlich belüfteten Schulen zeigt sich ein deutlich unterschiedlicher Verlauf im Sommer und Winter. Bei den vier mechanisch belüfteten Schulen liegen die Sommer- und Winterkurven sehr viel näher beieinander und alle mechanisch belüfteten Schulen haben objektiv gesehen eine sehr gute Luftqualität. Bei den drei natürlich belüfteten Schulen ist bei der Häufigkeitsverteilung im Winter ein deutlicher Unterschied erkennbar: Während die Münchner Schule von Theodor Fischer eine CO₂-Konzentration von ca. 1.500 ppm während etwas mehr als 20 % der winterlichen Nutzungszeit überschreitet, liegt die Überschreitungshäufigkeit in Göppingen bei knapp 30 % und in Wabern bei fast 40 %. Wie vermutet, bestätigt der statistische Vergleich einen deutlichen Vorteil für die Münchner Schule durch das große Raumvolumen. Die etwas besseren Werte der Schule in Göppingen – im Vergleich zur sanierten Schule in Wabern – sind sehr wahrscheinlich auf die relativ undichte, unsanierte Fassade zurückzuführen. Wabern zeigt repräsentativ, welche Luftqualität sich mit einer technisch modernen – sprich luftdichten – Fassade einstellt. Interessant ist, dass die Auswertung der Fragebögen ein anderes Ergebnis zeigt. Im Mittel schneiden bei der subjektiven Beurteilung die mechanisch belüfteten Schulen relativ schlecht ab. Zugleich zeigen die Messungen in Wabern sehr hohe CO₂-Konzentrationen – trotzdem beurteilen die Nutzer die Luftqualität mit gut. Durch das subjektive Ergebnis der Befragung muss man die mechanische Lüftung als alleiniges Mittel der Wahl sicherlich hinterfragen.



4.3.2. Luftfeuchte

Ein erhöhter winterlicher Luftaustausch führt einerseits zu geringeren CO₂-Konzentrationen, gleichzeitig reduziert das kontinuierliche Einbringen der trockenen Außenluft die Raumluftfeuchte. Die natürlich belüfteten Schulen unterschreiten die empfohlenen 30 % relative Raumluftfeuchte nur geringfügig (München nicht unter 25 %). Göppingen zeigt aufgrund der undichten Fassade eine geringe absolute Luftfeuchte, wohingegen aufgrund der sehr niedrigen Lufttemperatur die relative Feuchte meist akzeptabel ist. Dagegen zeigen die Schulen mit mechanischer Lüftungsanlage bei kalten Außentemperaturen oft eine Raumluftfeuchte unter 20 %. Dies kann Auswirkungen auf die Schleimhäute haben und kann zu trockenem Mund und zu trockenen Augen führen, was vor allem Kontaktlinsträgern Unbehagen bereitet.

Abb. 73: Bewertung der Luftqualität

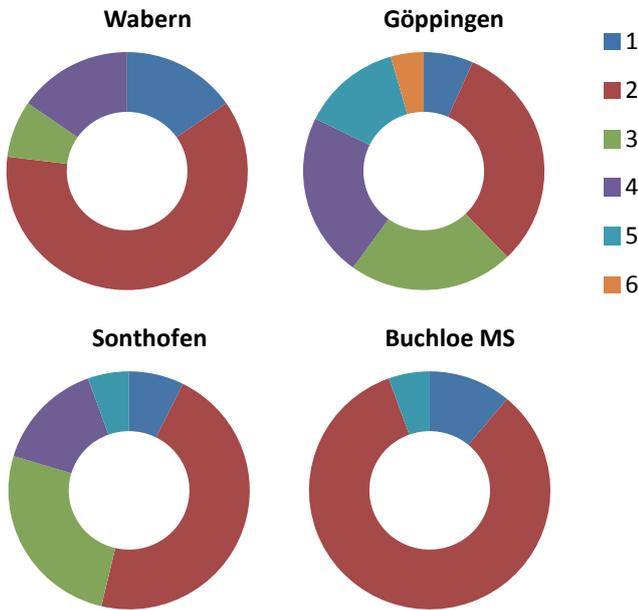


Abb. 74: Bewertung der Luftfeuchte

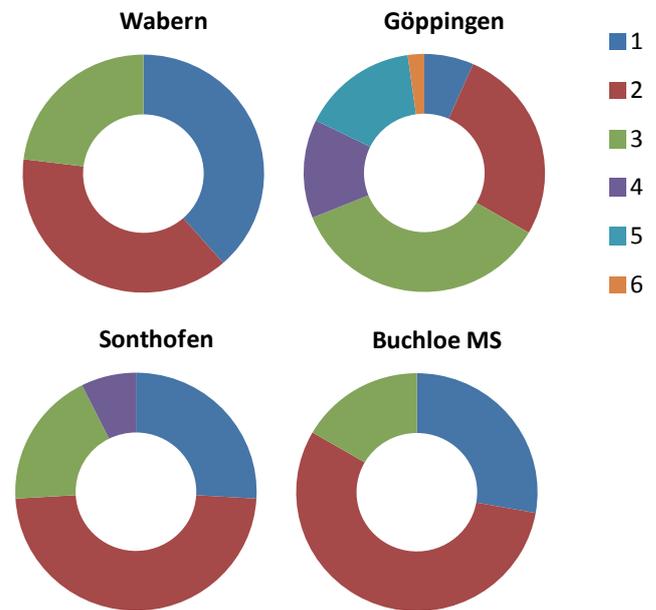


Abb. 75: Bewertung des winterlichen Komforts

4.3.3. Thermischer Komfort

Beim thermischen Komfort im Winter zeigt sich vereinzelt, dass die Mindesttemperatur von 20 °C nicht erreicht wird. Der winterliche Komfort in Göppingen ist stark eingeschränkt, weil die Fassade noch unsaniert ist und die Heizkörper – nachdem die Wärmeversorgung von Dampf auf Warmwasser umgestellt wurde – nicht die erforderliche Heizleistung aufweisen. In Amsterdam führt der hohe Glasanteil zeitweise zu winterlichen Komforteinbußen. Die sommerliche Überhitzung in einigen Schulen ist auf einen hohen Glasanteil in Kombination mit einem ineffizienten Sonnenschutz zurückzuführen. Beispiele dafür sind die Schulen in Amsterdam, wo ein innenliegender Vorhang die solaren Lasten ins Klassenzimmer lässt, und Göppingen, wo der ehemals feststehende Brise-Soleil-Sonnenschutz nicht mehr vorhanden ist und viele der nachträglich installierten außenliegenden Jalousien im Laufe der Jahre nicht mehr funktionieren. Bei den Schulen ohne maschinelle Kühlung zeigen die Schulen in München und Baesweiler, dass mittels einfacher Maßnahmen ein guter sommerlicher Wärmeschutz zu erreichen ist. Dies können einerseits passive Maßnahmen sein, wie die Nutzung der thermischen Masse, ein gut funktionierender außenliegender Sonnenschutz – am besten als Lamellenbehang – oder auch die Nutzung der maschinellen Lüftung zur Nachtlüftungspülung. In Wabern zeigt sich, dass in den Übergangszeiten, bei flach stehender Sonne, bereits Raumlufttemperaturen bis 28 °C auftreten, was auf den textilen Sonnenschutz zurückzuführen ist. Bei hochstehender Sommersonne steigt die Raumtemperatur nicht zusätzlich an.

Anhand dieser Beispiele zeigt sich die Bedeutung eines gut funktionierenden, außenliegenden Sonnenschutzes, um Überhitzung vorzubeugen. Der sommerliche Wärmeschutz funktioniert im Gymnasium Sonthofen durch die maschinelle Kühlung in Kombination mit den Kühldecken bedingt gut. In den Übergangszeiten wird die maximale Komforttemperatur überschritten. So geben die Schüler und Lehrer nur eine mittlere Bewertung, häufig kommt die Bemerkung, es sei tendenziell zu warm.

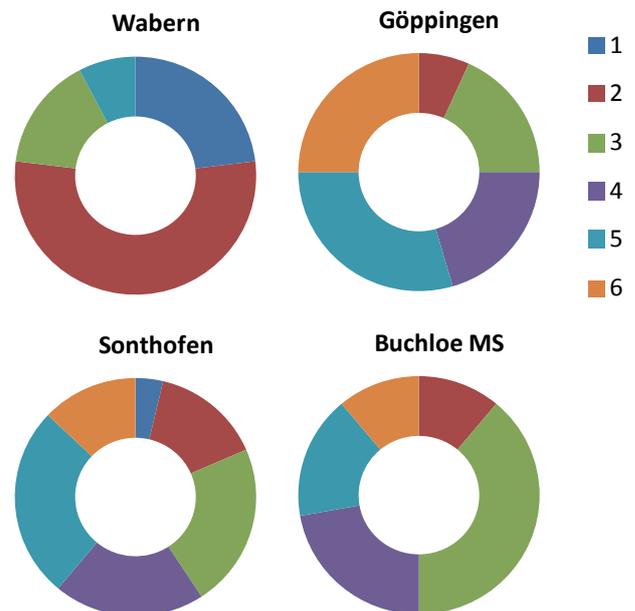


Abb. 76: Bewertung des sommerlichen Komforts

4.3.4. Akustischer Komfort

Die Messung der Nachhallzeit zeigt in den meisten Schulen einen guten oder sehr guten akustischen Komfort. In wenigen Schulen wird der Komfortbereich bei tiefen Frequenzen leicht überschritten. Dabei wurden unterschiedlichste Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik vorgenommen: Teilweise sind die Decken vollflächig mit Akustikabsorbentern belegt, in einigen Schulen nur Teilflächen, was die thermische Aktivierung der Bauteile zulässt.

Im Bereich der Akustik zeigt sich eine sehr gute Korrelation zu den subjektiven Ergebnissen der Befragung. Generell wurden Tageslicht und Akustik von den Nutzern mit gut bewertet.

stark schließen, verringert sich der Sichtbezug nach außen. Optimalerweise bieten sie die Option einer Tageslichtlenkfunktion, indem in geschlossenem Zustand die oberen Lamellen Licht an die in geschlossenem Zustand Licht an die Decke lenken und damit blendfrei den Raum mit Tageslicht versorgen. Gibt es diese Funktion nicht, muss gegebenenfalls Kunstlicht dazu geschaltet werden. Die Option eines vertikalen Sonnenschutzes für ost- und west-orientierte Räume wurde in keiner Schule umgesetzt. Süd-orientierte Räume sind einfacher zu handhaben, da hier der horizontale Lamellenbehang optimal funktioniert. Die Lamellen schließen nicht komplett und bieten einen Sichtbezug in den Außenraum. Bei fast allen Schulen mit außenliegenden Jalousien ist dieser Winkel, abhängig vom solaren Eintrag, elektrisch gesteuert. In der Befragung kam jedoch häufig die Meinung zutage, dass die Nutzer die Regelungstechnik nicht verstanden und sich entsprechend von ihr „bevormundet“ fühlten.

Bei der Wahl des Sonnenschutzes sind grundsätzlich Lamellenbehänge einem flächigen, textilen Sonnenschutz vorzuziehen. Dieser fordert immer einen Kompromiss zwischen der Verringerung des solaren Eintrags und der Tageslichtausnutzung. Die Schule in Wabern verfügt über einen außenliegenden textilen, flächendeckenden Sonnenschutz. Dieses lässt in geschlossenem Zustand einen hinreichenden Anteil des Tageslichts als diffuses Licht in den Raum und erreicht eine Tageslichtautonomie von 100 %. Zugleich erfüllt der transparente Behang der Schulanlage aber nicht die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz.

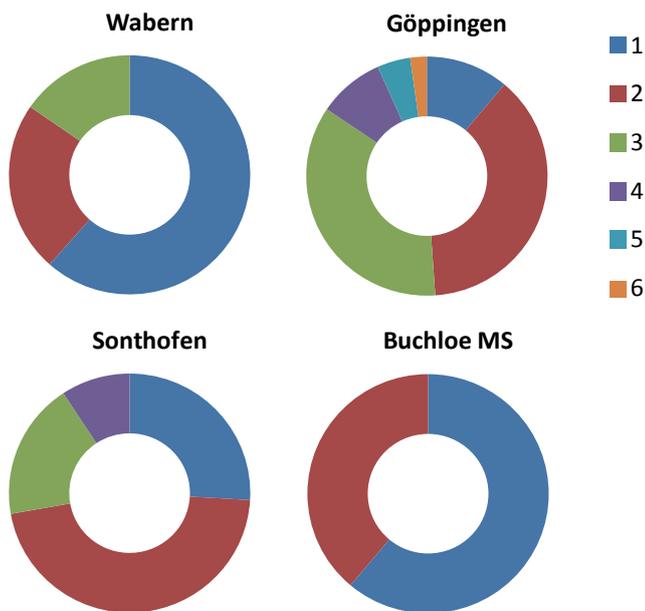


Abb. 77: Bewertung des akustischen Komforts

4.3.5. Visueller Komfort

Alle Schulen erzielen in der Tageslichtsimulation gute bis sehr gute Ergebnisse, wobei München mit knapp 40 % das Minimum, Amsterdam mit ca. 72 % das Maximum markiert. Generell bedeutet ein hoher Glasanteil eine Erhöhung der solaren Einstrahlung. Während im Winter die flach stehende Sonne im besten Fall den Heizwärmebedarf der Räume reduziert, besteht im Sommer die Gefahr der Überhitzung. Dies betrifft hauptsächlich ost- und west-orientierte Räume, wenn die Sonne flach steht und ungehindert auf die Fenster trifft. Die meisten Schulen reagieren mit Lamellenbehängen auf diese Situation. Weil sich die Lamellen wegen des Einfallswinkels aber

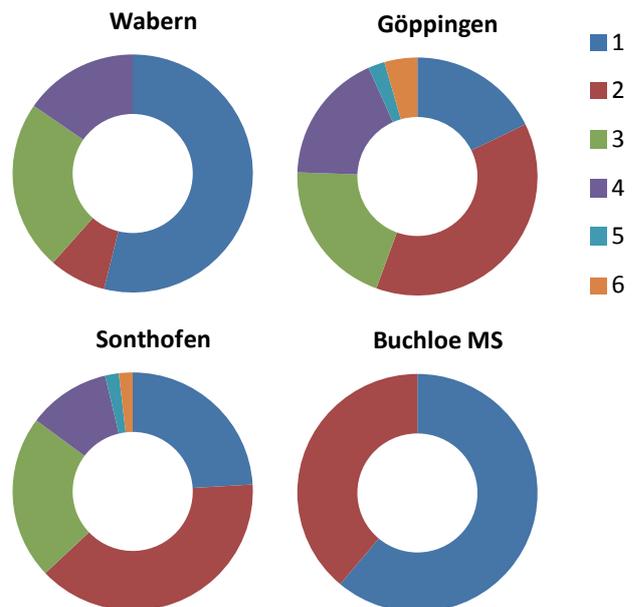


Abb. 78: Bewertung des visuellen Komforts

4.4. Rückschlüsse auf die Technik und den Energiebedarf

4.4.1. Regelung und Instandhaltung der Technik

Der Grad der Technisierung hat das Berufsbild des Hausmeisters – oder besser gesagt des Facility Managers – grundlegend verändert. Tatsächlich geht es heute viel weniger um kleinere Reparaturen, sondern um ein Management einer Immobilie bzw. auch um Mangelverwaltung, da die Kommunen häufig zu wenig Mittel zur Verfügung stellen. Energieverbrauch und Komfort werden an einer Schaltstelle reguliert, die bei hochtechnisierten Schulen einem Cockpit ähnelt. Nicht zuletzt diese Veränderung des Berufsbilds führt zu Überlegungen von Kommunen, das Facility Management aller kommunalen Gebäude in einem Pool von Fachkräften zu sammeln. Die einzelne Schule hat in Konsequenz gar keinen eigenen Hausmeister mehr. Diese Entwicklung ist einerseits verständlich, andererseits geht zwangsläufig Wissen und die Identifikation mit dem Gebäude verloren.

Eine Technisierung führt in der Regel auch zu einer Automatisierung. Dies betrifft die Regelung der Heizung, den Betrieb der Lüftung, Sonnenschutz, Kunstlicht, etc. Planer neigen dazu, die eingesetzte Technik optimal zu nutzen. Im Umkehrschluss fühlen sich die Nutzer von der Anlagentechnik „entmündigt“ – ein Kommentar, den

wir in vielen der untersuchten Schulen in Gesprächen hörten. „Wieso führt der Sonnenschutz ein Eigenleben“ oder „die Lichtsteuerung macht was sie will, aber nicht das was man möchte“. Ein manueller Eingriff wird vom Nutzer häufig als eine „Störung des Systems“ wahrgenommen. Sicherlich sollten sich die Planungsbeteiligten genau überlegen, welcher Grad der Automatisierung notwendig ist, so dass der Nutzer nicht das Gefühl der Bevormundung hat. Die Messungen und Umfragen z. B. der Schule in Sonthofen zeigt, dass trotz objektiv sehr guter Luftqualität der Nutzer dies anders empfindet. Es scheint, als gäbe es ein gewisses Maß an Misstrauen gegenüber der Technik – wenn die Frischluft nicht über das Fenster kommt, wenn es keinen Schalter gibt für das Licht oder den Sonnenschutz, etc. Gleichzeitig ist im Sommer morgens um 5 niemand da der den Sonnenschutz schließt, wenn die Sonne auf der Ostfassade steht. In der Folge sind die Räume bereits bei Schulbeginn überhitzt.

Es bedarf offensichtlich einer ausgewogenen sowohl als auch Strategie, wobei der Umgang mit natürlichen Ressourcen wie Tageslicht, natürliche Lüftung, Nachtauskühlung durchaus als pädagogisch wertvolle Aufgabe betrachtet werden sollte. Dies entspricht der Theorie wonach das Gebäude, neben den Eltern und dem Lehrkörper, zur Bildung beiträgt [18].

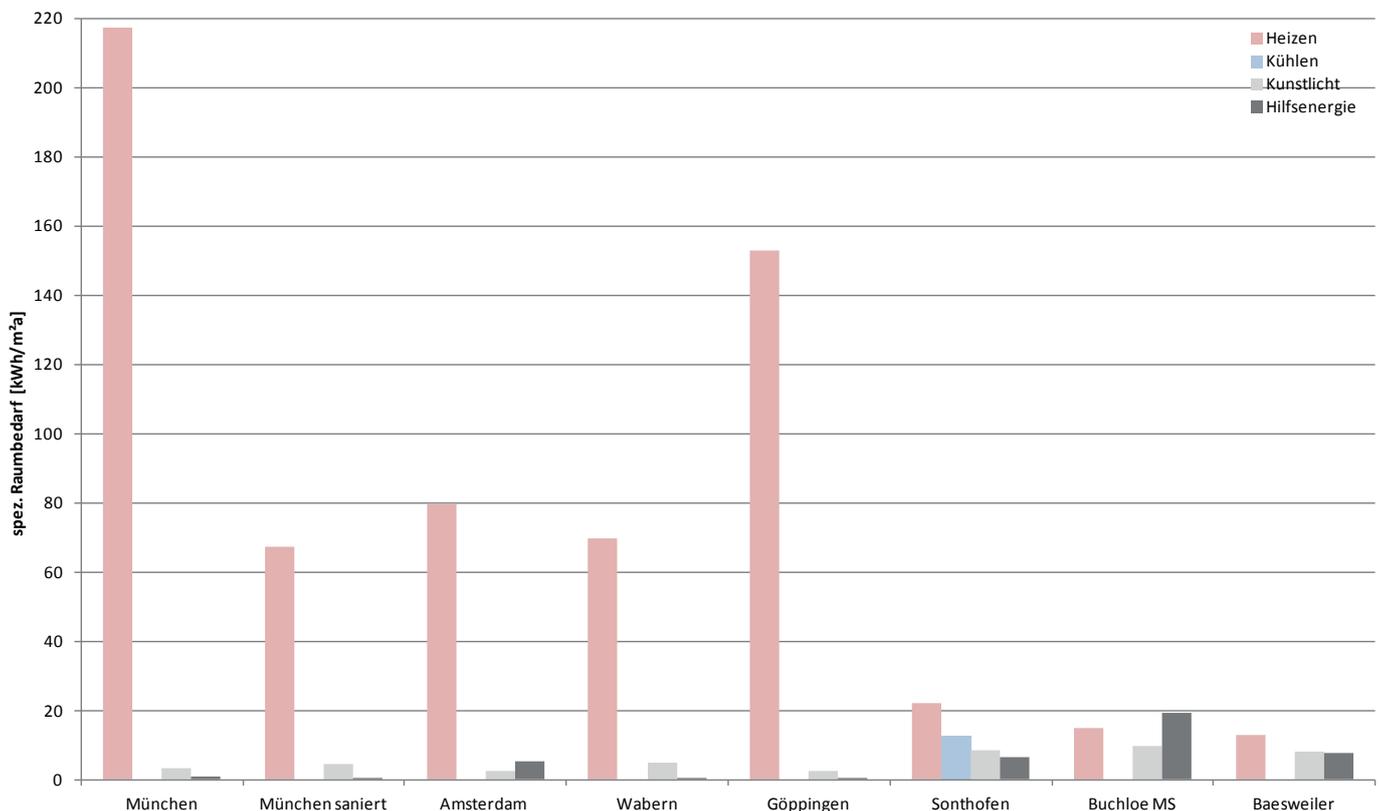


Abb. 79: Simulationsergebnisse für den Raumbedarf (Heizen, Kühlen, Kunstlicht und Hilfsenergie)

4.4.2. Von der Energieerzeugung zum Energiebedarf

Insgesamt zeigen die mechanisch belüfteten Schulen mit Wärmerückgewinnung eine Verschiebung des Energiebedarfs von Wärme zu Strom. So weist Wabern die geringsten CO₂-Emissionen auf, trotz und wegen der fehlenden Lüftungsanlage. Im Vergleich zu den drei Schulen mit mechanischer Lüftungsanlage (Sonthofen, Baesweiler, Mittelschule Buchloe) weist sie wegen der Biomassefeuerung die geringsten CO₂-Emissionen auf, trotz höherer Transmissions- und Lüftungswärmeverluste.

Aus energetischer Sicht resultiert daraus dennoch eine generelle Fragestellung: Ist es sinnvoll, für eine mechanische Lüftungsanlage – die den Wärmebedarf reduziert – Strom aufzuwenden, der bei der Erzeugung mehr CO₂ emittiert als die Wärmerückgewinnung einspart?

Die technisch sehr modernen Schulen wie z.B. die Gymnasien in Baesweiler und Sonthofen zeigen alleamt ein ähnliches, sehr gutes Ergebnis mit geringen CO₂-Emissionen. Interessant dabei ist, dass diese technisch anspruchsvollen Schulen „nur“ ca. 30 % geringere CO₂-äquivalente Emissionen haben als die Theodor-Fischer-Schule in München – gerechnet nach der bevor-

stehenden Sanierung. Diese Größenordnung wird ohne mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung sowie mit einer weiterhin ungedämmten Fassade erzielt. Hier ein Vergleich, um die Differenz zu verdeutlichen: Dieser Wert entspricht etwa der Nutzung eines Whiteboards mit dazugehörigem Desktop-Computer inklusive Standby-Verlusten bei einer täglichen Betriebszeit von 8 Stunden in 42 Wochen pro Jahr.

Betrachtet man die Energiekosten, nähert sich die Schule München im sanierten Zustand sogar noch weiter den technologisch modernen und anspruchsvollen Schulen an. Nimmt man die Schulen in München und Göppingen im unsanierten Zustand aus dem Vergleich heraus, zeigt sich, dass die Energiekosten für den Gebäudebetrieb aller Schulen – unabhängig von der technischen Ausstattung – zwischen ca. 4 und 9 Euro je m² und Jahr liegen. Bei den Simulationen sind wir – wie im Kapitel Methodik beschrieben – vom idealen Nutzer sowie von einer idealen MSR Technik (Mess-, Steuer-, Regeltechnik) und auch von einem einwandfreien Zustand der Anlagen ausgegangen. Dinge wie z. B. ein erhöhter Druckverlust und damit einhergehend ein erhöhter Lüfterstrom wenn die

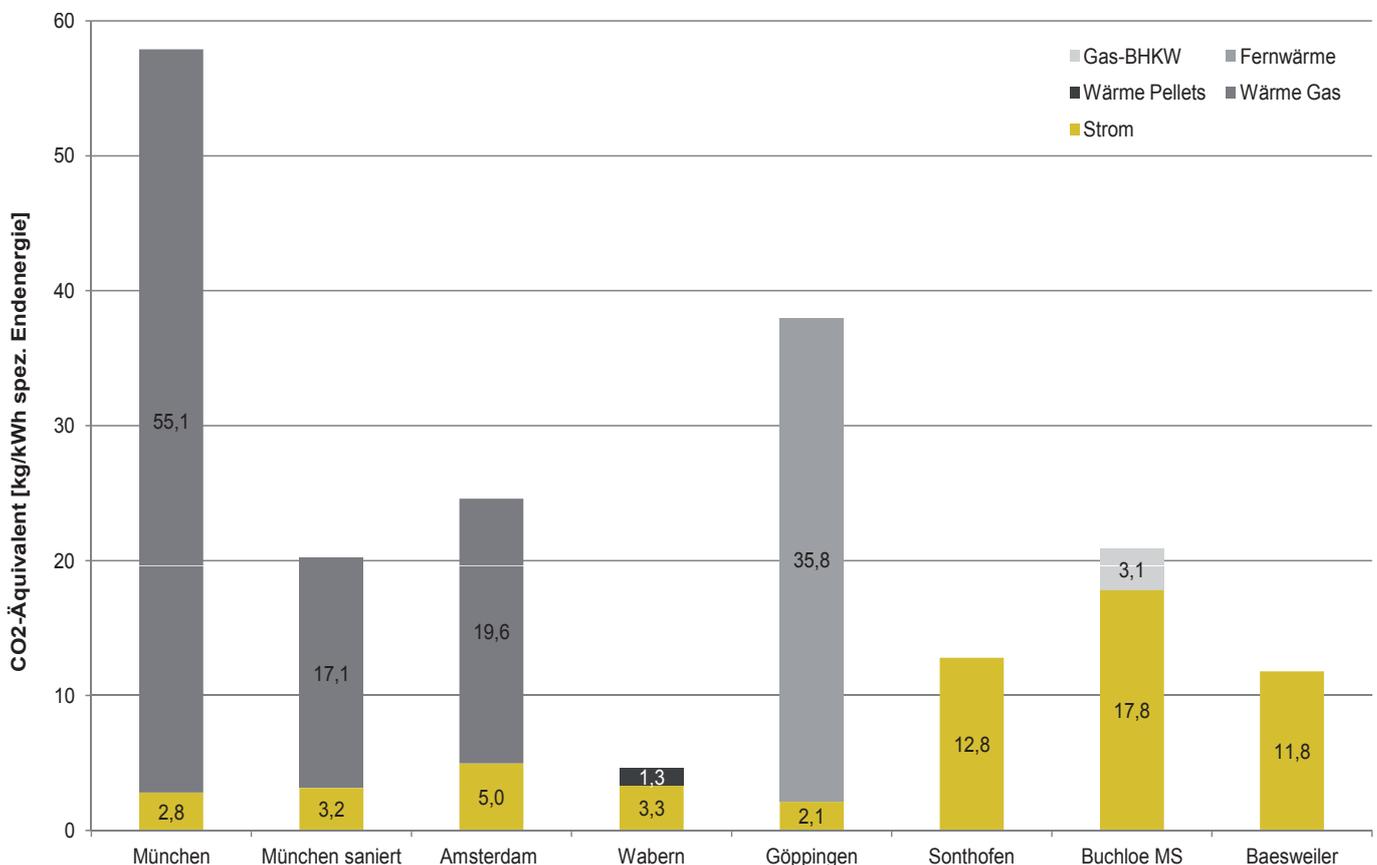


Abb. 80: Simulationsergebnisse für das CO₂-Äquivalent

Filter nicht rechtzeitig gereinigt werden, wurden genauso wenig berücksichtigt wie die Tatsache, dass es den idealen Nutzer nicht gibt. So wird vor allem der Strombedarf für Kunstlicht in allen Schulen stärker ins Gewicht schlagen. In der Realität wird der Wärmebedarf in natürlich belüfteten Schulen aufgrund eines unzureichenden Lüftungsverhaltens geringer sein – auf Kosten der Luftqualität. Der Energiebedarf der technisch anspruchsvollen Schulen wird tendenziell ebenfalls größer sein, da erfahrungsgemäß MSR Technik höchst selten „optimal“ funktioniert. Dadurch wird sich der Energiebedarf der natürlich belüfteten und der mechanisch belüfteten Schulen weiter annähern.

Der dominierende Energiebedarf in Schulen ist dem energetischen Aufwand für die Luftkonditionierung, vor allem die winterliche Lufterwärmung, zuzuweisen. Trotzdem zeigt sich, dass sich aus einer reinen energetischen Betrachtung eine maschinelle Lüftung nicht rechtfertigen lässt. Ebenfalls zeigt sich, dass Transmissionswärmeverluste im Schulbau eine untergeordnete Rolle spielen, weswegen man das Sanierungsziel „Passivhaus“ gene-

rell in Frage stellen muss. Die wichtigsten Parameter für eine energieeffiziente Schule sind (in der Reihenfolge):

- 1) Die Minimierung des Strombedarfs für Kunstlicht durch die Wahl eines geeigneten Leuchtmittels sowie einer optimierten Tageslichtnutzung.
- 2) Der Einsatz einer CO₂-armen Wärmeerzeugung.
- 3) Die Minimierung des Hilfsenergiebedarfs beim Einsatz einer maschinellen Lüftung. Dies lässt sich zum Beispiel durch eine Minimierung der Druckverluste durch großzügig dimensionierte Geräte und Kanalnetze zur Luftverteilung oder durch die Wahl für eine dezentrale Lüftung erreichen.
- 4) Ein optimaler, baulicher sommerlicher Wärmeschutz, um Kühlbedarf zu vermeiden.

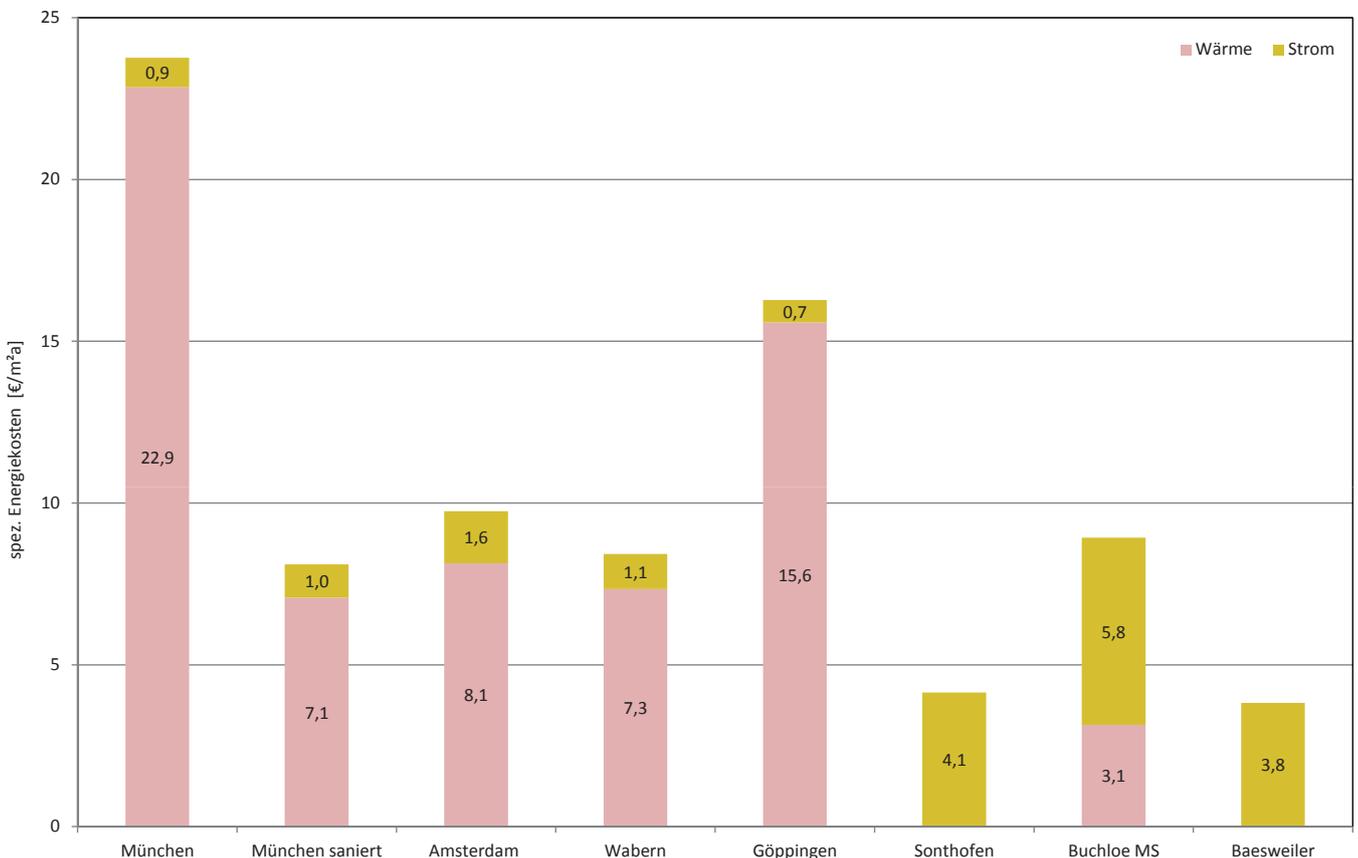


Abb. 81: Simulationsergebnisse für die Energiekosten des Gebäudebetriebs

5. Integrale Planung des Hohenstaufen- Gymnasiums

5.1. Grundlagen

5.1.1. Wetterdaten des Standortes

Der Konzeptentwicklung werden stündlich aufgelöste Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes zugrunde gelegt. Der Standort des Hohenstaufen-Gymnasiums fällt in den Bereich des Testreferenzjahres – Göppingen.

Am Temperaturverlauf in Abbildung 82 erkennt man eine kalte Winterperiode mit Temperaturen bis knapp -10°C über mehrere Tage sowie mehrere längere sommerliche Hitzeperioden mit Tagestemperaturen bis zu 34°C . Nur an wenigen Sommertagen bleiben jedoch die Nachttemperaturen über 25°C .

Die Summe der solaren Einstrahlung auf eine horizontale Fläche beträgt etwa $1142 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ (vgl. Abbildung 83).

Im sog. T-x-Diagramm (Abbildung 85) sind die Stunden des Jahres mit der jeweiligen Temperatur und der gleichzeitig vorliegenden absoluten Außenluftfeuchte sowie verschiedene Komfortbereiche dargestellt.

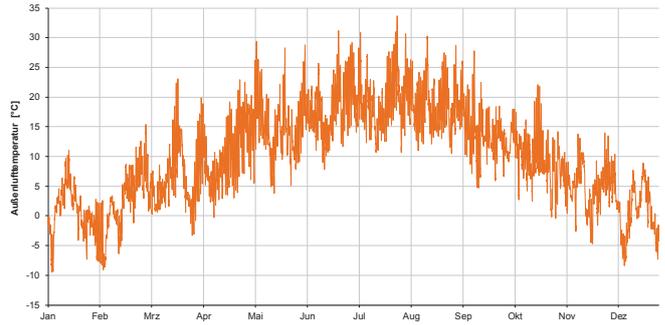


Abb. 82: Verlauf der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 2015, Göppingen)

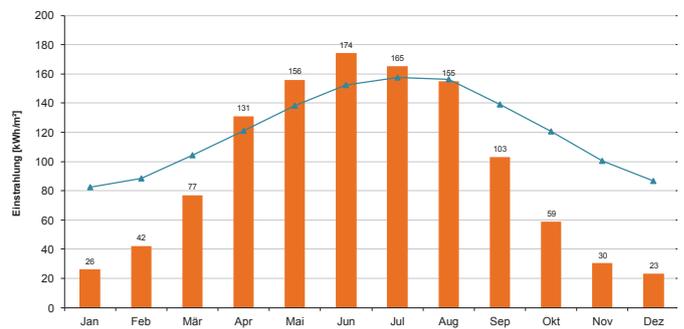


Abb. 83: Monatliche solare Einstrahlung auf die Horizontale (Testreferenzjahr 2015, Göppingen)



Abb. 84: Freiflächen- und Grundrissplan nach der Sanierung

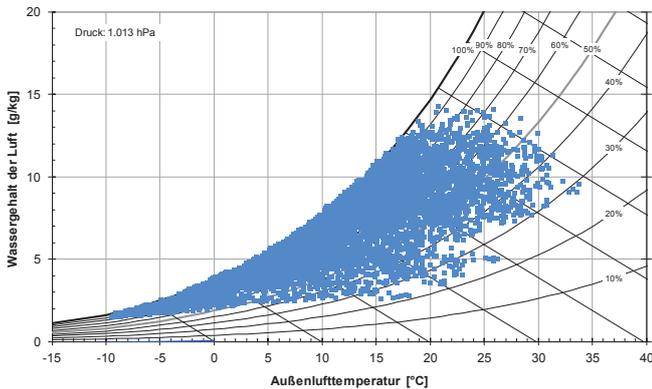


Abb. 85: Absolute Außenluftfeuchte über der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 2015, Göppingen)

5.2. Beschreibung des Komfort- und Energiekonzeptes

Dem Bauherrn wird ein Komfort- und Energiekonzept vorgeschlagen, das darauf zielt das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes im Sinne des Denkmalschutzes zu erhalten und zugleich eine hohe Aufenthaltsqualität in Bezug auf die Luftgüte, Tageslichtverfügbarkeit und den thermischen Komfort zu gewährleisten. Dabei sollen im Sinne der Nachhaltigkeit größere bauliche Maßnahmen und Energieverluste vermieden werden.

Um dies zu ermöglichen stand im Vordergrund der Entwicklung des Konzepts nicht nur die Optik der Gebäudekonstruktion zu erhalten, sondern darüber hinaus die ursprünglichen technischen Ideen und baulichen Maßnahmen für das Gebäudeklima zu überprüfen und - falls angemessen - zu reaktivieren.

Die Erneuerung der Fassade wird die größte bauliche Maßnahme darstellen. Die Herausforderung dabei ist es, die alten Fassadenelemente auszutauschen, ohne das besondere farbliche und filigrane Fassadenbild zu verändern.

Vergleichend wurden ein Austausch der bisherigen Fenster und opaken Fassadenelemente durch eine hochwertige 2-fach Verglasung bei Verwendung der originalen Rahmenkonstruktion und eine 3-fach Verglasung inklusive neuer Rahmen getestet. Daraus ergab sich, dass die Verbesserung der Gläser als 2-fach Glas schon eine deutliche Optimierung bewirkt und der weiterführende Einfluss der 3-fach-Verglasung in den Hauptnutzungsbereichen nur noch zu einer geringfügigen Optimierung führt. Zurückzuführen ist das auf die ungewöhnliche Nutzung der Klassenräume durch eine hohe Anzahl an Personen zur gleichen Zeit und die daraus resultierenden Wärmeeinträge. Zusätzlich wirkt sich die Süd-Orientierung und großen Fensteranteile der Fassade positiv auf den winterlichen Wärmeschutz aus.

Um den gestalterischen Ideen Günter Behnischs Rechnung zu tragen, wurde der von ihm geplante zwischen den Sichtfenstern und Oberlichtelementen angebrachte Überhang in seiner Sinnhaftigkeit und Effizienz überprüft. Dabei ergab sich, dass der Überhang in Kombination mit einer Optimierung des Oberlichtes hinsichtlich des Wärmeeintrags und Blendungsrisikos durch eine innenliegende Bedruckung der äußeren Scheibe, einen ausreichenden Sonnen- und Blendschutz gewährleistet.

Um eine Überhitzung in den Sommermonaten zu vermeiden, erfolgt die Grundkonditionierung über die thermische Masse der Betondecken in Verbindung mit einer nächtlichen Durchlüftung (Nachtlüftungspülung) und dadurch Abkühlung. Dies erfordert eine teilweise Freilegung der Betondecken in den Klassenräumen. Im Verbund mit dem vorher erwähnten Überhang und dem optimierten transluzenten Oberlicht wird so der sommerliche Komfort optimiert.



Abb. 86: Querschnitt BB nach der Sanierung

Für die Hauptnutzungsräume wird eine mechanisch unterstützte Lüftung vorgeschlagen, die auf das ursprüngliche dezentrale Durchlüftungskonzept zurückgeht. Für die Belüftung werden Fassadenöffnungen, wie zum Beispiel die bereits existierenden manuell bedienbaren Lüftungsschieber unterhalb der Sichtfenster, eingesetzt. Die ursprünglich geplanten, heute jedoch verschlossenen Flur-Lüftungskanäle werden reaktiviert und zusätzlich mechanisch unterstützt, um einen konstanten Volumenstrom zu gewährleisten.

Aus primärenergetischer Sicht ergibt sich ein Vorteil für dieses Lüftungskonzept. Zwar ist der Wärmebedarf ohne Wärmerückgewinnung für die Klassenräume höher, da Außenluft zugeführt wird und vom Heizsystem erwärmt werden muss. Gleichzeitig ist jedoch der Strombedarf für die Ventilatoren auf Grund des reduzierten Druckverlusts und der bedarfsgerechten Regelbarkeit geringer als bei einer klassischen mechanischen Belüftung. Auch ist die bedarfsweise Luftmengenregelung einfacher raumweise zu realisieren und minimiert den Lüftungswärmebedarf durch suffizienten Betrieb.

Diese Optimierung durch die Reaktivierung der Fassade und des Lüftungskonzepts stellt einen sehr guten Kompromiss im Umgang mit dem Denkmalschutz dar.

Das Konzept für die wichtigsten Bereiche wird in den folgenden Abbildungen beschrieben und zeichnet sich im Wesentlichen durch folgende Merkmale aus:

- Verbesserter Wärmeschutz durch hohe Dämmeffizienz der opaken Brüstungselemente. Auch hinsichtlich der Wärmebrückenreduktion wird empfohlen Betonteile innen liegend durch Dämmstreifen zu optimieren.
- Gute 2-fach Wärmeschutzverglasung mit filigranen Rahmen
- Transparentes Fenster Sichtbereich: U-Wert Glas ca. $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ Tageslichttransmission (Tvis) ca. 80%, Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) ca. 66%.
- Transluzentes Fenster Oberlicht: U-Wert Glas ca. $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ Tageslichttransmission (Tvis) ca. 19%, Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) ca. 17% durch Kombination mit Bedruckung auf der Innenseite der äussersten Scheibe.
- Sommer: Kühlung mittels Nachtlüftungspülung unter Ausnutzung von Speichereffekten durch ca. 60% exponierte thermische Masse zur Reduzierung der sommerlichen Überhitzung
- Winter: Heizen mittels neuer Heizkörper, ausgelegt auf das vorhandene Temperaturniveau des Wärmenetzes

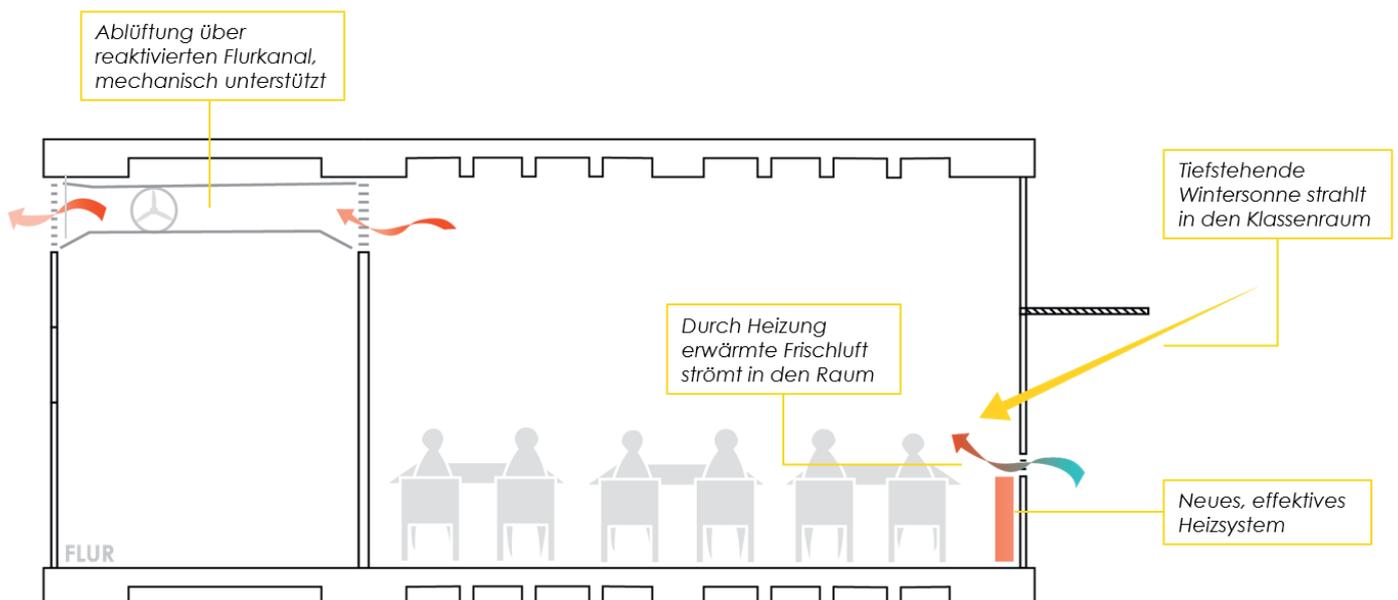


Abb. 87: Konzeptschnitt Klassenraum Winter

- Sommerlicher Wärme- und Blendschutz durch außenliegenden Überhang oberhalb des Sichtfensters und Kombination des transluzenten Oberlichts mit Bedruckung. Innenliegend ist entsprechend ein beweglicher Blendschutz vorzusehen
- Reaktivierung der manuell bedienbaren Lüftungsschieber zwischen opaken Bauteil und Sichtfenster als dezentrale Belüftung

- Reaktivierung der Flur-Lüftungsschächte zur dezentralen, maschinell unterstützten Entlüftung der Klassenräume
- Luftdichte Bauweise zur Verringerung der unbeabsichtigten Lüftungsverluste (Zielwert: n^{50} -Wert < 1.0 1/h)

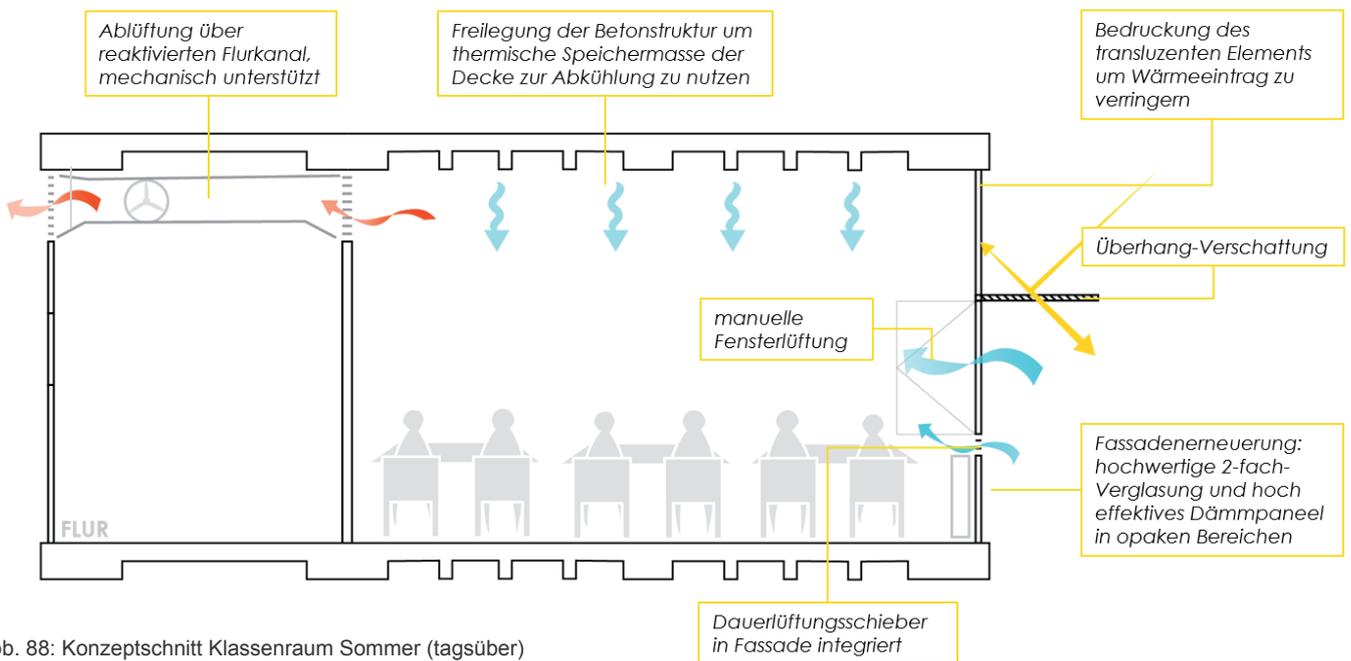


Abb. 88: Konzeptschnitt Klassenraum Sommer (tagsüber)

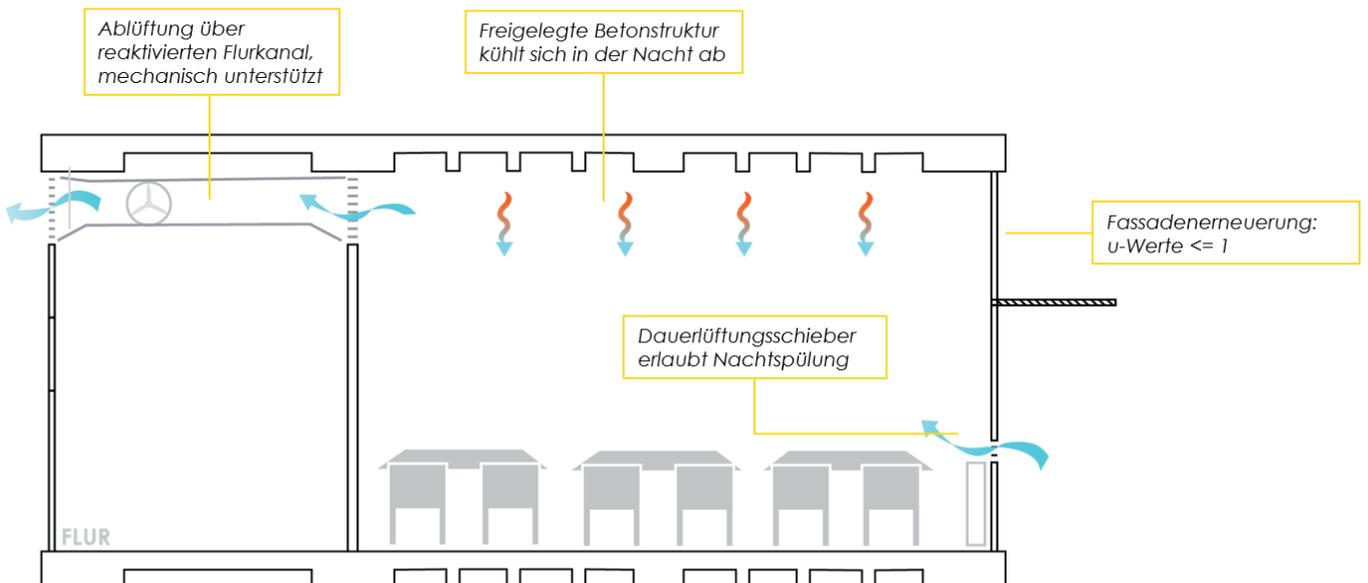


Abb. 89: Konzeptschnitt Klassenraum Sommer (nachts)

5.3. Simulation - Klassenraum

Um das vorherig beschriebene Konzept zu entwickeln und zu prüfen wurde zunächst ein typisches Klassenzimmer (Raum 202) mit südorientierter Fensterfassade hinsichtlich verschiedener für den Komfort und Energiebedarf relevanten Faktoren simuliert.

Diese Zone repräsentiert ein Worst-Case-Szenario bezogen auf die solaren Gewinne (sommerliche Überhitzung). Im Anschluss wurden weitere Zonen analysiert um die maximale Exposition zum Außenraum (Wärmeverluste im Winter) zu bewerten. Alle untersuchten Zonen sind in der folgenden Abbildung in Gelb dargestellt. Zu Beginn wird aber der Fokus wie beschrieben auf Raum 202 gelegt.

5.3.1. Variantenbewertung

Abbildung 91 zeigt die Situation des Klassenraums 202 als Klassenraum mit Südfassade, der nach West und Ost an die anderen Räume und nach Norden an den Korridor anschließt. Im Folgenden werden die getesteten Varianten V0 bis V6 dargestellt und erklärt.

Variante 0 – „Ist“-Zustand

Als Basisvariante wurde zunächst der Raum entsprechend der derzeitigen Randbedingungen simuliert. Diese beinhalten die Orientierung, Maße und Eigenschaften der aktuellen, veralteten Fassadenelemente, der Innenwände, die abgehängte Decke, der Boden und die Fensteröffnungen als Lüftungselemente. Die Ausstattung des Raumes mit Tafeln, Schränken, Pinnwänden etc. und die Belegung des Raumes entsprechend der Unterrichtszeiten sind weitere Bedingungen, die in den weiteren Varianten unverändert beibehalten werden. Der derzeitige außenliegende Lamellenbehang wurde erst in V5 als Untervariante berücksichtigt.

Variante 1 - Fassadenerneuerung + Dauerlüftung

In einem ersten Schritt wurde der Austausch der Fassadengläser und opaken Elemente, sowie die Reaktivierung des dezentralen Lüftungssystems über den Flurkanal eingeführt. Die Gläser der Fassade wurden durch eine hochwertige 2-fach Verglasung ersetzt, wobei die ursprünglichen filigranen Rahmen beibehalten werden. Bei den opaken Elementen handelt es sich nun um hoch effektive Dämmpaneele. Diese Interventionen stellen vor allem den winterlichen Wärmeschutz sicher. Die Belüftung über die Schiebeelemente in der Fassade und die mechanisch unterstützte Entlüftung über den Flur ermöglichen dabei eine gute Luftqualität.

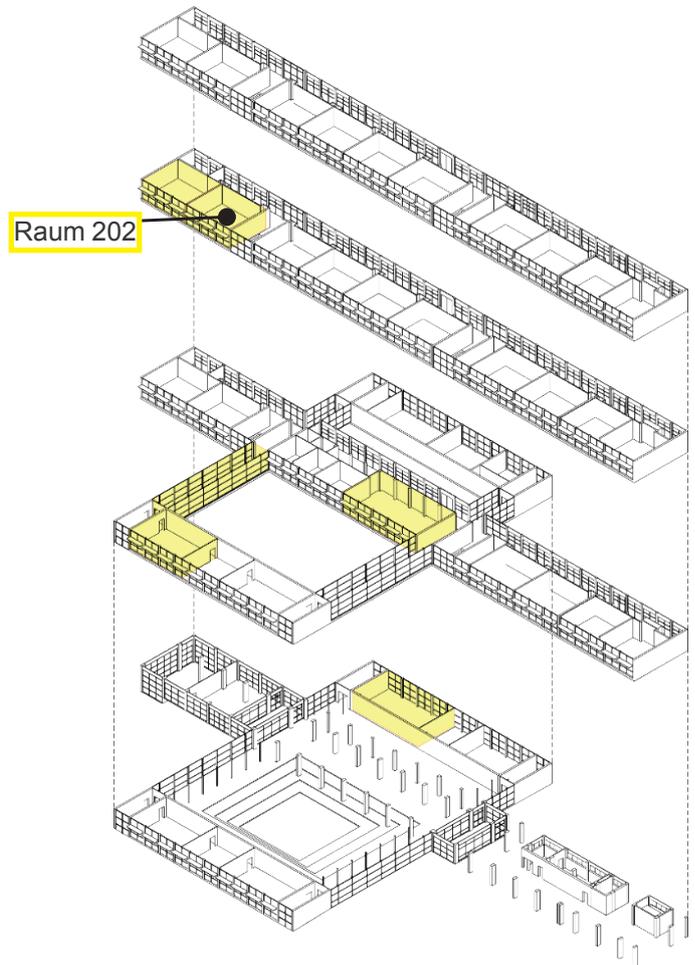


Abb. 90: Darstellung des Referenzklassenraums und den weiteren Zonen

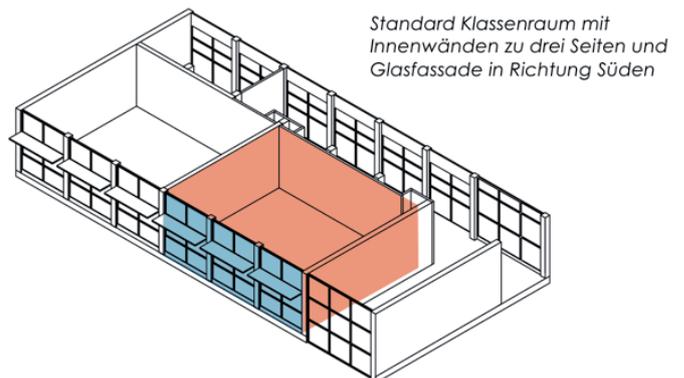


Abb. 91: Darstellung des Referenzklassenraums

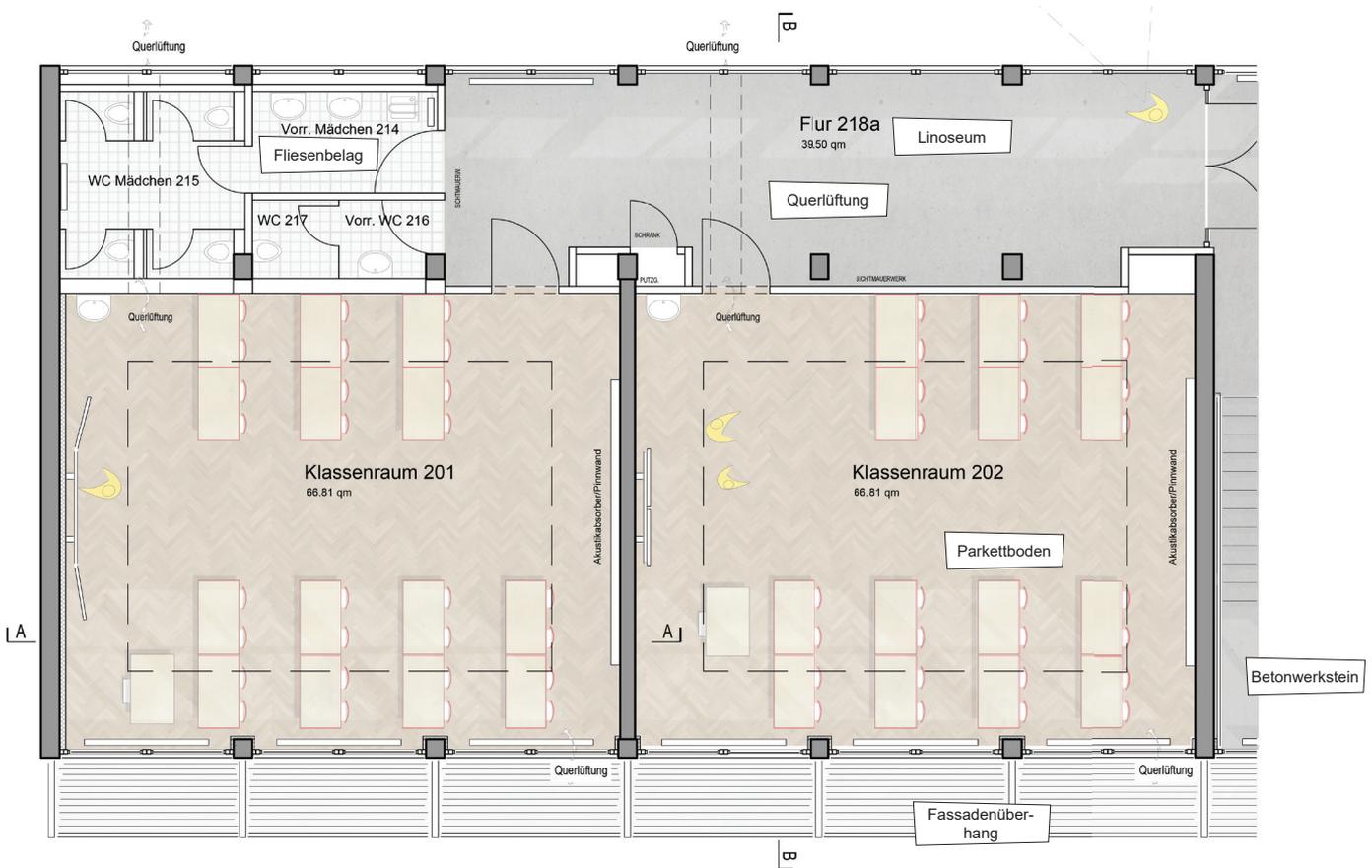


Abb. 92: Betrachtete Klassenzimmer im 2. OG

Variante 2 – Thermische Speichermasse + Nachtlüftung

Um auch im Sommer einen hohen Komfort zu ermöglichen wurde in einem nächsten Schritt die momentan abgehängte Raumdecke zu 60% freigelegt, um die thermische Masse der darunterliegenden tragenden Betonstruktur nutzen zu können. In Verbindung mit einer nächtlichen Durchlüftung kühlt sich diese ab, strahlt an warmen Tagen die gespeicherte Kälte in den Raum ab und erhöht den Komfort.

Variante 3 – Überhang

Da der Sonneneintrag durch die exponierte südorientierte großflächige Glasfassade sehr hoch ist, wird in dieser Variante ein außenliegender Überhang ergänzt, der entsprechend Günter Behnischs Entwurf zwischen den Sichtfenstern und Oberlichtern angebracht ist. Dieser lenkt die direkte Sonneneinstrahlung so ab, dass sie nicht durch die klaren Sichtfenster in den Raum gelangen. Der Wärmeeintrag wird reduziert.

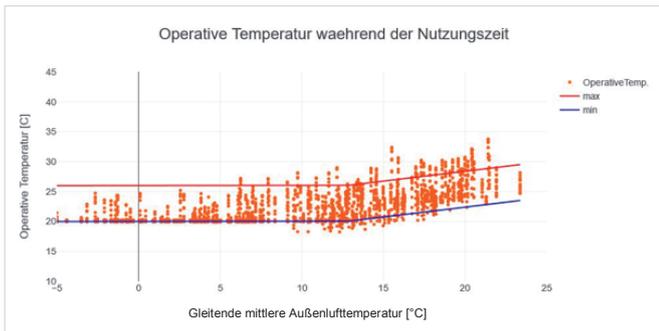
Variante 4 – Optimierung Oberlicht

Das transluzente Oberlicht lässt einen sehr großen Teil der Sonnenstrahlung diffus in den Raum. Um Wärmeeintrag und Blendungsrisiko weiter zu mindern wird daher das Glas durch eine innenliegende Bedruckung der äußeren Scheibe optimiert. Diese Rasterbedruckung reduziert die solare Einstrahlung entscheidend und bietet gestalterisch ein hohes Integrationspotential.

Mit dieser Variante, inklusive aller zuvor beschriebenen Interventionen, wird wie im Folgenden dargestellt ein optimierter Komfort erzielt. Diese Variante wurde als Ausgangspunkt für die weiteren getesteten Räume herangezogen.

Variante 5 – Lamellenbehang

Als eine Alternative wurde anstelle des Überhangs ein außenliegender Lamellenbehang getestet. Bei dieser Variante werden ebenfalls das Flurlüftungssystem, sowie die thermische Masse der Decke mit Nachtspülung genutzt.



0 Kh Überschreitung des Komfortbereichs

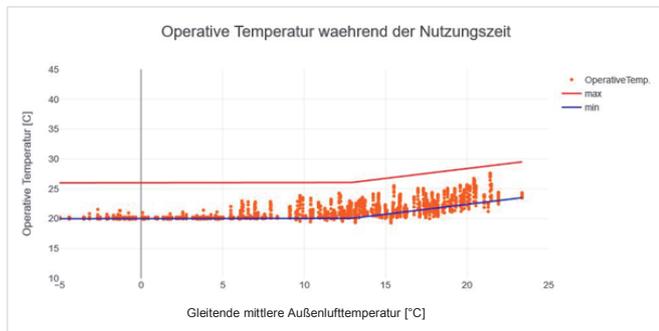


Abb. 93: Vergleich des thermischen Komforts eines Standard Klassenraums (V4) im Vergleich zur Basisvariante (V0)

Variante 6 – Hochisolierende Fassade

Um eine Aussage über die Relevanz der Qualität der Fassade treffen zu können wurde in einer letzten Variante eine Auswechslung der Fassade durch eine hochisolierende 3-fach Verglasung und entsprechender Rahmen getestet. Auch hier wurde das Durchlüftungs- und Heiz-/Kühlkonzept angewendet und der Überhang mit optimierten Oberlicht als Sonnenschutz vorgesehen.

5.3.2. Thermischer Komfort

Um den thermischen Komfort während des Betriebes zu evaluieren und um die Verhältnisse für den Komfort im Innenraum mit den tatsächlichen Randbedingungen in der entsprechenden Klimazone (in diesem Fall Göppingen) zu beschreiben, wurde die DIN EN 15251 herangezogen.

Die Ergebnisse werden in den folgenden Komfortgrafiken visualisiert. Jeder einzelne dargestellte Punkt repräsentiert eine Stunde des Jahres während der Nutzungszeit. Die x-Achse stellt den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur dar. In der Norm wird der gleitende Mittelwert der Außentemperatur ausgewertet um die menschliche Körperanpassung in Abhängigkeit der Saison zu berücksichtigen. Die Norm betrachtet nicht nur die Lufttemperatur, sondern auch Oberflächentemperaturen, welche das Komfortempfinden im Innenraum beeinflussen und als operative Temperatur bezeichnet wird.

Die untere rote und blaue Linie definieren den empfohlenen Komfortbereich. Um die Verständlichkeit zu ver-



Fassaden-Strahlungskälte
Bei -8°C Außentemperatur

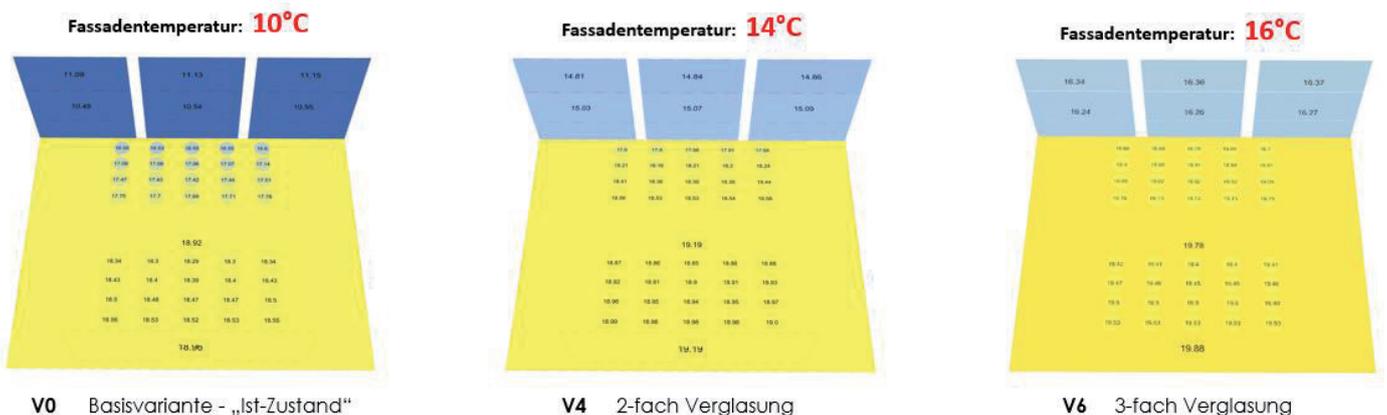
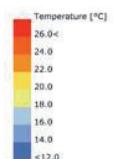


Abb. 94: Temperatur Fassadenoberfläche-lokalen operativen Temperaturen

bessern ist es möglich die Grafiken gedanklich in zwei Hauptperioden zu unterscheiden: Winter (links) und Sommer (rechts).

Wie zuvor ist eine maximale Anzahl an Kelvinstunden der Überschreitung (235Kh für die Klassenräume) erlaubt. In den Flurbereichen ist das Maximum höher angesetzt, da es sich nicht um Aufenthaltsbereiche handelt.

Alle Räume erfüllen die Anforderungen der DIN EN 15251, weil die Anzahl der Kelvinstunden unter dem vorherig definierten Schwellenwert liegt.

In den stark belegten Klassenräumen sind eine angemessene hygienische Belüftung im Winter sowie eine exponierte Decke (Nachluftauskühlung) im Sommer die Schlüsselfaktoren um den Komfort im Innenraum zu optimieren.

5.3.3. Strahlungskälte – Kalte Oberflächen

Ein entscheidender Faktor für den empfundenen Komfort in den Klassenräumen, sowie die Wärmeverluste ist die Strahlungskälte der Fensterflächen. Ein zu hoher Temperaturunterschied zwischen den Oberflächen und den Personen wird als unangenehm empfunden. Zudem ergeben sich durch kalte Außenflächen hohe Wärmeverluste die zu einem erhöhten Energiebedarf führen. Die Simulationen zeigen die Fassadentemperatur im Vergleich zu den operativen Temperaturen an unterschiedlichen Positionen im Raum. Betrachtet wird ein kalter Wintertag mit einer Außentemperatur von -8°C. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verbesserung der 2-fach Verglasung

bereits eine Änderung der Glastemperatur von 4°C bewirkt. Der Unterschied zwischen der verbesserten 2-fach Verglasung zur 3-fach Verglasung beträgt lediglich einen weiteren Anstieg um 2°C.

5.3.4. Tageslichtqualität

Gleichzeitig zu den thermischen Simulationen wurden Tageslichtsimulationen durchgeführt. In Anbetracht der Nutzung des Gebäudes ist der visuelle Komfort ein essentieller Aspekt um in den Räumen gute Lernverhältnisse für Schüler zu erreichen. Außerdem zeigen zahlreiche Studien eine starke Verbindung zwischen Tageslicht in Innenräumen und der menschlichen Gesundheit.

Die Tageslichtautonomie gibt an zu wie viel Prozent über das Jahr die erwünschte Beleuchtungsstärke von mindestens 300 lux auf der Arbeitsfläche während der Nutzungszeit durch das Sonnenlicht erreicht werden. Angestrebt wird eine Tageslichtautonomie von über 50%. Diese wird aufgrund der großen in Richtung Süden orientierter Sichtfenster- und Oberlichtflächen, in allen Varianten erreicht.

5.3.5. Belendungspotenzial

Die Fensterflächen liefern nicht nur Tageslicht zur natürlichen Beleuchtung, sondern können auch Blendeffekte erzeugen. Vor allem das transluzente Oberlicht streut Sonnenlicht in den Raum. Der Wert sollte 6000 cd/m² nicht überschreiten und das Blendungspotential unter 0.35 liegen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Optimierung des Oberlichts durch eine Bedruckung das Blendungspotential reduziert werden kann auf 0.33.



Erwünscht ist eine möglichst lange natürliche Beleuchtung von > 300 lux auf der Arbeitsebene.

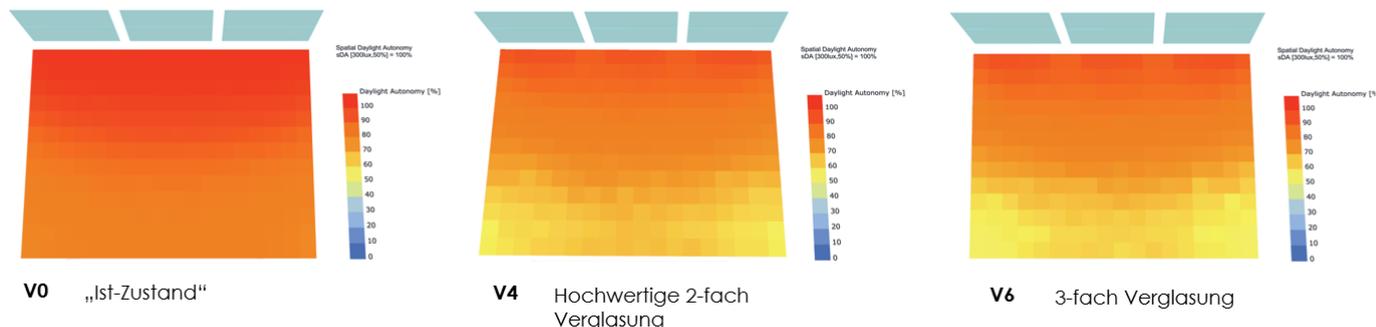


Abb. 95: Temperatur Fassadenoberfläche-lokalen operativen Temperaturen

5.3.6. Luftqualität

Zahlreiche Studien zeigen, dass in Klassenräumen die Luftqualität auf Grund mangelnder Lüftung sehr unbefriedigend ist. Dies wurde auch entsprechend in dem Basismodell abgebildet und ist in Abbildung 96 (oben) ersichtlich. Auf der x-Achse ist die gleitende mittlere Außenlufttemperatur dargestellt in der Relation zu der Luftqualität auf der y-Achse in CO₂ Volppm. Der empfohlene Zielwert für die Luftqualität ist 1.200 ppm. Wie ersichtlich ist aus den Ergebnissen der Variante 4, mit einer unterstützten Frischlufteinbringung, kann die CO₂-Qualität auf einem sehr komfortablen Niveau gehalten werden Abbildung 96 (unten).

5.3.7. Akustik

Das Ergebnis der Nachhallzeitmessung (Abbildung 5, S. 15) zeigt, dass die aktuelle IST-Situation zum Großteil eine akustische Qualität bietet, entsprechend der dargestellten Grenzbereiche. Im weiteren Verlauf der Planung ergibt sich deshalb das Potential, ohne massive Erhöhung der Akustikflächen zu arbeiten.

5.4. Weitere betrachtete Räume

Um über das oben genannte Konzept eine allgemeinere Aussage treffen zu können, wurden die vorgenommenen Maßnahmen auch auf andere Räume übertragen und bewertet (Abbildung 97). Als Grundlage wurde für die Nutzungsräume das Lüftungs- und Energiekonzept der Variante 4, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, herangezogen.

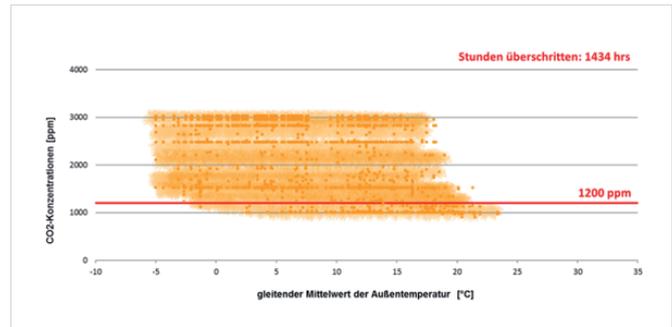
5.4.1. Klassenzimmer an der Relief-Fassade (Raum 201)

Die Klassenräume an den beiden Stirnseiten in Richtung Ost und West unterscheiden sich zu dem vorher betrachteten Klassenraum durch die ungedämmte Betonaußenwand nach Westen. Diese Wand ist jeweils mit einer zwei Zentimeter dicken Korkwand bedeckt. Zunächst wurde der Raum mit den identischen Maßnahmen aus Variante 4 getestet. In einem zweiten Schritt wurde der Raum mit einer zusätzlichen innenliegenden Dämmung, die den U-Wert der Außenwand auf ca. 0,25 verbessert, untersucht (V8). Die Energieeinsparung an Heizbedarf durch diese Maßnahme liegt bei über 20 kWh/m²a.

5.4.2. Lehrerzimmer (Raum 105)

Das Lehrerzimmer wurde ebenfalls unter Berücksichtigung der Maßnahmen getestet und mit geänderten Rahmenbedingungen der Nutzung betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ziele hinsichtlich des thermischen und visuellen Komforts erfüllt werden.

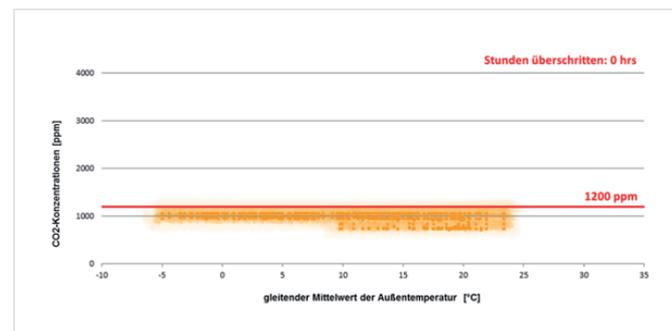
CO₂ CO₂ Grenzwert überschritten
1436 h



V0

„Ist“-Zustand

CO₂ CO₂ Grenzwert überschritten
0 h



V4

- + Fassadenerneuerung + Dauerlüftung
- + Thermische Speichermasse + Nachluftspülung
- + Baulicher Sonnenschutz (Überhang)
- + Optimierung Oberlicht

Abb. 96: Luftqualität eines Klassenraums (V4) im Vergleich zur Basisvariante (V0)

5.4.3. Biologie – Süd (Raum 103)

Die Naturwissenschaftsräume im Südgebäude sind im Gegensatz zu den Klassenräumen des Hauptflügels nach Norden hin nicht durch einen Flur begrenzt, sondern schließen mit einer nicht isolierten Betonaußenwand ab. Um den dadurch entstehenden unangenehmen Komforteinschränkungen und den hohen Heizbedarf zu senken, wurde in einer verbesserten Variante (V11) diese Außenwand ebenfalls mit einer effektiven innenliegenden Dämmung versehen. Die Simulation ergibt, dass sich dadurch der Heizbedarf für diesen Raum um ca. 50% reduzieren lässt.

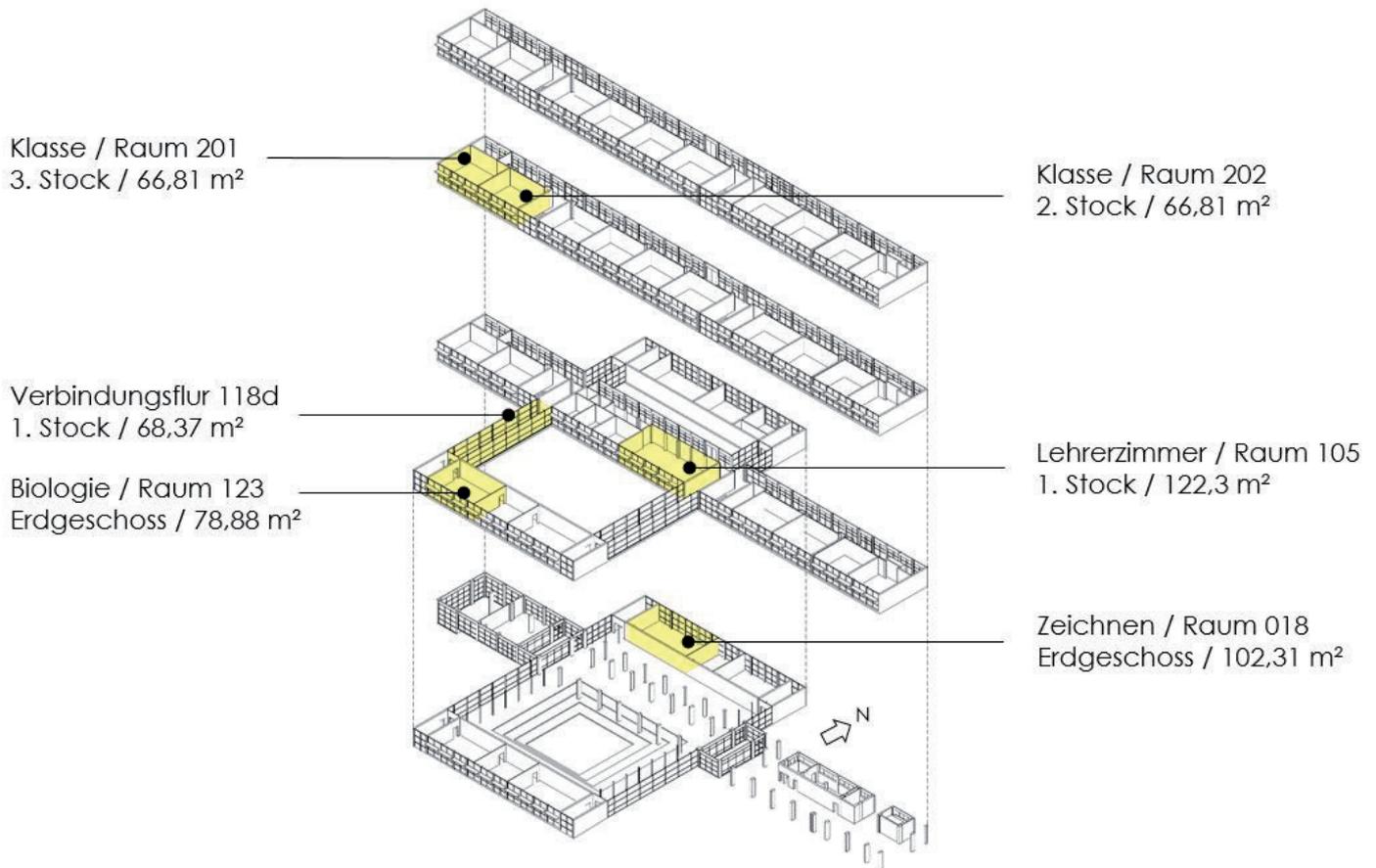


Abb. 97: Darstellung der weiteren untersuchten Räume

5.4.4. Zeichnen – Nordbau (Raum 018)

Wie bei dem zuvor getesteten Biologie-Saal weisen die Klassenräume im nördlichen Gebäude eine großflächige, ungedämmte Außenwand auf. In diesem Fall jedoch ist die Orientierung des Raumes zusätzlich um 180° gedreht, sodass die Fensterfassade nach Norden ausgerichtet ist. In diesen Räumen wird kein Überhang als Sonnenschutz vorgesehen. Wie bei den Südräumen kann durch eine zusätzliche Dämmung der Betonaußenwand (V13) der Komfort optimiert und der Heizbedarf reduziert werden.

5.4.5. Verbindungsflur (118d)

Der Verbindungsflur zwischen dem Hauptteil und den südlich liegenden Naturwissenschaftsräumen stellt eine besondere thermische Zone dar, da er nach Osten und Westen komplett verglast ist und fast die gesamten Hüllflächen an den Außenraum anschließen. Dies führt zu einer Überhitzung des Raumes im Sommer und einem erhöhten Heizbedarf in den Wintermonaten. Bei den Simulationen wurde die Verschattung durch den nebenstehenden Baum im Sommer berücksichtigt.

Um den winterlichen Komfort und Energiebedarf zu verbessern wird vorgeschlagen, die Verglasung wie bei den Klassenräumen durch eine hochwertige 2-fach Verglasung zu ersetzen. Zusätzlich sollten die Boden- und Deckenplatten umfassend gedämmt werden um die Energieverluste zu reduzieren. Damit im Sommer einer Überhitzung entgegengesteuert werden kann, sollten großflächig Öffnungsflügel für eine Querlüftung vorgesehen werden. Getestet wurde mit der Öffnung von jeweils drei der untersten und drei der obersten Fenstersegmente auf jeder Seite des Flures. Optimiert wird der Abkühlungseffekt durch eine Freilegung der thermischen Masse der Deckenplatte und eine Nachtlüftung über die Öffnungsflügel. Die nebenstehenden Bäume sollten erhalten bleiben um den sommerlichen Komfort zu optimieren. Eine weitere Begrünung der Glasfassade durch Rankengewächse, wie sie bereits teilweise schon auftritt, kann den Sommerlichen Komfort zusätzlich verbessern.

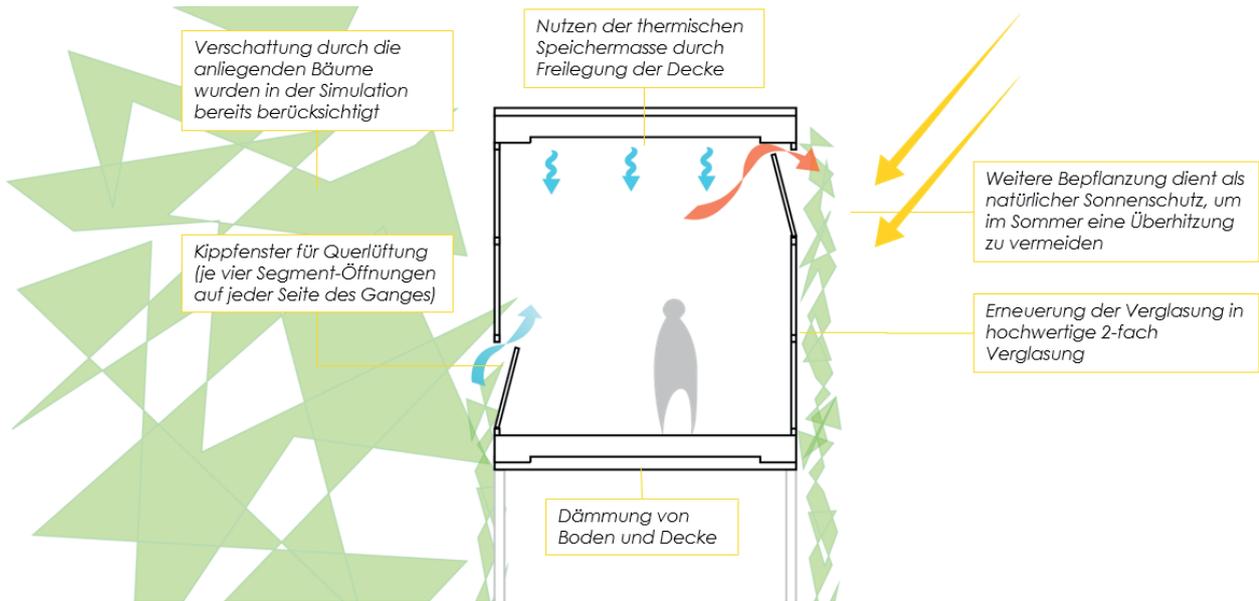


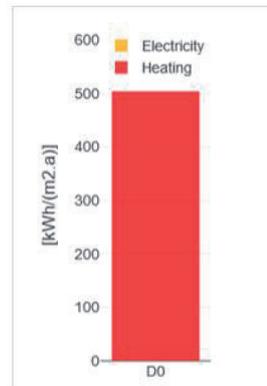
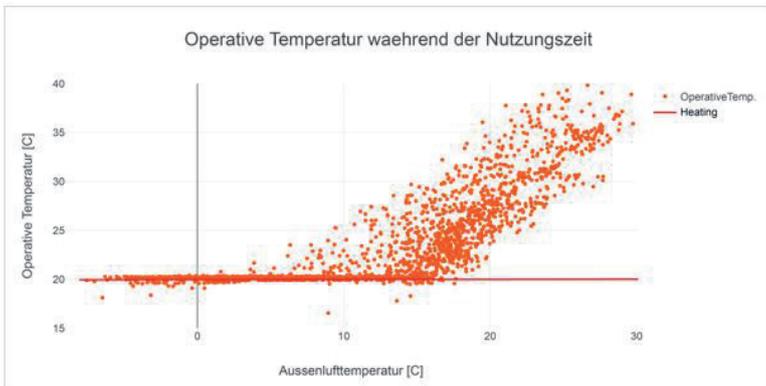
Abb. 98: Konzept für den Übergangsfur zwischen dem Haupt- und Südriegel



1210 Kh Überschreitung des Komfortbereichs



504 kWh/(m²a) Heizbedarf



85 Kh Überschreitung des Komfortbereichs



184 kWh/(m²a) Heizbedarf

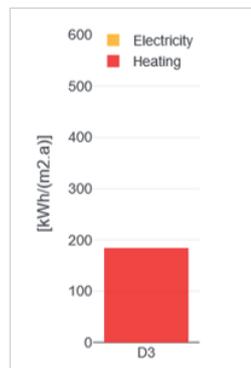
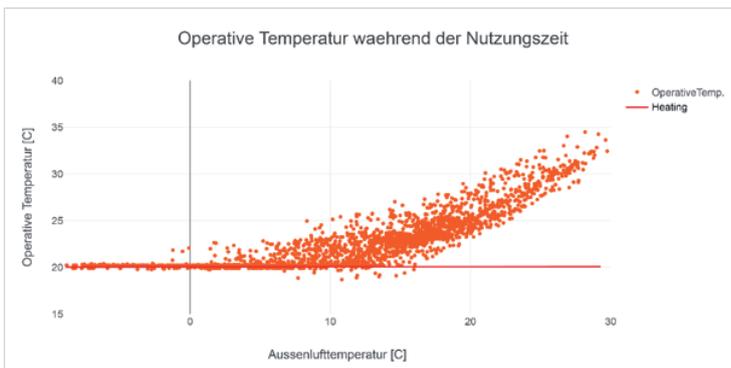


Abb. 99: Operative Temperatur und Energiebedarf ohne Maßnahmen (oben) und mit Maßnahmen (unten)

5.5. Energie

Neben einem hohen Komfort, ist ein angemessener Energiebedarf zur Konditionierung der Räume ein Faktor hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Im Folgenden wird der Energiebedarf der Klassenräume und überschlägig des gesamten Gebäudes unter Berücksichtigung der verschiedenen Energiebedarfe der untersuchten Räume, bzw. Raumnutzungen bewertet. Ein Vorschlag zur Energiegewinnung und eine Bilanz für das Energiekonzept werden abschließend dargestellt.

5.5.1. Energiebedarf – Optimierung der Lüftungseffizienz

Der Energiebedarf für den Referenzklassenraum 202 wurde auf verschiedene Arten ermittelt (siehe Abbildung 97, nächste Seite). Zunächst wurde ein Worst-Case-Szenario abgebildet, das eine durchgehende Nutzung des Raumes von 7 bis 18 Uhr annimmt (=100% Betrieb). Die Ergebnisse zeigen den Energiebedarf für Strom (gelb) und Heizen (rot). Dabei ergibt sich der Strombedarf aus dem Betrieb der Lüftung und der Beleuchtung der Räume während diesem Zeitraum. Der Nutzerstrom (etwa für Computer, Beamer, etc.) wird dabei nicht berücksichtigt. Der Heizbedarf setzt sich zusammen aus den Wärmeverlusten über die Fassade und die durch Lüftung verlorene Wärme.

Um das Potential eines bedarfsabhängigen Betriebes darzustellen, entspricht der Teilbelegung und Frischluftzufuhr nach CO₂-Regelung, wurde im Weiteren das Nutzungsprofil für Klassenräume basierend auf der SIA2024 (Richtlinien des Schweizer Ingenieurs- und Architektenverein) angewendet. Da die Systeme der Heizung und Lüftung lediglich nach Bedarf betrieben werden, verringert sich der Energiebedarf.

Als weitere Variante wurde die Integration einer Wärmerückgewinnung in das Lüftungssystem aufgenommen. Dieses reduziert den Energiebedarf zusätzlich, ist jedoch mit einem höheren technischen Aufwand verbunden der nach Bedarf in der Planung dann entsprechend von der Machbarkeit zu prüfen ist. Die Zuluft und die Abluft würden in diesem Fall voraussichtlich über ein Gerät in der Abhangdecke des Korridors gefördert und darin eine Wärmerückgewinnung integriert. Diese Lösung führt neben dem deutlichen Mehraufwand an technischer Installation (auch hinsichtlich der Investition) zu dem Bedarf von weiteren Durchbrüchen in der Außenfassade und zu dem Klassenraum (Achtung: Denkmalschutz).

Vergleicht man die Varianten zeigt sich, dass die 3-fach Verglasung gegenüber der 2-fach Verglasung eine geringe Reduktion des Wärmebedarfs von ca. 6kWh/(m²a) bewirkt. Diese geringe Reduktion resultiert daraus, dass der

Lüftungswärmeverlust dominierend ist und die internen Lasten während der Belegung entsprechend hoch sind, so dass der Raumheizbedarf in dieser Zeit minimiert ist.

Der steigende Heizbedarf durch den Lamellenbehang z.B. in Variante 5 erklärt sich durch geringere solaren Einträge, sofern der Behang nach unten gelassen wurde.

5.5.2. Energieerzeugungsfläche - Photovoltaik

Eine Dämmung des Daches sollte vorgesehen werden um den Energiebedarf zu senken. In diesem Zuge wird eine Belegung der dafür geeigneten Dachflächen mit PV empfohlen um den Strombedarf für die Lüftung und Beleuchtung mit nachhaltigen Ressourcen zu decken. Bei einer Belegung von 60% der Dachflächen, wie in folgender Abbildung dargestellt, wird eine PV-Fläche von ca. 830 m² erreicht.

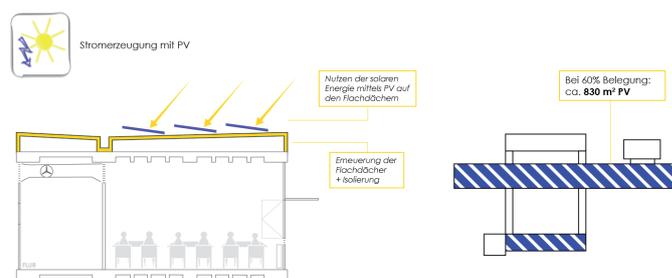


Abb. 100: Konzeptschnitt Dacherneuerung und PV Integration; Darstellung der Dachflächen die für die Kalkulation des jährlichen Stromertrags herangezogen wurde

Der jährliche Energiebedarf für das Gebäude wurde anhand der Fläche der Hauptnutzungsbereiche und Flure ermittelt. Grundlage bilden dabei die von uns vorgeschlagenen Maßnahmen für die Klassenräume (Variante 4) ohne Wärmerückgewinnung, ggf. mit jeweiliger zusätzlicher Optimierung der unterschiedlichen Räume (V8, V11, V13) und des empfohlenen Umbaus der Übergänge. Die Ergebnisse zeigen, dass der Strombedarf für den Gebäudebetrieb ohne Nutzerstrom durch die Stromerzeugung des PV-Dachs abgedeckt werden kann.

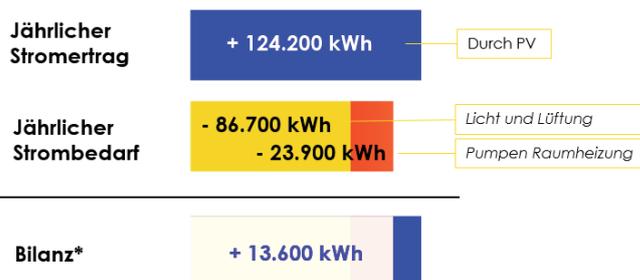


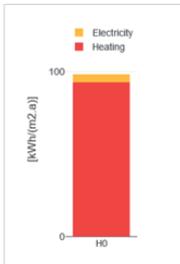
Abb. 101: Energiebilanz des Gebäudes mit vorgeschlagenen Interventionen und PV-Nutzung



100% Betrieb

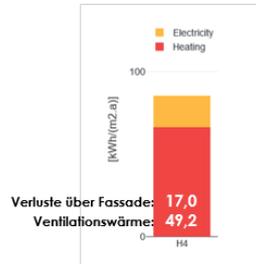
Energiebedarf = Strombedarf + Heizbedarf
(Strombedarf für Lüftung und Beleuchtung)

4,8 kWh/(m²a) Strom
93,6 kWh/(m²a) Heizen



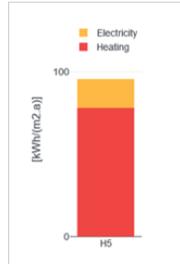
V0
Basisvariante

19,2 kWh/(m²a) Strom
66,2 kWh/(m²a) Heizen



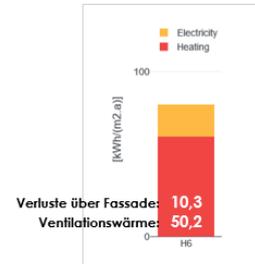
V4
2-fach Verglasung
+ Überhang

17,2 kWh/(m²a) Strom
78,1 kWh/(m²a) Heizen



V5
2-fach Verglasung
+ Lamellen

19,6 kWh/(m²a) Strom
60,5 kWh/(m²a) Heizen



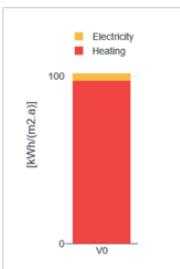
V6
3-fach Verglasung
+ Überhang



Bedarfsbetrieben

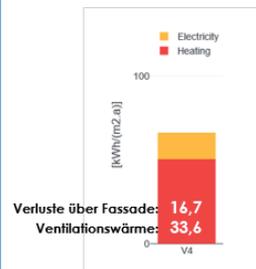
Energiebedarf = Strombedarf + Heizbedarf
(Strombedarf für Lüftung und Beleuchtung)

4,8 kWh/(m²a) Strom
96,9 kWh/(m²a) Heizen



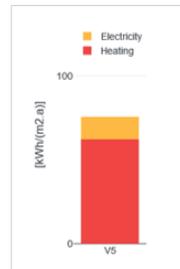
V0
Basisvariante

15,6 kWh/(m²a) Strom
50,5 kWh/(m²a) Heizen



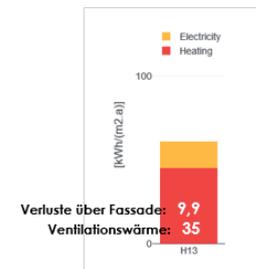
V4
2-fach Verglasung
+ Überhang

13,7 kWh/(m²a) Strom
62 kWh/(m²a) Heizen



V5
2-fach Verglasung
+ Lamellen

16,1 kWh/(m²a) Strom
44,9 kWh/(m²a) Heizen



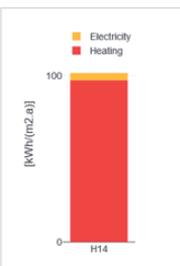
V6
3-fach Verglasung
+ Überhang



Bedarfsbetrieben + Wärmerückgewinnung

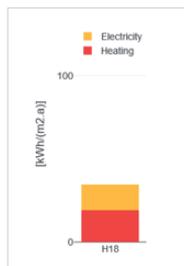
Energiebedarf = Strombedarf + Heizbedarf
(Strombedarf für Lüftung und Beleuchtung)

4,8 kWh/(m²a) Strom
96,9 kWh/(m²a) Heizen



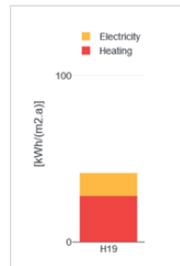
V0
Basisvariante

15,6 kWh/(m²a) Strom
19,3 kWh/(m²a) Heizen



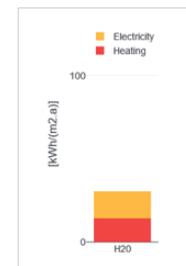
V4
2-fach Verglasung
+ Überhang

13,6 kWh/(m²a) Strom
28,2 kWh/(m²a) Heizen



V5
2-fach Verglasung
+ Lamellen

16,1 kWh/(m²a) Strom
14,4 kWh/(m²a) Heizen



V6
3-fach Verglasung
+ Überhang

Abb. 102: Energiebedarf für Strom und Heizen für die verschiedenen Fassadentypen, getestet mit einer Worst-Case Nutzungszeit (100% Betrieb), nach einem Teilbelegungsprofil und zusätzlich mit Wärmerückgewinnung

6. Fazit

Das Ergebnis des Forschungsprojekts kann durchwegs als positiv gewertet werden. Die in den Analysen gewonnenen Erkenntnisse sind als äußerst wertvoll einzustufen und ein wichtiger Beitrag bei Planungen zukünftiger Schulsanierungen. Hier ist insbesondere die Erkenntnis hervorzuheben, dass die Luftqualität in Schulen einen großen Diskussionspunkt darstellt. Durch die Luftdichtheit umfangreicher Modernisierungsmaßnahmen fehlen natürliche, bauliche Undichtigkeiten, so dass ein natürlicher Luftwechsel nicht mehr stattfindet. Die Luftqualität wie die CO_2 -Konzentration leiden darunter, so dass in den meisten Schulen durch eine mechanische Lüftungsanlage versucht wird, diese Probleme in den Griff zu bekommen. Die Untersuchungen zeigen, dass sich dadurch beide Parameter zwar deutlich verbessern, dabei im Winter aber häufig zu viel trockene Außenluft in die Klassenzimmer gebracht wird, wodurch die empfohlene Innenraumfeuchte zu stark sinkt. Außerdem zeigten die Befragungen der Schüler und Lehrer, dass die subjektive Wahrnehmung der Luftqualität nicht mit den guten Messergebnissen korreliert und eingeschränkte individu-

elle Steuerungsmöglichkeiten kritisiert werden. Deshalb ist der entwickelte Ansatz bei der Sanierungsplanung des Hohenstaufen-Gymnasiums eine Reaktivierung der natürlichen Querlüftung, wie sie auch ursprünglich schon umgesetzt war. So kann eine ausreichende Luftwechselrate bei gleichzeitig hohem Nutzereinfluss erreicht werden.

Durch die Analyse der ebenfalls unter Denkmalschutz stehenden Openluchtschool in Amsterdam konnten sinnvolle Erkenntnisse gewonnen werden, wie eine sensible Sanierung an einem Baudenkmal optimal umgesetzt werden kann. So kann auch beim Hohenstaufen-Gymnasium das ursprüngliche Erscheinungsbild beibehalten werden, bei gleichzeitiger Optimierung der Aufenthaltsqualität durch gezielte Maßnahmen wie einer verbesserten Dämmung im Brüstungsbereich und einer modernen 2-Scheibenverglasung. Parallel kann durch diese Maßnahmen der Heizwärmebedarf um die Hälfte reduziert werden.

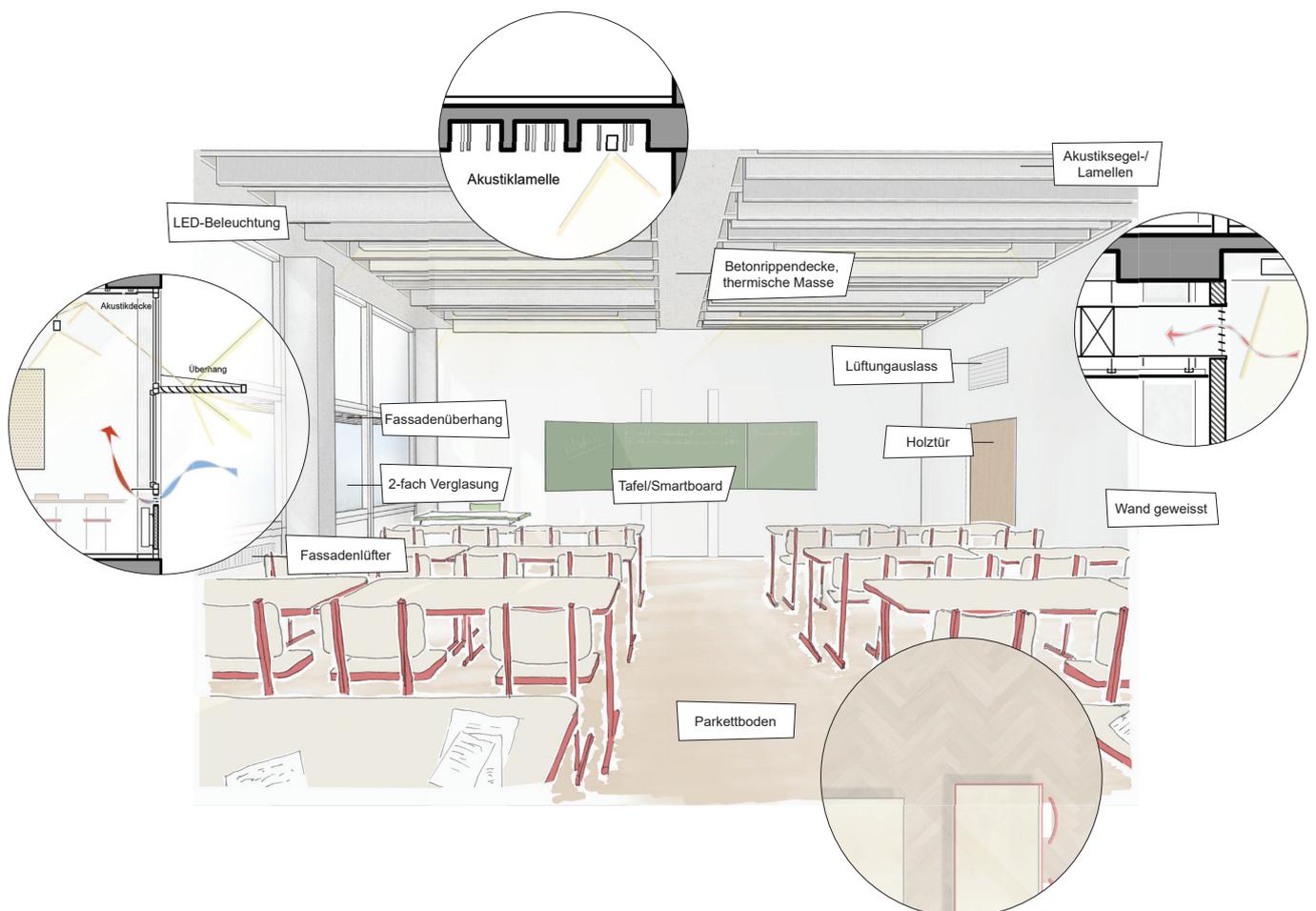


Abb. 103: Klassenraum mit vorgesehenen Sanierungsmaßnahmen

7. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Blick vom Freiluftatrium
- Abb. 2: Blick auf den 4-geschossigen Riegel mit seitlichem Fresko
- Abb. 3: Lageplan
- Abb. 4: Blick in ein Klassenzimmer
- Abb. 5: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Göppingen
- Abb. 6: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Göppingen
- Abb. 7: Fassadenschnitt
- Abb. 8: Kumulierte Wahrscheinlichkeit
- Abb. 9: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur
- Abb. 10: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur
- Abb. 11: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte
- Abb. 12: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, München
- Abb. 13: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, München
- Abb. 14: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, München
- Abb. 15: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, München
- Abb. 18: spez. Raumbedarf, München im unsanierten Zustand
- Abb. 16: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), München
- Abb. 17: Warme repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), München
- Abb. 19: spez. Raumbedarf, München im sanierten Zustand
- Abb. 20: Klassenraum in München
- Abb. 21: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, München
- Abb. 22: Continuous Daylight Autonomy (cDA), München
- Abb. 23: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Amsterdam
- Abb. 24: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Amsterdam
- Abb. 25: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Amsterdam
- Abb. 26: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Amsterdam
- Abb. 27: Kalte repräsentative Woche (07.11.-11.11.2016), Amsterdam
- Abb. 28: Warme repräsentative Woche (20.06.-24.06.2016), Amsterdam
- Abb. 29: spez. Raumbedarf, Amsterdam
- Abb. 30: Klassenraum in Amsterdam
- Abb. 31: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Amsterdam
- Abb. 32: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Amsterdam
- Abb. 33: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Köniz-Wabern
- Abb. 34: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Köniz-Wabern
- Abb. 35: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Köniz-Wabern
- Abb. 36: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Köniz-Wabern
- Abb. 37: Kalte repräsentative Woche (07.11.-11.11.2016), Köniz-Wabern
- Abb. 38: Warme repräsentative Woche (29.08.-02.09.2016), Köniz-Wabern
- Abb. 39: spez. Raumbedarf, Köniz-Wabern
- Abb. 40: Klassenraum in Köniz-Wabern
- Abb. 41: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Köniz-Wabern
- Abb. 42: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Köniz-Wabern
- Abb. 43: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Sonthofen
- Abb. 44: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Sonthofen
- Abb. 45: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Sonthofen
- Abb. 46: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Sonthofen
- Abb. 47: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Sonthofen
- Abb. 48: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Sonthofen
- Abb. 49: spez. Raumbedarf, Sonthofen
- Abb. 50: Klassenraum in Sonthofen
- Abb. 51: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Sonthofen
- Abb. 52: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Sonthofen
- Abb. 53: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Buchloe
- Abb. 54: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe
- Abb. 55: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe

- Abb. 56: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Buchloe
- Abb. 57: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Buchloe
- Abb. 58: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Buchloe
- Abb. 59: spez. Raumbedarf, Buchloe
- Abb. 60: Klassenraum in Buchloe
- Abb. 61: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Buchloe
- Abb. 62: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Buchloe
- Abb. 63: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Baesweiler
- Abb. 64: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Baesweiler
- Abb. 65: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Baesweiler
- Abb. 66: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Baesweiler
- Abb. 67: Kalte repräsentative Woche (25.04.-29.04.2016), Baesweiler
- Abb. 68: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Baesweiler
- Abb. 69: spez. Raumbedarf, Baesweiler
- Abb. 70: Klassenraum in Baesweiler
- Abb. 71: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Baesweiler
- Abb. 72: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Baesweiler
- Abb. 73: Bewertung der Luftqualität
- Abb. 74: Bewertung der Luftfeuchte
- Abb. 75: Bewertung des winterlichen Komforts
- Abb. 76: Bewertung des sommerlichen Komforts
- Abb. 77: Bewertung des akustischen Komforts
- Abb. 78: Bewertung des visuellen Komforts
- Abb. 79: Simulationsergebnisse für den Raumbedarf (Heizen, Kühlen, Kunstlicht und Hilfsenergie)
- Abb. 80: Simulationsergebnisse für das CO₂-Äquivalent
- Abb. 81: Simulationsergebnisse für die Energiekosten des Gebäudebetriebs
- Abb. 84: Freiflächen- und Grundrissplan nach der Sanierung
- Abb. 82: Verlauf der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 2015, Göppingen)
- Abb. 83: Monatliche solare Einstrahlung auf die Horizontale (Testreferenzjahr 2015, Göppingen)
- Abb. 85: Absolute Außenluftfeuchte über der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 2015, Göppingen)
- Abb. 86: Querschnitt BB nach der Sanierung
- Abb. 87: Konzeptschnitt Klassenraum Winter
- Abb. 88: Konzeptschnitt Klassenraum Sommer (tagsüber)
- Abb. 89: Konzeptschnitt Klassenraum Sommer (nachts)
- Abb. 90: Darstellung des Referenzklassenraums und den weiteren Zonen
- Abb. 91: Darstellung des Referenzklassenraums
- Abb. 92: Betrachtete Klassenzimmer im 2. OG
- Abb. 93: Vergleich des thermischen Komforts eines Standard Klassenraums (V4) im Vergleich zur Basisvariante (V0)
- Abb. 94: Temperatur Fassadenoberfläche-lokalen operativen Temperaturen
- Abb. 95: Temperatur Fassadenoberfläche-lokalen operativen Temperaturen
- Abb. 96: Luftqualität eines Klassenraums (V4) im Vergleich zur Basisvariante (V0)
- Abb. 97: Darstellung der weiteren untersuchten Räume
- Abb. 98: Konzept für den Übergangsflur zwischen dem Haupt- und Südriegel
- Abb. 99: Operative Temperatur und Energiebedarf ohne Maßnahmen (oben) und mit Maßnahmen (unten)
- Abb. 100: Konzeptschnitt Dacherneuerung und PV Integration; Darstellung der Dachflächen die für die Kalkulation des jährlichen Stromertrags herangezogen wurde
- Abb. 101: Energiebilanz des Gebäudes mit vorgeschlagenen Interventionen und PV-Nutzung
- Abb. 102: Energiebedarf für Strom und Heizen für die verschiedenen Fassadentypen, getestet mit einer Worst-Case Nutzungszeit (100% Betrieb), nach einem Teilbelegungsprofil und zusätzlich mit Wärmerückgewinnung
- Abb. 103: Klassenraum mit vorgesehenen Sanierungsmaßnahmen

Fotos Außenansicht und Klassenzimmer der untersuchten Schulen:
The Pk. Odessa Co. Simon Jüttner, Markus Lanz, Sebastian Schels

8. Literaturverzeichnis

- [1] Zit. nach: Gründewald, Stefan: Das HoGy-Gebäude, in: HoGy-Info 2016.
- [2] Ebd.
- [3] Wein, Eberhard: Frühwerk unter Denkmalschutz, in: Stuttgarter Zeitung, 23.3.2015.
- [4] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007, Stand: September 2007
- [5] DIN EN 15251: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007, Stand: Dezember 2012
- [6] DIN EN 1946-6: Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung, Stand: Mai 2009
- [7] DIN EN 18041: Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung, Stand: Mai 2016
- [8] Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und

