

Verein für freies Schulwesen, Waldorfschulverein e.V.

Abschlussbericht des Forschungsprojektes
Az: 33278/01-25 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

**Entwicklung von beispielhaften Neubaumaßnahmen für die
Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart auf Basis von
Messungen und Analysen neugebauter Schulen**

Stuttgart, September 2017

Verein für freies Schulwesen, Waldorfschulverein e.V.

Abschlussbericht des Forschungsprojektes
Az: 33278/01-25 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

**Entwicklung von beispielhaften Neubaumaßnahmen für die
Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart auf Basis von
Messungen und Analysen neugebauter Schulen**

Thomas Auer, Philipp Vohlidka, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TU München
Christian Frenzel, Eckehart Ullmer, Tommaso Bitossi, Vu Hoang, Pedro Ribas, Transsolar Energietechnik GmbH
Stefan Behnisch, Matthias Jäger, Behnisch Architekten

Stuttgart, September 2017

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33278/01-25	Referat	14	Fördersumme	103.980 €
Antragstitel	"Entwicklung von beispielhaften Neubaumaßnahmen für die Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart auf Basis von Messungen und Analysen neugebauter Schulen "				
Stichworte	Schulbau, Schulen				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	06.01.2016	30.06.2017	8		
Abschlussbericht					
Bewilligungsempfänger	Verein für ein freies Schulwesen, Waldorfschulverein e.V. Freie Waldorfschule Uhlandshöhe Frau Elisabeth Beck-Seith Haußmannstr. 44 70188 Stuttgart			Tel	0711/2100224
				Fax	0711/2100255
				Projektleitung	Frank Hübner
				Bearbeiter	
Kooperationspartner					

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Auf dem Schulgelände der Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart sollen zwei bestehende Gebäude abgerissen werden und an ihrer Stelle ein neues Schulgebäude mit ca. 5.500 m² BGF entstehen. Neben dem hohen architektonischen und städtebaulichen Anspruch steht auch der Gedanke der Nachhaltigkeit im Mittelpunkt, vom Bauherren wird eine ganzheitliche Betrachtungsweise gewünscht. Die reicht von der Erfüllung des in naher Zukunft gesetzlich geforderten Niedrigstenergiestandards bis hin zur Schaffung einer behaglichen Aufenthaltsqualität für die Schüler, alles unter der Prämisse eines "einfachen Bauens".

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Um den hohen Anforderungen an Energieeffizienz, verwendeten Materialien und Aufenthaltsqualität für den neuen Baukörper der Waldorfschule gerecht zu werden, mussten geeignete Maßnahmen entwickelt werden. Dabei wurde der Blick geweitet auf andere neu gebaute Schulen: fünf repräsentative Beispielschulen wurden dafür umfassend analysiert, um zu einer Beurteilung der dort umgesetzten Lösungsansätze zu gelangen und Rückschlüsse auf das neu zu errichtende Gebäude der Waldorfschule ziehen zu können. Neben der Erfassung und Analyse der Innenraumqualität durch Messungen (Temperatur, relative Feuchtigkeit, CO₂-Konzentration, Raumakustik) wurden die gebauten Schulen auf ihre architektonische, bauphysikalische und gebäudetechnische Beschaffenheit hin umfassend untersucht. Die Analyse wurde ergänzt durch dynamische Gebäudesimulationen, um den Energiebedarf und die Tageslichtausnutzung zu bestimmen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse der untersuchten Beispielschulen könnten Rückschlüsse abgeleitet werden, worauf bei zukünftigen Schulneubauten und im speziellen bei der Planung der Waldorfschule zu achten ist. Die entwickelten Planungsansätze wurden von einem interdisziplinären Team in einem iterativen Prozess an der Waldorfschule direkt getestet und angewandt.

Im Folgenden die durchgeführten Arbeitsschritte:

AP1: Innenraummessungen und Nutzerbefragungen an bestehenden Schulneubauten (TU München)

AP2: Analyse Gebäude- und Haustechnikkonzept der bestehenden Schulneubauten (TU München)

AP3: Auswertung, Gegenüberstellung und Beurteilung der Messergebnisse (TU München)

AP4: Lebenszyklusanalyse und Untersuchung verschiedener Baustoffe auf die Aufenthaltsqualität der Waldorfschule (TU München)

AP5: Entwicklung von Handlungsempfehlungen für zukünftige Schulneubauten (TU München)

AP6: Anwendung der erarbeiteten Handlungsempfehlungen auf die Planung der Waldorfschule (Behnisch Architekten)

AP7: Gebäudesimulation und Entwicklung eines Energie- und Klimakonzepts für die Waldorfschule (Transsolar)

Ergebnisse und Diskussion

Das Konzept der Waldorfschule zeichnet sich im Wesentlichen durch folgende Merkmale aus:

- Nutzung und Optimierung passiver Strategien zur Reduzierung von Wärmebedarf und Kunstlicht
- Hybrider Lüftungsansatz für gute Luftqualität trotz Verzichts auf eine konventionelle mechanische Lüftungsanlage. Die Zuluft wird über einen Erdkanal vorkonditioniert in das zentrale Atrium und mittels aktiver Überströmelemente in die Klassenzimmer gebracht. Die eingesparten Kosten der mechanischen Lüftungsanlage können für eine großflächige Photovoltaikanlage herangezogen werden
- Nutzung von lokalen Wärmequellen durch das bestehende BHKW
- großflächige Integration von Photovoltaik in der Dachlandschaft

Bilanziell resultiert in Summe ein Primärenergiebedarf von lediglich 0,26 kWh/m²a, so dass ein Nearly Zero Energy Standard erreicht 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, vorangegangene Untersuchung der 5 beispielhaften neugebauten Schulen konnten wichtige Rückschlüsse für die Planung des neuen Schulgebäudes für die Waldorfschule 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 Wärmeenergieerzeugung.
- 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.	Analysen neugebauter Schulen	12
3.1.	Methodik	13
3.1.1.	Methodik der Messungen	13
3.1.2.	Methodik der Simulationen	14
3.1.3.	Methodik der Umfrage	15
3.2.	Analysen und Ergebnisse	16
3.2.1.	Schule im Scharnhauser Park, Ostfildern	16
3.2.2.	Max-Born-Berufskolleg, Recklinghausen	19
3.2.3.	Berufliche Oberschule Erding.....	22
3.2.4.	Gymnasium Buchloe.....	25
3.2.5.	Schmuttertal-Gymnasium Diedorf.....	28
3.2.6.	Aufenthaltsqualität und Lernfähigkeit.....	31
3.2.7.	Luftqualität.....	32
3.2.8.	Luftfeuchte.....	33
3.2.9.	Thermischer Komfort.....	33
3.2.10.	Akustischer Komfort.....	34
3.2.11.	Visueller Komfort.....	35
3.3.	Rückschlüsse auf die Technik und den Energiebedarf.....	36
3.3.1.	Regelung und Instandhaltung der Technik.....	36
3.3.2.	Von der Energieerzeugung zum Energiebedarf.....	37

4.	Integrale Planung der Waldorfschule Uhlandshöhe	38
4.1.	Klimaanalyse.....	38
4.2.	Architektonisches Konzept.....	39
4.2.1.	Baugrundstück.....	39
4.2.2.	Baukörper.....	39
4.2.3.	Gebäude.....	41
4.2.4.	Verkehr.....	41
4.2.5.	Außenraum.....	41
4.3.	Voruntersuchung verschiedener Baustoffe auf die Aufenthaltsqualität und die Lebenszyklusanalyse.....	42
4.4.	Haustechnikkonzept.....	46
4.4.1.	Beschreibung des Lüftungskonzeptes.....	46
4.4.2.	Heizung und passive Kühlung	49
4.5.	Thermische Simulation	50
4.6.	Tageslichtsimulation.....	52
4.7.	Energiebedarf.....	54
5.	Fazit.....	55
6.	Abbildungsverzeichnis.....	58
7.	Literaturverzeichnis.....	60

1. Zusammenfassung

Auf dem Gelände der freien Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart wird wegen Platzmangels ein Bestandsgebäude durch einen Neubau ersetzt.

Für den geplanten Neubau war das energetische Ziel, dieses im Nearly Zero Energy Standard zu errichten. Die hohen Anforderungen an die Energieeffizienz gelten auch für die Aufenthaltsqualität in dem neuen Baukörper.

Um dies zu erreichen, wurde zur Grundlagenermittlung in einem ersten Schritt eine intensive, ganzheitliche Analyse von fünf bestehenden Schulneubauten durchgeführt. Die Untersuchungen an diesen Beispielschulen, von denen drei DBU-gefördert sind, sollten zu einer Beurteilung der dort umgesetzten Lösungsansätze führen und Rückschlüsse auf das neu zu errichtende Gebäude der Waldorfschule 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 Architekt-

ur- und dem Ingenieurbüro auf die neue Waldorfschule weitestgehend umgesetzt worden. Unverzichtbarer Bestandteil der Planung waren zahlreiche Simulationen, um sowohl die Aufenthaltsqualität als auch Tageslicht immer weiter zu optimieren. Somit wurden die Maßnahmen zum Errichten einer hervorragenden Energieeffizienz nicht auf einen bestehenden Gebäudeentwurf aufgesetzt sondern sind vielmehr integraler Bestandteil der Architektur, so dass auf wirtschaftliche Weise ein Nearly Zero Energy Standard erreicht werden kann.

Folgende Grundlagen wurden dafür umgesetzt:

- Nutzung und Optimierung passiver Strategien zur Reduzierung von Wärmebedarf und Kunstlicht
- hybrider Lüftungsansatz für gute Luftqualität trotz Verzichts auf eine konventionelle mechanische Lüftungsanlage. Die Zuluft wird über einen Erdkanal vor-konditioniert in das zentrale Atrium und mittels aktiver Überströmelemente in die Klassenzimmer gebracht. Die eingesparten Kosten der mechanischen Lüftungsanlage können für eine großfläche Photovoltaikanlage herangezogen werden
- Nutzung von lokalen Wärmequellen durch das bestehende BHKW
- großflächige Integration von Photovoltaik in der Dachlandschaft

Bilanziell resultiert in Summe ein Primärenergiebedarf von lediglich 0,26 kWh/m²a, so dass ein Nearly Zero Energy Standard erreicht werden kann.



2. Einleitung

Durch den fortschreitenden Klimawandel sind politische Entscheidungsträger gezwungen, Maßnahmen zur Verringerung der CO₂-Emissionen zu ergreifen. So sieht die Richtlinie 2010/31/EU [1] vor, dass ab 2021 alle Neubauten Niedrigstenergiegebäude sein müssen. Das bedeutet, dass ein Gebäude eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz aufweisen und seinen geringen Energiebedarf zu einem wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen decken muss. Diese Anforderung betrifft folglich auch Schulgebäude. Dabei werden neue Schulen nicht nur gebaut, wenn Kommunen einen Bevölkerungsanstieg verzeichnen und eine immer größere Anzahl von Schülern aufnehmen müssen. Gründe können ein höherer und flexibler nutzbarer Platzbedarf auf Grund von neuen innovativen Unterrichtskonzepten ebenso sein wie die Zusammenfügung von mehreren Schulstandorten zu einem gemeinsamen oder weil bestehende Schulgebäude nicht mehr sanierungsfähig sind.

Entscheiden sich die Verantwortlichen für einen Schulneubau, muss eine Bandbreite von gesetzlichen Vorschriften, von der Einhaltung der Energieeinsparverordnung, über finanzielle Fragestellungen des Invest und deren Auswirkungen auf die laufenden Kosten, bis zu nachhaltigen Entscheidungsfindungen, wie den Einsatz von grauer Energie verschiedener Baustoffe, beachtet und getroffen werden. Vor allem ein gut durchdachtes, energetisches, gesamtheitliches Konzept hat dabei auf viele Punkte einen großen Einfluss. Ziel sollten idealerweise nicht nur geringe Energieverbräuche, sondern auch eine optimale Aufenthaltsqualität in den Räumen sein. Diese Behaglichkeitskriterien, von einer gleichmäßigen und blendfreien Belichtung der Klassenräume bis zur bedarfsgerechten Versorgung mit Frischluft, können durch die heutigen technischen Möglichkeiten problemlos erfüllt werden. Dennoch stellt sich die Frage, ob der Königsweg wirklich das hochaufgerüstete Technikkonzept ist, wie es in der vergangenen Dekade oft umgesetzt wurde, oder ob nicht eine intelligente Bauweise mit vielen passiven Maßnahmen und einer einfachen Technik die gewünschten Behaglichkeitsziele erbringt, ganz im Sinne von „Einfach Bauen“. Während Innovationen und neue technische Entwicklungen heute immer schneller aufeinander folgen und auch im Bauwesen so gut wie alles möglich machen, findet gleichzeitig eine Rückbesinnung statt auf die Einfachheit der Dinge. Ein reduziertes Technikkonzept welches dabei gleichermaßen den Invest und die laufenden Kosten gering hält, ist vor allem für die Träger von Schulen ein sehr wichtiger Punkt. Dabei geht es um die Frage, ob unsere Gebäude übertechnisiert sind. Ebenso wird die Frage der baulichen Komplexität betrachtet, da sich durchgeführte Maßnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität gegenseitig beeinflussen: eine Akustikdecke, welche die Nachhallzeiten in den Räumen reduziert, verhindert gleichzeitig eine natürliche

Nachtabkühlung, da die thermischen Speichermassen der Geschossdecken nicht mehr zur Verfügung stehen. Eine installierte mechanische Lüftungsanlage zur Sicherstellung von ausreichend Frischluft und der Einhaltung der CO₂-Grenzwerte bedingt laufende Kosten durch Wartungsaufwand und einen erhöhten Stromverbrauch des Gebäudes. Ein vergrößerter Fensterflächenanteil bringt mehr Tageslicht in die Klassenräume, gleichzeitig addieren sich zu den hohen internen Lasten, auf Grund der Personenanzahl, hohe solare Einträge, die im Sommer zu einer Überhitzung führen können.

2.1. Beschreibung der Ausgangssituation

Die freie Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart, die erste Waldorfschule überhaupt, wurde 1919, direkt nach dem 1. Weltkrieg, von Emil Molt als Betriebsschule für die Kinder der Waldorf-Astoria-Zigarettenfabrik gegründet. Mittlerweile finden sich auf dem großzügigen Schulgelände, das sich in zentrumsnaher Lage auf der Uhlandshöhe befindet, mehrere Einzelgebäude aus unterschiedlichen Jahrzehnten wieder (Abb. 1).



Abb. 1: Übersichtsplan der bestehenden Gebäude auf dem Grundstück der Waldorfschule Uhlandshöhe

Die Verwaltung, einige Unterrichtsräume sowie sieben Bedienstetenwohnungen sind im ältesten Gebäude untergebracht, das in der Gründerzeit als „Café Uhlandshöhe“ errichtet und nach dem Krieg aufgestockt wurde. Ein großer Teil der Unterrichtsräume ist im Haupthaus untergebracht, das nach der Zerstörung im 2. Weltkrieg 1953 wieder aufgebaut wurde. Der Campus der Schule wurde bis in die Siebzigerjahre mit dem Saalbau, dem Seminarbau und dem Mittagshaus, dem Kindergarten und der Turnhalle ergänzt. 2007 wurde der Hortbau errichtet, in dem Räume für die erweiterte Betretung der Schüler und Schülerinnen, das Schülercafé und die Bibliothek untergebracht sind.

Aktuell wird die zweizügige Schule von ca. 940 Schülern besucht. Durch den in den letzten Jahren entstandenen höheren Bedarf an Ganztagsbetreuung sind allerdings Umstrukturierungen auf dem Gelände notwendig, da der zur Verfügung stehende Platz nicht mehr ausreicht. Zudem sind im Laufe der Jahre die vorhandenen Räumlichkeiten für die Naturwissenschaften zu klein geworden und veraltet. Bereits im Zuge der Vorplanungen für den Hortbau wurde eine umfassende Analyse der Raumbedarfe begonnen. Im Rahmen von Machbarkeitsstudien wurde seit 2014 untersucht, wo welche Bedarfsflächen sinnvollerweise errichtet werden sollten. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde nach einem Standort für einen Oberstufenneubau gesucht, in dem neben Unterrichtsräumen für die Oberstufe auch ein Speisesaal mit dazugehöriger Küche sowie Lagerflächen und Stellplätze in einer Tiefgarage untergebracht werden sollen. Hierbei fiel die Wahl auf den Standort des jetzigen Verwaltungsbaus und der Heileurythmie-Baracke, da nur hier in räumlicher Nähe zu den anderen Unterrichtsräumen das benötigte Volumen verträglich in das Schulgelände integriert werden kann.

Da der Bestandsbau weichen muss, um besseren Unterrichtsräumen Platz zu machen, muss auch die Verwaltung der Schule in einem Neubau untergebracht werden. Dieser soll als ein Anbau an den Hortbau errichtet werden

Neben dem hohen architektonischen und städtebaulichen Anspruch steht für die Waldorfschule als Bauherr auch der Gedanke der Nachhaltigkeit im Mittelpunkt. Für den geplanten Neubau war das Ziel, dieses als Niedrigstenergiegebäude zu errichten. Ein niedriger Energiebedarf, der in hohem Maße mit regenerativen Energien gedeckt wird, wurde ebenso angestrebt wie die Beantwortung der Frage des Einsatzes der verwendeten Materialien bis hin zur Schaffung einer behaglichen Aufenthaltsqualität für die Schüler. Diese raumklimatischen Verbesserungen können durch die heutigen technischen Möglichkeiten problemlos erfüllt werden. Dennoch wurde versucht keine hochaufgerüstete Technik in das Gebäude zu packen, sondern durch eine intelligente Planung mit einer einfachen Technik die gewünschten Behaglichkeitsziele zu erreichen. Das reduzierte Technikkonzept sollte dabei gleichermaßen die Investitionen und die laufenden Kosten gering halten.



Abb. 2: Lageplan mit den beiden neu integrierten Gebäuden auf dem Grundstück der Waldorfschule Uhlandshöhe

2.2. Arbeitsplan und Darstellung des Lösungswegs

Um den hohen Anforderungen an Energieeffizienz, verwendeten Materialien und Aufenthaltsqualität für den neuen Baukörper der Waldorfschule gerecht zu werden, führte die TU München eine intensive, ganzheitliche Analyse von fünf bestehenden Schulneubauten durch. Die Untersuchungen an diesen Beispielschulen, von denen drei DBU-gefördert sind, sollten zu einer Beurteilung der dort umgesetzten Lösungsansätze führen und Rückschlüsse auf das neu zu errichtende Gebäude der Waldorfschule 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, 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 Schulneubauten und im speziellen bei der Planung der Waldorfschule zu achten ist.

Diese definierten Handlungsempfehlungen wurden an der konkreten Planung der Waldorfschule in Stuttgart 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: Innenraummessungen und Nutzerbefragungen an bestehenden Schulneubauten (TU München)

AP2: Analyse Gebäude- und Haustechnikkonzept der bestehenden Schulneubauten (TU München)

AP3: Auswertung, Gegenüberstellung und Beurteilung der Messergebnisse (TU München)

AP4: Lebenszyklusanalyse und Untersuchung verschiedener Baustoffe auf die Aufenthaltsqualität der Waldorfschule (TU München)

AP5: Entwicklung von Handlungsempfehlungen für zukünftige Schulneubauten (TU München)

AP6: Anwendung der erarbeiteten Handlungsempfehlungen auf die Planung der Waldorfschule (Behnisch Architekten)

AP7: Gebäudesimulation und Entwicklung eines Energie- und Klimakonzepts für die Waldorfschule (Transsolar)

3. Analysen neugebauter Schulen

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

Schule im Scharnhauser Park, Ostfildern (1999)



Max-Born-Berufskolleg, Recklinghausen (2008) *



Berufliche Oberschule, Erding (2011) *



Gymnasium Buchloe, Buchloe (2013)



Schmuttertal-Gymnasium, Diedorf (2015) *



3.1. Methodik

3.1.1. 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. Im Berufskolleg Recklinghausen beispielsweise fiel die Wahl auf einen nord-ost-orientierten Raum, da sich in den nach Ost bzw. Süd orientierten Räumen nur Sondernutzungen wie z. B. Werkstätten befinden. Auch im Gymnasium Buchloe fiel die Wahl auf ein west-orientiertes Klassenzimmer, da die Architekten die Räume so anordneten, dass sich auf der problematischen Ostseite ausschließlich Nebenräume, Fachklassenzimmer und Sondernutzungen befinden. 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 Emp-

finden von „stickiger, verbrauchter“ Luft. Für die Darstellung verwenden wir zwei Grafiken. Die kumulierte Wahrscheinlichkeit zeigt an, zu welchem prozentualen Anteil die CO₂-Konzentration 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 [2] 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 sehr aufwändig, zudem ist der Unterschied zwischen Luft- und Strahlungstemperatur bei den gut gedämmten Schulen relativ gering. 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 [3] angelehnt, auch wenn in diesem Fall nicht die operative, sondern die von uns ermittelte Lufttemperatur dargestellt ist. In der zweiten Grafik sind die gemessene Raumlufttemperaturen im Verhältnis zur Raumluftfeuchte dargestellt. Der empfohlene Behaglichkeitsbereich nach DIN 1946-6 [4] 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 [5] 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.

3.1.2. 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 Ganztagschulen vertreten, einige Schulen wie z. B. das Gymnasium Buchloe verfügen über eine Schulküche mit Kantine und im technisch orientierten Max-Born Berufskolleg beispielsweise finden viele stromverbrauchende Unterrichtsarbeiten statt. Um eine direkte Vergleichbarkeit der energetischen Performance herstellen zu können entschieden wir uns deshalb die fünf 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 „ge-

rechtes“ 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.

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 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 [6]. 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 weiterer Wert zur Vergleichbarkeit, neben Raumbedarf und CO₂-Äquivalent, kann die Betrachtung der Energiekosten herangezogen werden, 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.

CO₂-Äquivalent-Faktoren [kg/kWhEnd]

Strom-Mix: 0,617 Gas-BHKW: 0,196

Holz-Pellets: 0,018

Fernwärme Erding: 0,192

Fernwärme Ostfildern: 0,119

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 der FOS/BOS Erding, 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.

3.1.3. 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. Lediglich in Diedorf gab es eine Abweichung: unsere Fragen wurden in eine groß angelegte Befragung der Hochschule Augsburg integriert. Hier konnten alle Schüler des Schmuttertal Gymnasiums die Kriterien bewerten. Insgesamt haben vier der fünf untersuchten Schulen an der Umfrage teilgenommen.

3.2. Analysen und Ergebnisse

3.2.1. Schule im Scharnhauser Park, Ostfildern



Die 15 Jahre junge Schule wurde entgegen dem aufkommenden Zeitgeist mit relativ wenig Technik ausgerüstet. Robuste und langlebige Materialien und eine starke Formsprache sollen dauerhaft die Aufenthaltsqualität der Schule prägen.

Die Schule besteht aus zwei Ost-West-orientierten Riegeln und ist als klassische Flurschule mit zweihütig angeordneten Klassenzimmern konzipiert. Der südliche Bau, der erste Bauabschnitt, ist das größere Gebäude. Dieses beherbergt die Sekundarstufe, sowie die gemeinschaftlichen Räumlichkeiten wie Lehrerzimmer, die auch als Mensa genutzte Aula und eine Vielzahl an Werkräumen. Der nördliche Bau, der zweite Bauabschnitt, beherbergt die Grundschule und gleicht bis auf geringfügige Abweichungen dem Südbau. In diesem wurden die Innenraummessungen durchgeführt.

Das Schulgebäude wurde als Stahlbetonbau erstellt. Die Fassade besteht aus einer zweischaligen Konstruktion. Die Außenwände wurden in der Regel als 25 cm starke Betonwände ausgeführt. Im ersten Bauabschnitt entstand die Fassade als hinterlüftete Konstruktion mit 8 cm starker Mineralfaserdämmung, die Fenster wurden innenseitig hinter der Dämmebene angeschlagen. Im zweiten Bauabschnitt wurde die Fassade als kerngedämmte Konstruktion mit 12,5 cm starker Mineralfaserdämmung realisiert. Hier liegen die Fenster vor der Dämmebene, was zu Wärmebrücken führen kann und im Winter zu Tauwasserbefall der Fensterscheiben und erhöhtem Energieverbrauch.

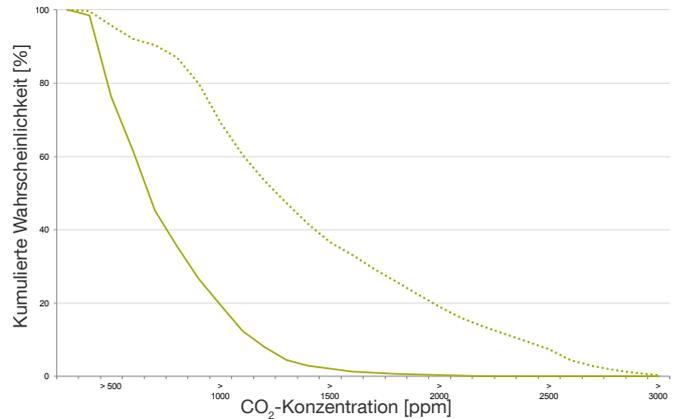


Abb. 3: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Ostfildern

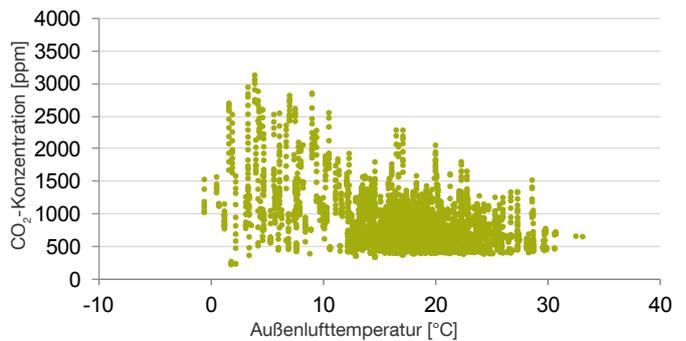


Abb. 4: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Ostfildern

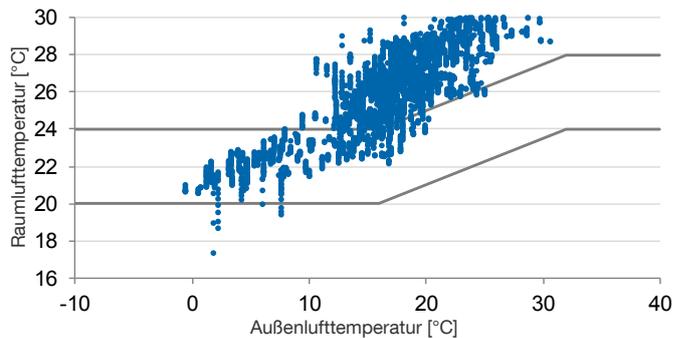


Abb. 5: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Ostfildern

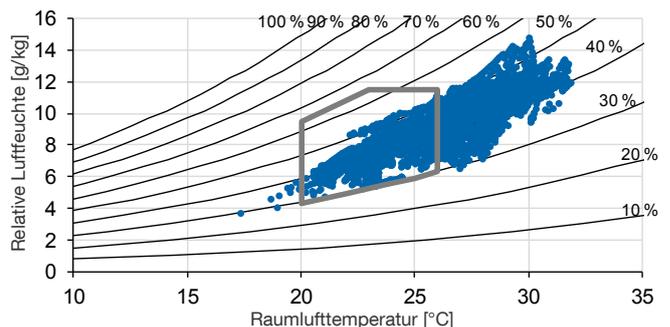


Abb. 6: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Ostfildern

Die Belüftung der Räume erfolgt natürlich über das Öffnen der Fenster, nur innenliegende Räume werden mechanisch be- und entlüftet.

Die zweihüftige Gangerschließung erlaubt schon wegen akustisch auftretenden Problemen keine Querlüftung der Klassenräume und somit nur einen geringeren Luftaustausch. Dies zeigt sich auch in den in zwei Klassenräumen durchgeführten Messungen zur CO₂-Konzentration. Betrachtet man eine repräsentative kalte Woche während der Heizperiode, so sinkt die CO₂-Konzentration nur am Wochenanfang unter 1.000 ppm und steigt während der Unterrichtszeit stetig, teilweise sogar über 2.500 ppm, und damit deutlich über dem empfohlenen Wert von 1.400 ppm. Im Laufe der unterrichtsfreien Zeit am Nachmittag sinkt der Wert zwar langsam wieder ab, dennoch lässt dieser Verlauf vermuten, dass die Fenster nach Unterrichtsende nicht noch einmal zum Stoßlüften geöffnet werden und die schwache Abnahme nur durch die natürliche Infiltration stattfindet. Somit starten die Schüler den Unterricht am nächsten Tag teilweise schon mit knapp 1.500 ppm.

Deutlich zu sehen ist, dass ab ca. 15 °C Außentemperatur gut mit der natürlichen Lüftung umgegangen wird und sich die CO₂-Konzentration in einem vertretbaren Bereich einstellt. Ein weiterer Aspekt der natürlichen Lüftung ist, dass durch den relativ geringen Luftaustausch die winterliche Luftfeuchte stets im Komfortbereich liegt.

Das Wärmeübergabesystem in den Klassenzimmern ist einfach gehalten mit Heizkörpern unter den Fenstern, die die Wärme in den Raum abgeben und mit Fernwärme betrieben werden. Die Messungen zeigen, dass die Temperaturen in den kalten Monaten so gut wie immer im empfohlenen Bereich bleiben. Bei Außentemperaturen größer 15 °C übersteigt die Innentemperatur diesen Bereich deutlich, so kann es schon bei Außentemperaturen von 18 °C zu Raumtemperaturen von 30 °C kommen. Dies ist neben den internen Wärmelasten der Schüler auf einen unzureichenden Sonnenschutz und der Ost-Westorientierung zurückzuführen. Die Oberlichter der Flurzone besitzen keinen Sonnenschutz, was in den heißen Sommermonaten die Überhitzungsproblematik zusätzlich vergrößert. Auf eine Kühlung der Klassenräume über aktive Systeme oder passive Maßnahmen wie beispielsweise eine Nachtauskühlung verzichtet die Schule im Park dennoch.

Der außenliegende Sonnenschutz erfolgt in der Sekundarstufe über eine elektrisch gesteuerte Lamellen-

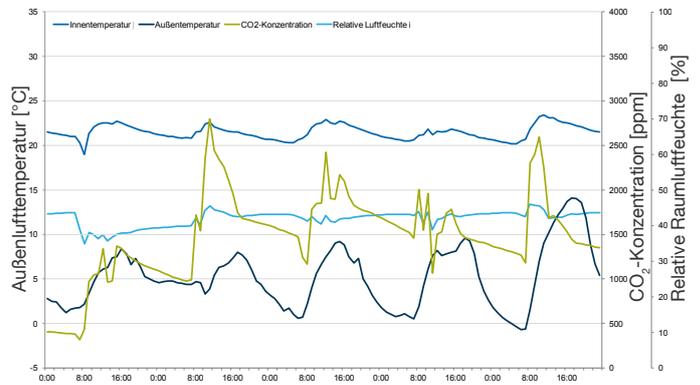


Abb. 7: Kalte repräsentative Woche (25.-29.04.2016), Ostfildern

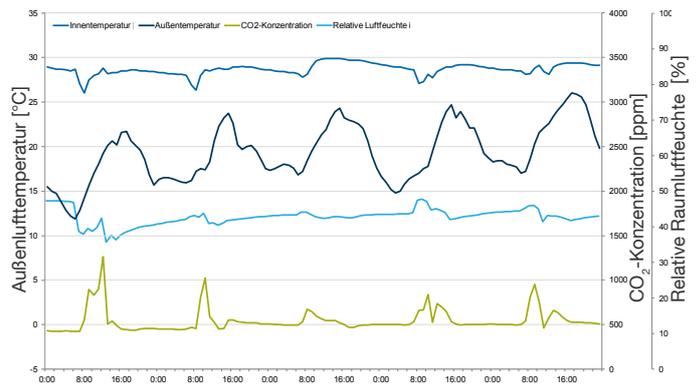


Abb. 8: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Ostfildern

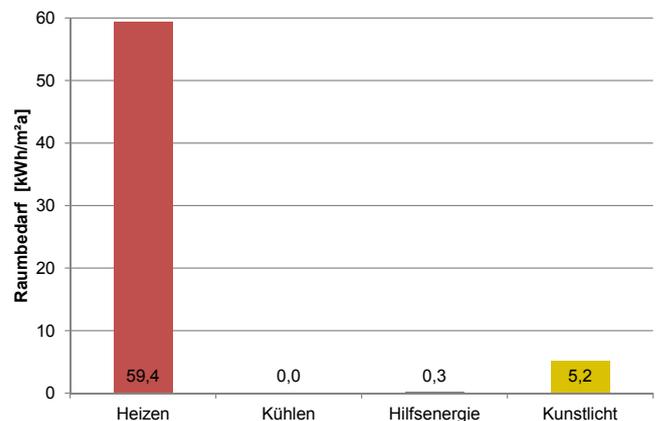


Abb. 9: spez. Raumbedarf, Ostfildern

alousie aus Aluminium. In der Grundschule, also den Räumen, in denen die Messungen erfolgten, über eine elektrisch betriebene textile Senkrechtmarkise mit Handtaster. Durch die Ost-West-Orientierung steht die Sonne Während der Sommermonate morgens an der Ostseite und nachmittags an der Westseite sehr flach und scheint tief in die Klassenzimmer. Um Blendung und solare Überhitzung zu vermeiden, muss der Sonnenschutz in diesen Fällen ganz geschlossen werden, wodurch der direkte Blick nach außen versperrt wird. In der durchgeführten Tageslichtstudie – in der angenommen wird, dass der senkrechte Textilsonnenschutz manuell geschlossen wird, wenn entweder zu hohe solare Lasten in den Raum gelangen oder die Nutzer geblendet werden – wird ein cDA-Wert von knapp 77 % erreicht.



Abb. 10: Klassenraum in Ostfildern

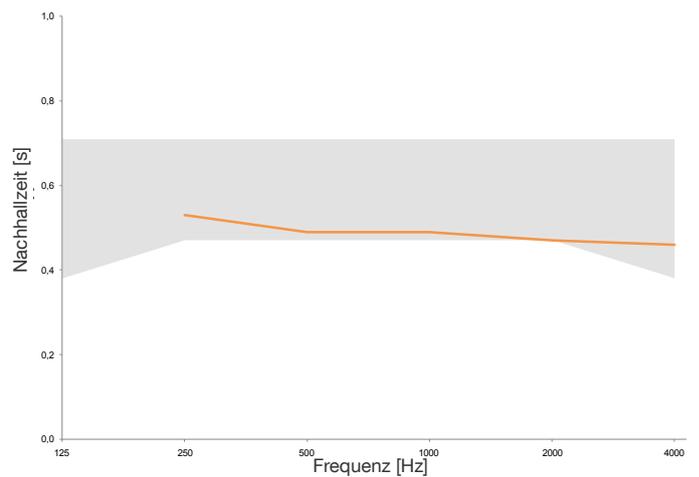


Abb. 11: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Ostfildern

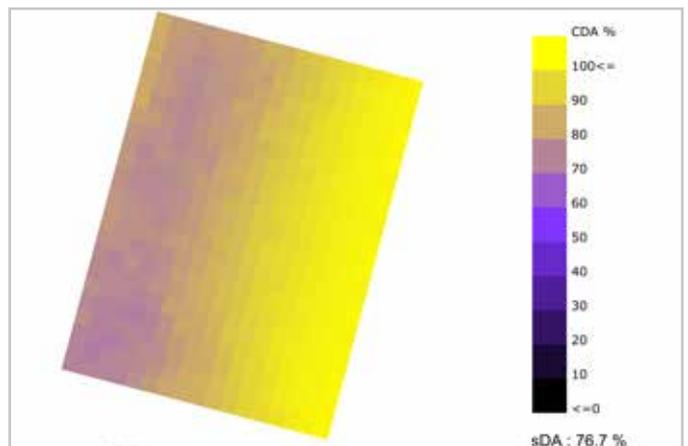


Abb. 12: Continous Daylight Autonomy (cDA), Ostfildern

3.2.2. Max-Born-Berufskolleg, Recklinghausen



Die massive Konstruktion des Max-Born-Berufskollegs besteht aus unterzugsfreien Stahlbetonflachdecken, Längswänden und Stützen. Die äußere Haut bilden geschosshohe feststehende Einscheibenverglasungen, die mit einem Scheibenabstand von 5 cm schuppenförmig zueinander angeordnet sind. Neben ihrer gestalterischen Wirkung schützt sie die Jalousien gegen Staub und Wind und im Erdgeschoss auch gegen Vandalismus. Der Zwischenraum zwischen äußerer und innerer Glasebene ist für Wartungs- und Reinigungsarbeiten begehbar. Die innere Fassade besteht aus einer Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Eiche-Brettschichtholz-Profilen mit einer Wärmeschutzverglasung.

Das Energiekonzept sah nicht vor, auf Biegen und Brechen den Passivhausstandard zu erreichen, sondern auf effiziente Weise ein behagliches Raumklima zu schaffen, so dass eine gute Lern- und Arbeitsumgebung geschaffen wird. Das Gebäude hat eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Um die Luftqualität zu jeder Zeit sicherzustellen, ist diese mit einer CO₂-gesteuerten Luftqualitätsüberwachung ausgestattet. Die frische Außenluft wird angesaugt, über einen Erdkanal im Winter vorerwärmt und im Sommer gekühlt in die Lüftungszentrale gebracht. Im Winter wird die Zuluft über einen Wärmetauscher durch die Abluft erwärmt (Wärmerückgewinnung). Von dort aus wird die Zuluft über Schächte und Kanäle im Schulgebäude verteilt. Die Zuluft wird zur Maximierung des Wärmeaustauschs über gerippte Aluminiumrohre eingebracht, die in der Betondecke einbetoniert sind. Die nahezu konstante Temperatur des Betonkerns reguliert zusätzlich die Zulufttemperatur. Im Klassenzimmer strömt diese vorkonditionierte, gefilterte Luft im oberen Deckenbereich an der Fensterseite ein, fällt als kalte Luft herunter und strömt dann durch Öffnungen im gegenüberliegenden Türbereich in die Flure und Galerien. Dort

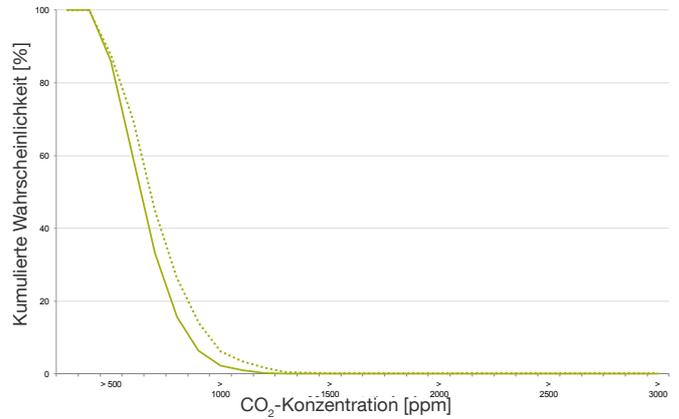


Abb. 13: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Recklinghausen

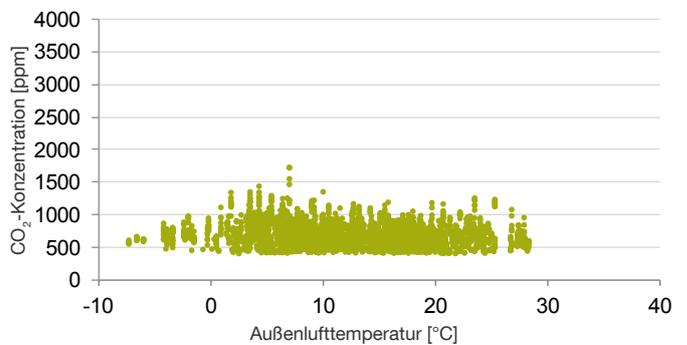


Abb. 14: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Recklinghausen

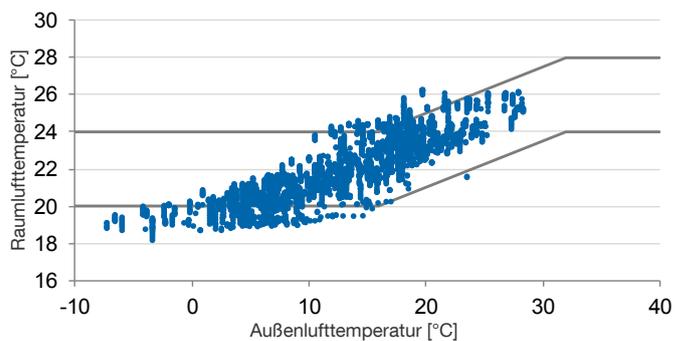


Abb. 15: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Recklinghausen

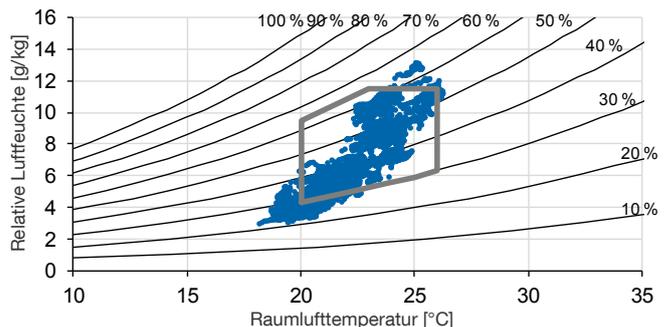


Abb. 16: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Recklinghausen

befinden sich die zentralen Abluftschächte, um die Luft wieder zurück zur Lüftungszentrale zu führen. Für eine Kontrolle der Luftqualität wurde eine mechanische Lüftung installiert, die den hygienischen Luftwechsel sicherstellt. Die durchgeführten CO₂-Messungen bestätigten die gute Luftqualität: der Schwellenwert von 1.400 ppm wird in weniger als 1 % der Nutzungszeit erreicht. Das Nutzerverhalten wurde in der Planung bei allen Projektbeteiligten thematisiert. Und dennoch wurde der Drang unterschätzt, in einem Gebäude die Fenster zu öffnen. Es traten bereits einige Bauschäden auf, weil Fassadenelemente geöffnet wurden, die nur für die Entrauchung im Brandfall gedacht waren. Dies bestätigt sich auch in unseren Umfragen. Dabei haben von den 90 befragten Schülern über die Hälfte die Luftqualität mit „ausreichend“ und „mangelhaft“ bewertet und mehrfach in den Gründen dafür angegeben, dass die Luft verbraucht und stickig sei und die Fenster nicht geöffnet werden können.

Die Messungen der relativen Luftfeuchte in den Klassenräumen liegen während der Heizperiode ca. 20 % unter den empfohlenen 30 %.

Sowohl der Heiz- als auch der Kühlfall wird hauptsächlich mittels der luftgeführten Betonkerntemperierung – den in den Decken integrierten gerippten Rohren – geregelt. Im Heizfall strömt die vorgewärmte Luft durch die Rohre und gibt Energie an die Betondecke ab, so dass behaglich warme Deckenoberflächen im Raum entstehen. Zusätzlich werden zur schnellen Regulierung und für die Einheizphase in die Brüstung integrierte Konvektoren zugeschaltet, falls die Raumtemperatur unter die Solltemperatur sinkt.

Im Kühlfall strömt tagsüber durch Kälteerzeuger in den Lüftungszentralen aufbereitete kühle Luft durch die Rohre und kühlt so die Decken. Zusätzlich nutzt das Gebäude die Nachtkühlung: nachts strömt kühle Außenluft durch die Rohre. Die Wärme, die tagsüber in der Betondecke gespeichert wurde, wird so wieder aus dem Gebäude transportiert. Durch die Lamellen in den Rohren vergrößert sich die Austauschfläche zwischen Rohren und Beton, so dass die Wärme effizient ausgetauscht werden kann.

Die Messdatenauswertung zeigt, dass die Temperaturen bei gemäßigten Außentemperaturen zwischen 15 – 25 °C weitestgehend im empfohlenen Bereich liegen. Wie gut das System bei hohen Außentemperaturen funktioniert, kann aufgrund des sehr milden Sommers nicht abschließend beurteilt werden, Temperaturen über 27 °C kamen in dem Messzeitraum bis zu den Sommerferien nicht vor, jedoch implizieren die Messdaten, dass sich die Raumtemperatur auch an heißen Tagen im Komfortbereich befindet. Problematisch zeigen sich die Innenraumtem-

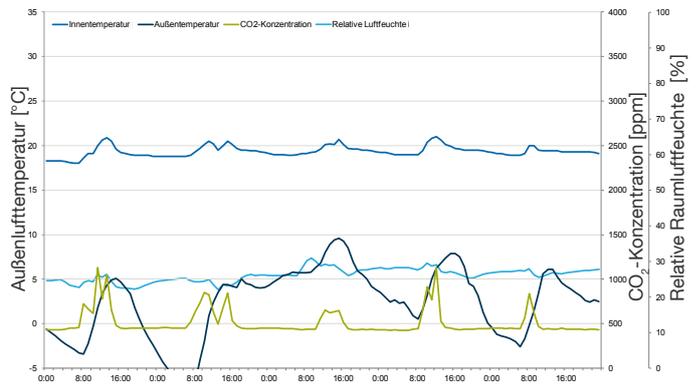


Abb. 17: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Recklinghausen

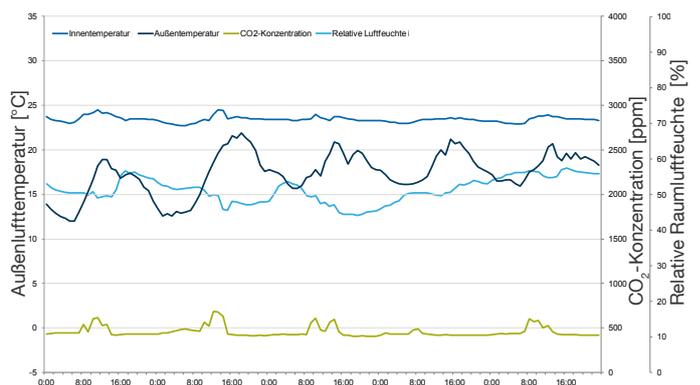


Abb. 18: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Recklinghausen

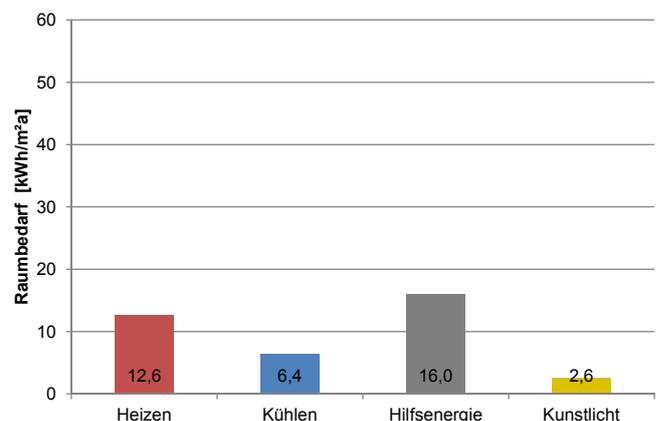


Abb. 19: spez. Raumbedarf, Recklinghausen

peraturen in der kalten Jahreszeit: Hier ist deutlich die Tendenz zu sehen, dass die Temperaturen im unteren Bereich des empfohlenen Behaglichkeitsbereichs liegen, wenn nicht sogar darunter. Im Wochenverlauf ist ersichtlich, dass bei Unterrichtsbeginn die Raumtemperatur häufig unter 20 °C liegt, am kurz belegten Freitag wird diese Grenze nicht mal erreicht. Auch die Befragung der Schüler und Lehrer bestätigt dieses Bild: mit der Durchschnittsnote von 3,9 erhält das Berufskolleg beim winterlichen Komfort die schlechteste Bewertung aller teilnehmenden Schulen. Auch der sommerliche Komfort wird in der subjektiven Beurteilung kritisch betrachtet: die am häufigsten vergebene Note ist „mangelhaft“, gefolgt von „befriedigend“ und „ausreichend“, wobei eine Person die Note „sehr gut“ vergab.

Als Wärmequelle nutzt das Max-Born-Kolleg seit wenigen Jahren als Nahwärmenetz das BHKW, das sich auf dem Schulgelände befindet, davor gab es einen Anschluss an das Fernwärmenetz. Zur Kälteerzeugung (für die PC-Räume), dient eine Kompressionskältemaschine unter Nutzung von Erdsonden.

Den Lichteinfall durch die großen Glasflächen steuern außenliegende, mechanisch gesteuerte Raffstores mit Horizontallamellen. Diese sind, getrennt nach Himmelsrichtung, mittels eines Helligkeitssensors gesteuert. Während der Kühlperiode sorgen sie dafür, solare Wärmelasten zu minimieren und Blendung zu vermeiden, aber dennoch die Tageslichtversorgung zu optimieren. Das obere Drittel wird separat gesteuert, um Direktstrahlung an die Decke der Klassenräume zu lenken, was zu einer Erhöhung der Tageslichtautonomie führt und die benötigten Kunstlichtstunden minimiert. Die Automatik kann manuell übersteuert und der Sonnenschutzbehang selbst hoch und runterfahren werden. Bei der Befragung zur visuellen Behaglichkeit zeigt sich, dass die meisten Nutzer diese im Klassenzimmer als hoch empfinden. Einige gaben an, manchmal von der Sonne geblendet zu werden.

Da die Deckenunterseiten der Klassenräume aus ästhetischen und energetischen Gründen nicht für schallabsorbierende Maßnahmen zur Verfügung standen, entwarfen die Architekten weite Teile der Innenwände und der Einbauschränke als gelochte Birke-Multiplex-Platten mit dahinterliegendem Akustikvlies.

Die gemessene Nachhallzeit liegt durchgängig im empfohlenen Idealbereich, was auf den richtigen Einsatz der Akustikverkleidungen schließen lässt. Auch in den Befragungen zum akustischen Komfort haben die Klassenzimmer in Recklinghausen gut abgeschnitten und wurde von den Lehrern mit 100 % gut und sehr gut bewertet, von den Schülern taten das auch ca. $\frac{2}{3}$ der Befragten.



Abb. 20: Klassenraum in Recklinghausen

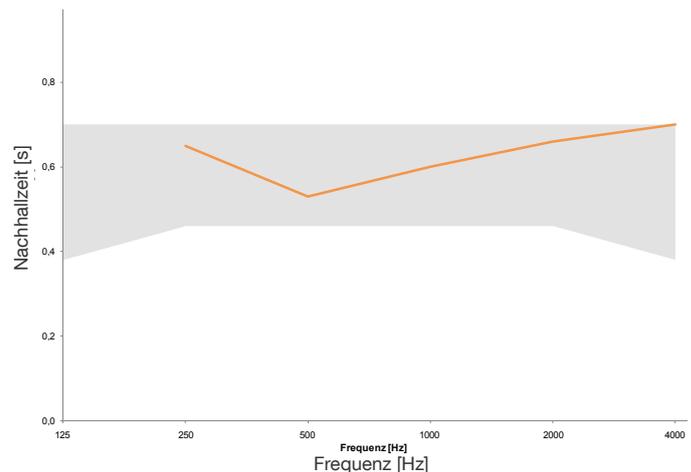


Abb. 21: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Recklinghausen

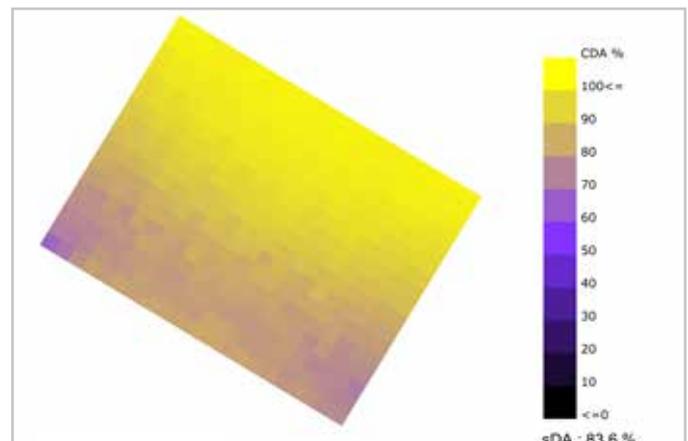


Abb. 22: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Recklinghausen

3.2.3. Berufliche Oberschule Erding



Die Planung hatte sich zum Ziel gesetzt, den Primärenergieverbrauch so niedrig wie möglich zu halten und einen Passivhausstandard zu erreichen. In der Realisierung wurde der maximale Heizwärmebedarf des Passivhausstandards von 15 kWh/m²a sogar noch unterschritten.

Dazu tragen sowohl die passiven Maßnahmen wie der kompakte, gut gedämmte Baukörper und die hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle bei, als auch die aktiven, gut durchdachten technischen Anlagen und Systeme. Für eine gleichbleibend hohe Luftqualität sorgt die mechanische Lüftungsanlage mit Wärme-/Kälte- und Feuchterückgewinnung.

Die frische Außenluft wird angesaugt und während der Heizperiode über Rotationswärmeübertrager von der Abluft vorerwärmt und in den Sommermonaten gekühlt. Sollte dies nicht ausreichen, wird zusätzlich nachkonditioniert. Die Luft wird über Kanäle horizontal im aufgeständerten Boden des Untergeschosses verteilt, vertikale Schächte an den Fassaden führen die Luft zu den jeweiligen Klassenzimmern, wo sie im Brüstungsbereich im Quellluftprinzip bodennah langsam einströmt. Auf der gegenüberliegenden Seite strömt die Luft durch Überströmöffnungen in das Atrium weiter, das als Abluftplenum genutzt wird und von dort zentral abgesaugt.

In Kombination mit hocheffizienten Ventilatoren führt die großzügige Dimensionierung der Kanäle und Lüftungsgeräte – dank geringer Strömungsgeschwindigkeiten und minimierter Druckverluste – zu einem geringen Strombedarf. Außerdem wurde das Kanalsystem großzügig dimensioniert und die Luftmenge der RLT-Anlagen auf unter die Hälfte der rechnerisch ermittelten benötigten Luftmenge ausgelegt, weil man davon ausgeht, dass die Schule nie voll belegt ist.

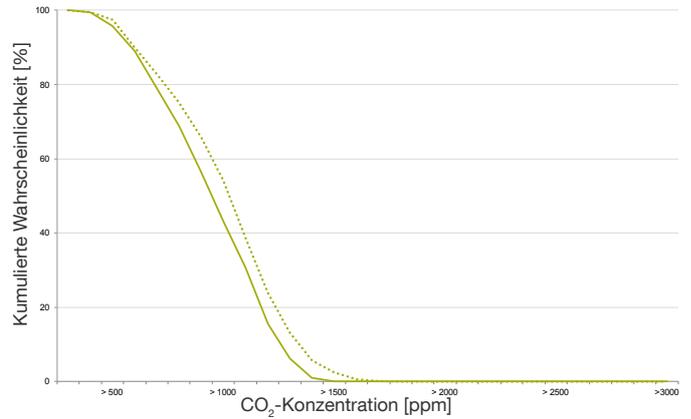


Abb. 23: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Erding

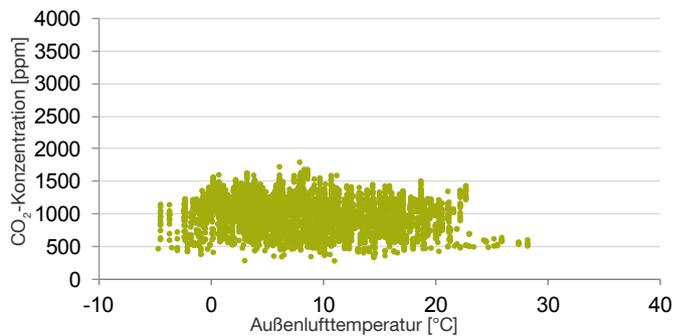


Abb. 24: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Erding

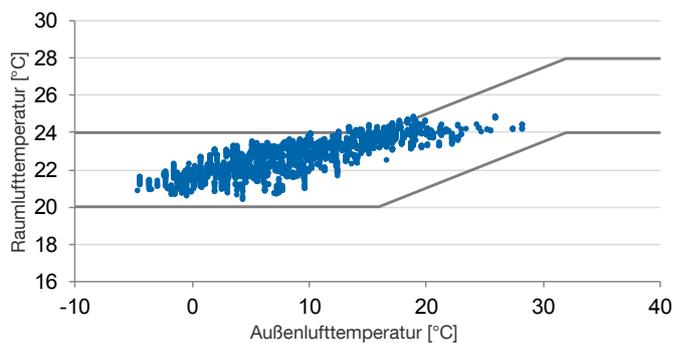


Abb. 25: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Erding

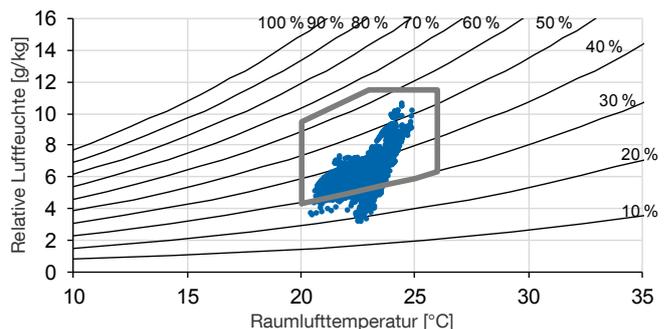


Abb. 26: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Erding

Die Datenauswertung der untersuchten Klassenzimmer bestätigt die effiziente Wirkungsweise der Lüftungsanlage: bei Außentemperaturen unter 12 °C steigt die CO₂-Konzentration in nur 5,7 % der Fälle über 1.400 ppm, ein Wert über 1.600 ppm wird gar nie erreicht. Auch die Feuchterückgewinnung scheint zu wirken: Die Messdaten in der FOS/BOS Erding zeigen, dass die relative Luftfeuchte lediglich in 7 % der Nutzungszeit unter den empfohlenen 30 % liegt. In der Nutzerbefragung wird die Raumlufftfeuchte mit der Durchschnittsnote von 2,9 bewertet, nicht schlecht, aber auch nicht sonderlich gut. Deutlicher fällt hingegen die Beurteilung der Luftqualität bei den Schülern aus: Obwohl die Messdaten durchwegs gute Werte aufzeigen, ist bei der subjektiven Wahrnehmung die mit 37 % am häufigsten vergebene Note „mangelhaft“, die Durchschnittsnote beträgt 3,9. Die am häufigsten verwendeten Schlagwörter sind „verbraucht, stickig und riecht schlecht“. Immerhin haben Schüler und Lehrer die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen, so dass der psychologische Aspekt, bei Unzufriedenheit selber für frische Luft zu sorgen, sichergestellt ist.

Für die thermische Raumkonditionierung sind im Brüstungsbereich wassergeführte Wandheizelemente verbaut. Die benötigte Wärme stammt aus dem Fernwärmehücklauf der benachbarten Berufsschule. Diese wiederum bezieht ihre Fernwärme aus der Geothermie Erding. Für die Sicherstellung des sommerlichen Komforts stellt die wichtigste Maßnahme eine mechanisch unterstützte Nachauskühlung unter Einbeziehung der massiven Bauteile dar. Nachts strömt frische, kühle Luft durch ein automatisch öffnendes Oberlicht oberhalb der Balkontür in die Klassenzimmer. Die Betonspeichermassen, die tagsüber die solaren und internen Wärmelasten aufnehmen, kühlen dadurch nachts ab und geben die Wärme zurück an den Raum. Die Luft strömt über Durchlässe ins Atrium über. Dort öffnen sich vier große Dachkuppeln mit integrierten Ventilatoren und geben die Wärme an die Außenluft ab. Die Nachtlüftung schaltet jedoch nur, wenn ein Kühlbedarf im Tagesverlauf bemerkt wird, also die Betonkerntemperatur bei Schulbetrieb größer war als 23 °C und findet zwischen 23 Uhr und 7 Uhr statt. Voraussetzungen sind, dass die Außentemperatur 2 K unter der Raumtemperatur liegt, kein Niederschlag vorliegt und die Raumluffttemperatur des anfordernden Raumes größer als 23 °C ist. Die Nachtlüftung stoppt, wenn die Betonkerntemperatur weniger als 22 °C erreicht hat.

Neben der Nachtauskühlung gibt es zusätzlich die Möglichkeit der Zuluftvorkonditionierung. Als Kältequelle wird Grundwasser verwendet, das über einen Förderbrunnen auf dem Grundstück gewonnen wird. Mit diesem werden außerdem die IT-Schulungsräume sowie der Serverraum gekühlt. Die Datenauswertung zeigt, dass die gemessenen Innenraumtemperaturen während der Nutzungszeit

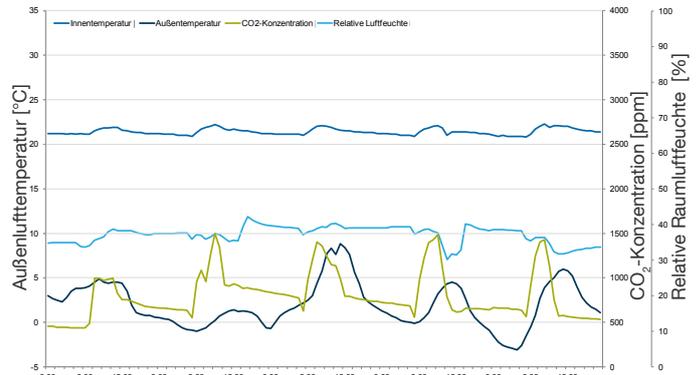


Abb. 27: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Erding

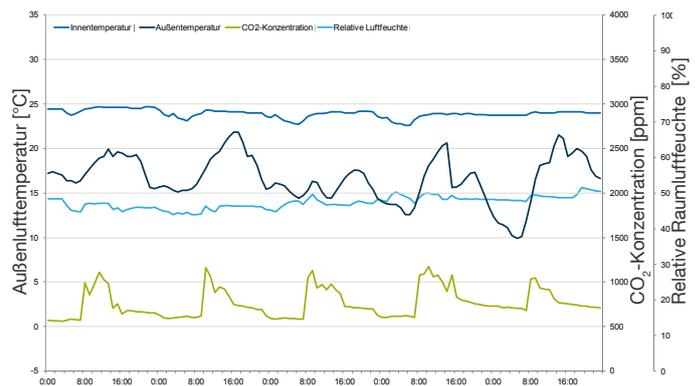


Abb. 28: Warme repräsentative Woche (30.05.-03.06.2016), Erding

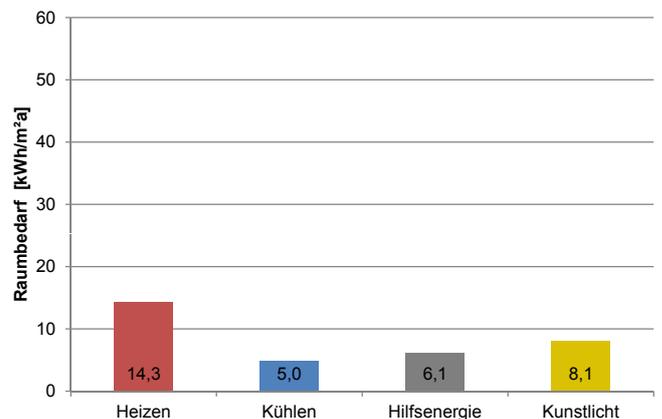


Abb. 29: spez. Raumbedarf, Erding

so gut wie immer im definierten Komfortbereich lagen. Auch in den Grafiken des Wochenverlaufs kann man die sehr konstanten Temperaturverläufe erkennen. Die subjektiven Empfindungen aus der Nutzerbefragung zeigen eine große Bandbreite zur Bewertung des thermischen Komforts: So bewerten die Schüler die Temperatur im Winter zu jeweils ca. 20 % mit „gut“, „befriedigend“, „ausreichend“ und „mangelhaft“. Etwas besser fällt die Notenvergabe der sommerlichen Temperaturen aus: 30 % vergeben die Note „befriedigend“, 22,6 % „gut“ und 20,7 % „ausreichend“. Die restlichen 25 % verteilen sich auf die übrigen Noten.

Die Klassenräume sind mit durchschnittlich 75 m² großzügig bemessen und durch die großen Fenster ausreichend mit Tageslicht versorgt. In der Tageslichtsimulation ergibt sich ein sehr guter cDA-Wert von annähernd 100 %. Die Schule verfügt über einen außenliegenden Sonnenschutz, der selbstständig auf den Lauf der Sonneneinstrahlung reagiert, indem der Neigungswinkel der Lamellen automatisch dem Sonnenstand nachfährt. So werden im Sommer die solaren Lasten im Gebäude gesenkt und gleichzeitig ein größtmöglicher Anteil an Tageslicht in die Klassenräume gebracht. Zusätzlich wird eine Blendung vermieden. In den Ferien, während der Kühlperiode, schließen sich die Lamellen dauerhaft und komplett, um das Gebäude nicht unnötig zu erwärmen. Während der Heizperiode ist die automatisierte Regelung des Sonnenschutzes deaktiviert, so dass die solaren Gewinne der Sonneneinstrahlung genutzt werden können. Bei der Befragung der Schüler wiederum wurde dem Sonnenschutz oft eine nicht nachvollziehbare Steuerung attestiert. Zudem gab es Stimmen, dass die Schüler manchmal geblendet werden bzw. das Beamerbild wegen Sonneneinstrahlung schwer lesbar ist. In diesem Fall lässt sich der Sonnenschutz auch manuell nachjustieren. Windsensoren fahren bei einer erhöhten Windgeschwindigkeit den Sonnenschutz nach oben.

Das Kunstlicht ist präsenzgesteuert und passt sich in seiner Helligkeit automatisch dem Bedarf an. Das Licht kann manuell an- und ausgeschaltet werden und wird nach 15 Minuten fehlender Präsenz abgeschaltet.

Drei nicht flächige Akustikpaneele lassen weiterhin einen Teil der massiven Betondecken als thermische Speichermasse zur Verfügung stehen, so dass diese zur Nachtauskühlung nutzbar ist. Zusätzlich sind an den Rückwänden der Klassenzimmer Pinnwände mit schallabsorbierender Oberfläche zur Regelung der Akustik eingesetzt. Die Nachhallzeitmessung ergab, dass sich die Werte meist im empfohlenen Bereich befinden. Auch über 70 % der Schüler bewerten die Akustik in der durchgeführten Befragung mit „sehr gut“ und „gut“.



Abb. 30: Klassenraum in Erding

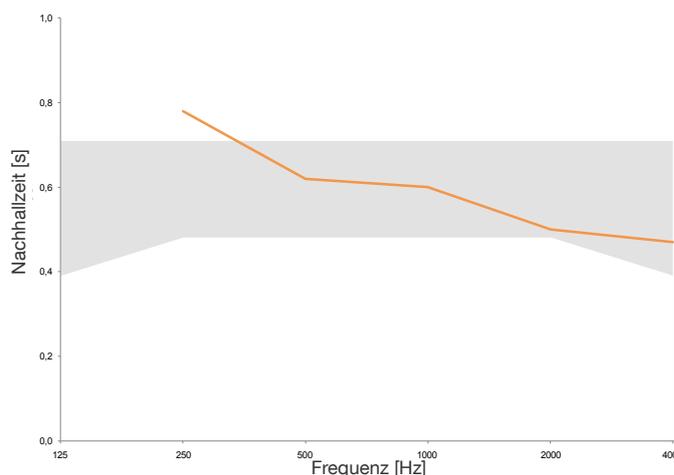


Abb. 31: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Erding

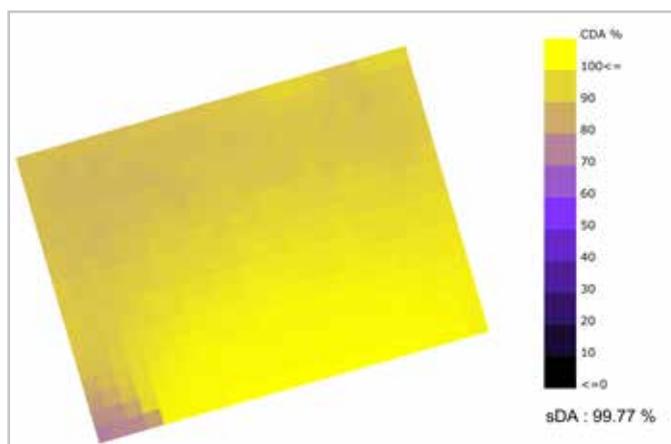


Abb. 32: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Erding

3.2.4. Gymnasium Buchloe



Eine tragende starre Struktur aus Stahlbeton bleibt innen sichtbar und wird von außen thermisch verkleidet. Um den Passivhausstandard zu erreichen, wird vor die tragende Konstruktion eine Dämmebene mit 28 cm Stärke gehängt, in der auch die Fenster sitzen. Den äußeren Abschluss bildet eine hinterlüftete Stülpschalung aus horizontalen Brettern.

Die Planer der Schule achteten auf einen möglichst hohen Nutzungsgrad von regenerativen Energien für die Raumkonditionierung des Gebäudes. Buchloe hat als Standortvorteil Grundwasser zur Verfügung, das sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen des Gebäudes verwendet wird. Das Grundwasser hat im Jahresverlauf eine recht konstante Temperatur von ca. 10 °C und wird über einen Saugbrunnen auf dem Schulgelände entnommen. Eine strombetriebene Wärmepumpe hebt das Temperaturniveau auf eine gut zum Heizen nutzbare Temperatur von ca. 40 – 45 °C. Ein Pufferspeicher verhindert ein zu häufiges Takten der Wärmepumpe. Für den Warmwasserbedarf der Duschen und der Küche ist eine 40 m² große Solarthermieanlage auf dem Dach installiert, die je nach solarem Ertrag auch zur Heizungsunterstützung beiträgt. Der Ertrag der solarthermischen Anlage wird in einen zweiten Pufferspeicher mit höheren Temperaturen gespeist.

Die einzige externe Energiebezugsquelle zur Raumkonditionierung des Gymnasiums ist somit Strom. Durch ein ständiges Monitoring der Anlagentechnik direkt vor Ort und Nachjustierungen konnte der Energieverbrauch seit Inbetriebnahme kontinuierlich verbessert werden. Bei der Wärmeübergabe entschied man sich konsequenterweise für flächige Übergabesysteme.

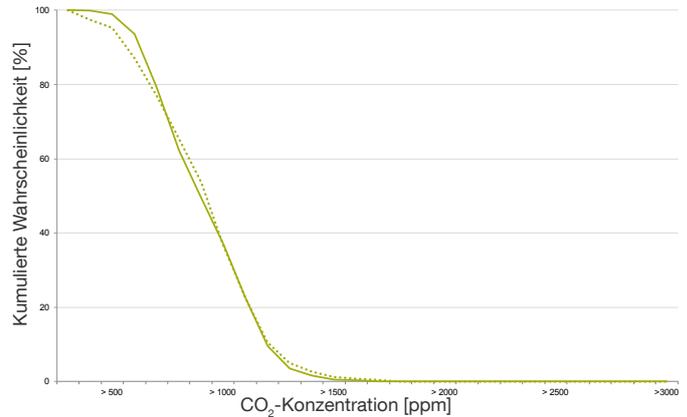


Abb. 33: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Buchloe

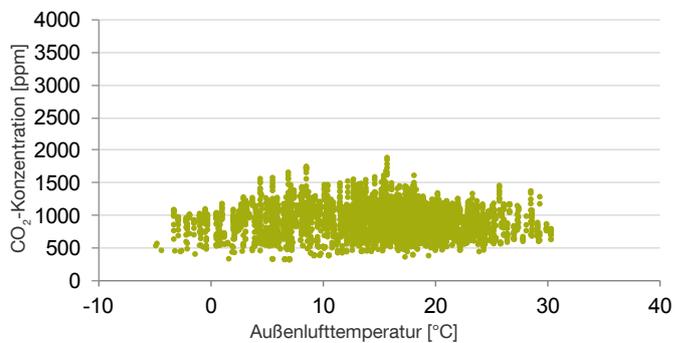


Abb. 34: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe

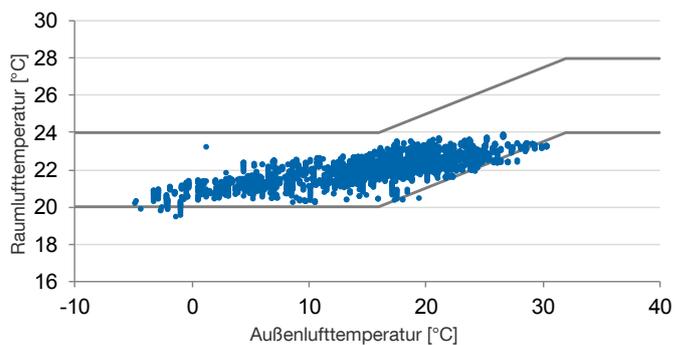


Abb. 35: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe

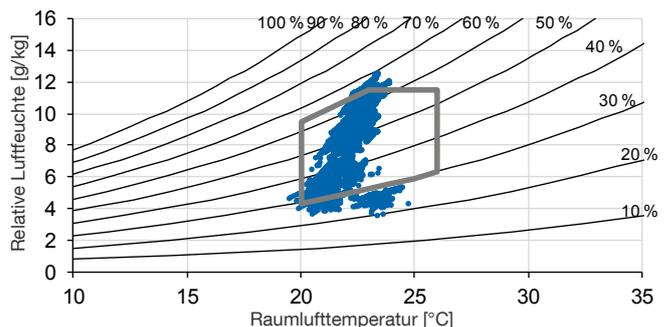


Abb. 36: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Buchloe

Wie der Name vermuten lässt, wird die Heizlast über eine große Fläche generiert, die Vorlauftemperatur kann dementsprechend niedriger sein. Durch den geringen Temperaturhub kann die Wärmepumpe somit effizienter betrieben werden. Öffentlichen Bereiche wie Aula, Flure oder Toiletten verfügen über eine Fußbodenheizung, die Turnhalle wird mit Deckenstrahlplatten beheizt. In den Klassenzimmern kommt eine Heiz-/Kühldecke zum Einsatz, die je nach thermischer Anforderung das Zimmer heizt oder kühlt. Die darunter angebrachte Gipskartondecke mit ihren perforierten Löchern reduziert gleichzeitig die Nachhallzeiten. In der Messung zeigt sich, dass die Nachhallzeiten in allen Frequenzbereichen im empfohlenen Bereich liegen.

Betrachtet man die Daten der Innenraummessung scheint das Heiz- und Kühlsystem seine Aufgabe sehr gut zu bewältigen: fast alle Messpunkte liegen im definierten Komfortbereich. Auffallend ist jedoch, dass die Innenraumtemperaturen auch bei steigenden Außentemperaturen nie über 24 °C gehen. Das deutet auf sehr enge Grenzen der eingestellten Regelungssteuerung hin. Bei der Nutzerbefragung kommt das System, das oft mit einer Klimaanlage verwechselt wird, gut an: 80 % bewerten den sommerlichen Komfort mit gut und sehr gut. Die Bewertung des winterlichen Komforts fiel nicht ganz so gut aus, hier wurden die Noten 1 und 2 von 54 % der Befragten vergeben, zudem findet sich auch öfter der Hinweis, dass es zu kalt sei.

Wie bei der Wärmeübergabe wird auch die Lüftung der Klassenzimmern anders gesteuert wie in anderen Bereichen. In den „öffentlichen Bereichen“ wie Turnhalle, Aula etc. versorgt eine zentrale Lüftungsanlage die Räume mit Frischluft. Die Lüftungszentrale befindet sich in einem zentralen Bereich des Gebäudes in Nähe des Haupttreppenhauses. Die Zuluft kann dort über die vorher beschriebenen Techniksysteme je nach Anforderung beheizt bzw. gekühlt werden und verfügt selbstverständlich über eine Wärmerückgewinnung.

In den Klassenzimmern verfügt das Gymnasium Buchloe als einzige der untersuchten Schulen über dezentrale Lüftungsgeräte in jedem Raum, die CO₂-gesteuert sind. Dieses System hat Vor- und Nachteile: so können die Räume mit weniger technischem Aufwand im Vergleich zu zentralen Systemen individuell geregelt werden, allerdings entsteht ein höherer Wartungsaufwand, da die Filter an jedem Gerät separat gewechselt werden müssen. Bei der dezentralen Lüftungsanlage wird die Luft über Schlitze oberhalb des Fensters an der Fassade angesaugt, in der abgehängten Decke des jeweiligen Klassenzimmers verteilt und in den Raum gebracht. Die verbrauchte Luft wird an anderer Stelle im Raum angesaugt und verlässt diesen ebenfalls über die Öffnungsschlitze

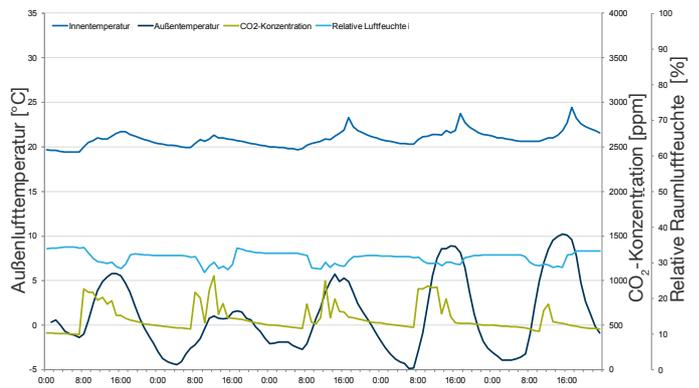


Abb. 37: Kalte repräsentative Woche (14.-18.03.2016), Buchloe

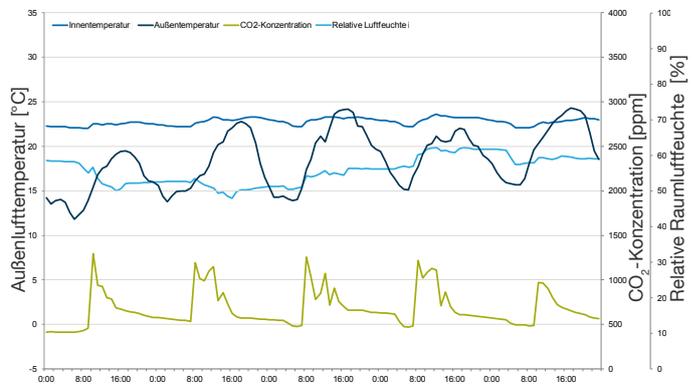


Abb. 38: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Buchloe

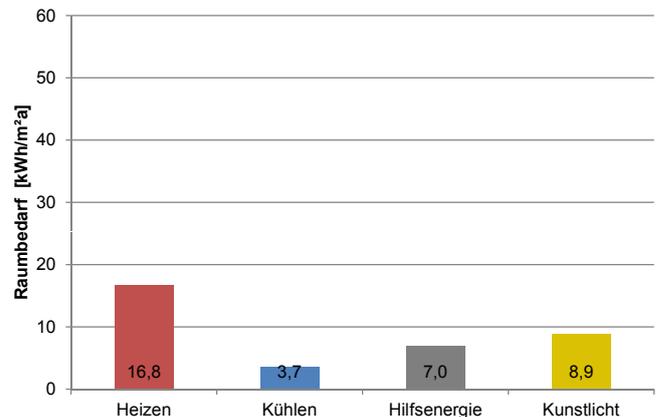


Abb. 39: spez. Raumbedarf, Buchloe

in der Fassade, nachdem sie ihre Wärme über die Wärmerückgewinnung an die Zuluft abgegeben hat. Wegen ihrer dezentralen Einbauart sind die Lüftungsgeräte nicht an die zentrale Wärmeversorgung angeschlossen, die Zuluft wird dementsprechend nicht vorkonditioniert. Zwar hätte es bei den eingebauten Geräten die Möglichkeit gegeben, das integrierte Heizregister direkt mit Strom zu betreiben, die Planer entschlossen sich aber auf diese energieintensive Maßnahme zu verzichten.

Ein häufig vorkommendes Phänomen ist, dass trotz vorhandener Lüftungsanlage die Fenster auch in der kalten Jahreszeit geöffnet werden und somit unnötig Wärme verloren geht. Dies bestätigen auch Umfragen der anderen Schulen. Um dies zu verhindern, können die Fenster im Gymnasium Buchloe nur mit einem Schlüssel geöffnet werden können. Damit wird ein Eingreifen der Schüler verhindert. Aus psychologischer Sicht wirkt sich das negativ auf die Wahrnehmung der Luftqualität aus, in der Befragung kommt häufig die Aussage, dass die Luft verbraucht und stickig wirkt. Die Messwerte zeigen jedoch ein ganz anderes Bild: die Grenze von 1.400 ppm wird in weniger als 2 % der Nutzungszeit überschritten.

Die Unterrichtsräume sind stets auf eine Seite orientiert und besitzen Fenster über die gesamte Breite des Raumes. Sie sind sturzfrei bis an die Unterkante der abgehängten Decke eingebaut, so dass viel Tageslicht bis weit in den Raum gelangt. Die verwendeten Materialien tragen zusätzlich zur hellen Raumwirkung bei. Als Blend- und Sonnenschutz gibt es außenliegende Jalousien, die elektrisch gesteuert sind und die bei direkter Sonneneinstrahlung die geschlossenen Lamellen in eine 45° Stellung drehen, so dass Tageslicht in den Innenraum gelenkt wird. Bei der Nutzerbefragung ist der überwiegende Teil mit dem visuellen Komfort sehr zufrieden oder zufrieden (83 %), wobei ab und zu angemerkt wurde, dass die Whiteboards schlecht zu lesen sind. Seitens der Lehrer gibt es kritische Stimmen, dass der Sonnenschutz sehr oft heruntergefahren ist und dann zusätzliches Kunstlicht zugeschaltet werden muss. In den Klassenzimmern versorgen abgehängte Spiegelrasterleuchten die Räume mit Kunstlicht, in den Fluren sind längliche Leuchtkörper in die abgehängten Decken integriert.



Abb. 40: Klassenraum in Buchloe

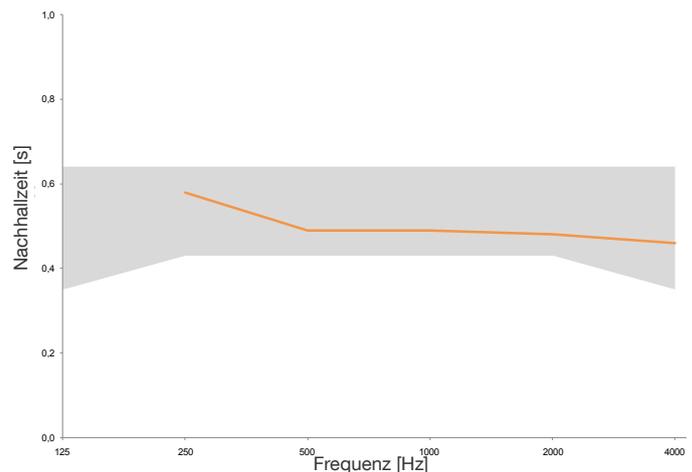


Abb. 41: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Buchloe

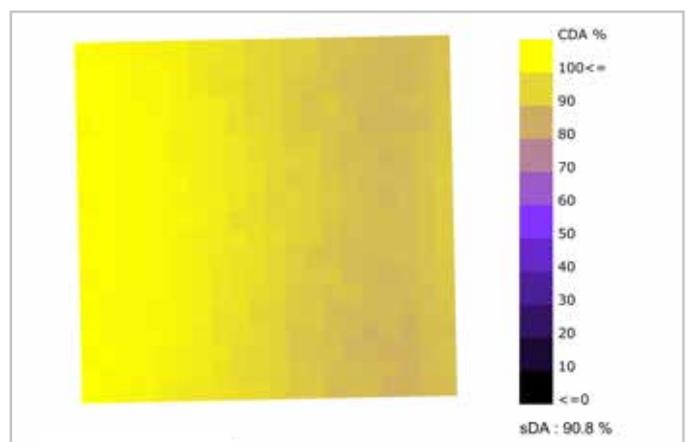


Abb. 42: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Buchloe

3.2.5. Schmuttertal-Gymnasium Diedorf



Nach der Definition ist der Plusenergiestandard erreicht: Der gesamte nichtregenerativ erzeugte Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb und der nutzerinduzierte Bedarf wie zum Beispiel Server, Strom und Vollküche liegen zusammen in der Jahresbilanz niedriger als der substituierte Primärenergieeinsatz auf dem Schulgelände. Dies gilt ebenfalls für die CO₂-Emissionen. Diese positive Bilanz entsteht durch eine hocheffiziente Gebäudetechnik, die effiziente Gebäudehülle, sowie den Einsatz einer Photovoltaikanlage zur solaren Stromgewinnung, die ohne Durchdringungen auf dem Dach angebracht ist.

Für Lüftungsanlage, Heizung, Kühlung, Hilfsenergien und das Kunstlicht gibt es Kennzahlen für die primärenergetischen Zielwerte, die laufend kontrolliert werden.

Die Decke aus Brettschichtholzrippen und einer Ortbetonplatte im Verbund erlaubt es, akustische Absorber zu integrieren und die haustechnischen Installationen platzsparend unterzubringen.

Auch Auswahl emissionsarmer Materialien minimiert den Ausstoß an flüchtigen organischen Verbindungen, den sogenannten volatile organic compounds oder VOC.

Zwei zentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung versorgen alle Gebäudeteile mit Frischluft. Die Anlagen sind auf einen Bedarf von mindestens 30 m³/h pro Person ausgelegt. Sowohl in den Klassenzimmern als auch in den offenen Bereichen befinden sich CO₂-Fühler zur Regulierung der Luftmenge in Abhängigkeit der Luftgüte. Die Zuluft strömt unterhalb der Fenster über ein Quellluftsystem ein und fließt von den Klassenräumen durch vertikale Überströmöffnungen neben der Türe in die Marktplätze über, wo Abluftöffnungen die verbrauch-

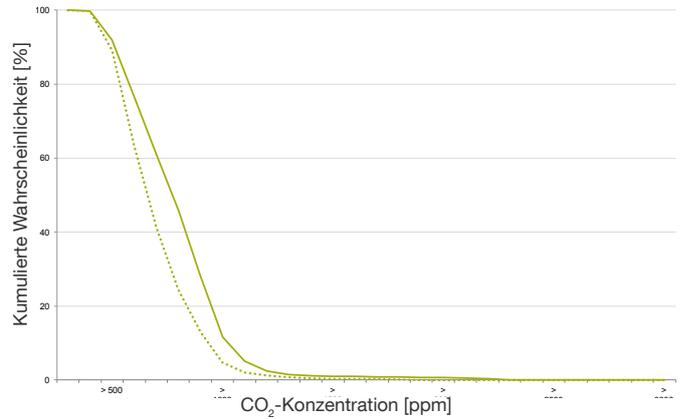


Abb. 43: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Diedorf

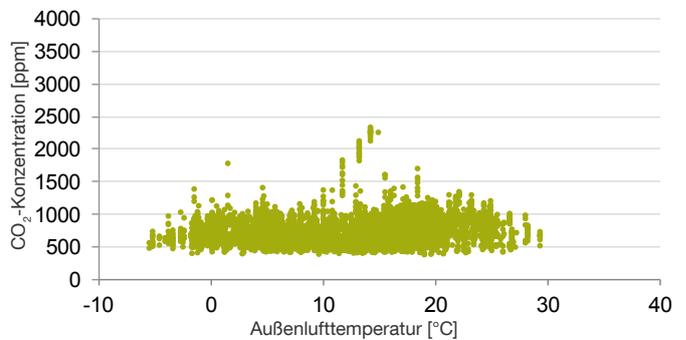


Abb. 44: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Diedorf

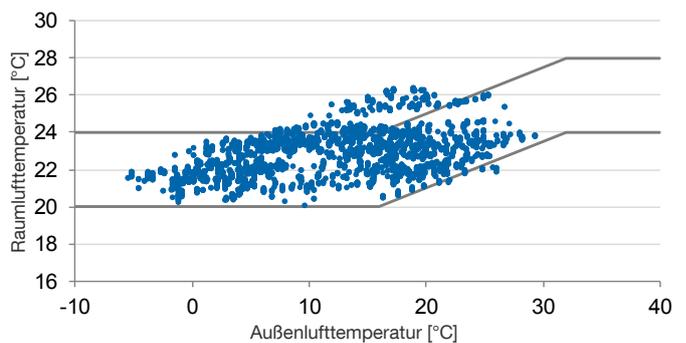


Abb. 45: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Diedorf

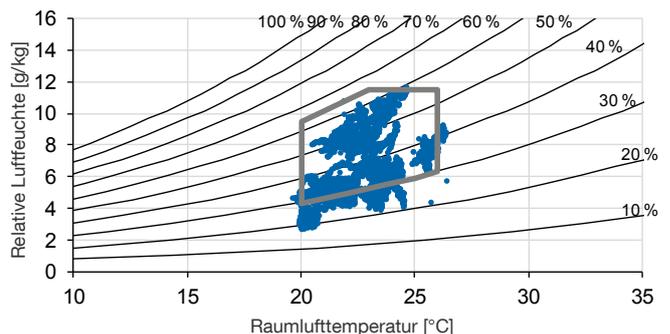


Abb. 46: Raumlufttemperatur im Verhältnis zur Raumluftfeuchte, Diedorf

te Luft absaugen. Dadurch wurde eine Mehrfachnutzung der Luft ermöglicht.

Die Zuluft wird im Sommer über ein Kühlregister auf 18 °C gekühlt. Während der Heizperiode erwärmt ein Heizregister die Zuluft, wenn die Wärme der Wärmerückgewinnung nicht ausreicht. Es gibt keine winterliche Luftbefeuchtung. In den ausgewerteten h,x-Diagrammen sie stellen einen Zusammenhang zwischen Feuchte und Temperatur her – zeigt sich, dass ca. 20 % der gemessenen Werte mit einer zu geringen Luftfeuchte außerhalb des Komfortbereichs liegen.

Die Dimensionierung der technischen Systeme wurde zu einem frühen Zeitpunkt vorgenommen und in die architektonische Planung integriert. Um den Strombedarf der Lüftungsgeräte zu minimieren, wurde auf strömungstechnisch optimierte Kanäle geachtet, was bedeutet, dass die Kanalquerschnitte so ausgelegt werden, dass geringe Strömungsgeschwindigkeiten und damit geringe Druckverluste entstehen.

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass der Pettenkofer-Grenzwert von 1000 ppm sowohl in der Heiz-, wie auch Kühlperiode selten überschritten wird und sich das System als sehr zielführend erweist. Liegt die CO₂-Konzentration unter 1100 ppm, schaltet die sich Lüftung aus. Nur in 5 % der Fälle liegt die Konzentration über 1000 ppm, für 1500 ppm liegt sie gar unter 1 %, was auf eine konstante hygienisch optimale Luftqualität schließen lässt.

Die Wärmeerzeugung erfolgt über zwei zentrale Pelletkessel. Diese übernehmen die Versorgung der Heizwärme und decken den Warmwasserbedarf der Sporthalle und der Küche. Dazu gibt es zwei Pufferspeicher, so dass auch kurze Verbrauchsspitzen aufgefangen werden, wie sie typischerweise am Vormittag entstehen. Aufgrund der Speicherkombination wird der Pelletkessel mit optimalem Wirkungsgrad betrieben. In den Klassenräumen und Toiletten gibt es kein Warmwasser.

Im Heizfall ist sowohl in den Klassenräumen als auch in den Fluren eine Fußbodenheizung mit niedriger Vorlauf-temperatur integriert. Diese kühlt in den heißen Wochen im Jahr den Raum und ist damit für die Konditionierung der Raumtemperatur zuständig. Die Kühlung spielt eine große Rolle, da durch die Personen große interne Lasten verursacht werden und folglich die Räume vor allem in den Sommermonaten gekühlt werden müssen. Die Kälteerzeugung erfolgt abhängig von der Außenlufttemperatur und -feuchte kombinierbar über eine in der mechanischen Lüftung integrierten adiabaten Verdunstungskühlung und einer Kompressions-Kältemaschine zur Deckung der Spitzenlast.

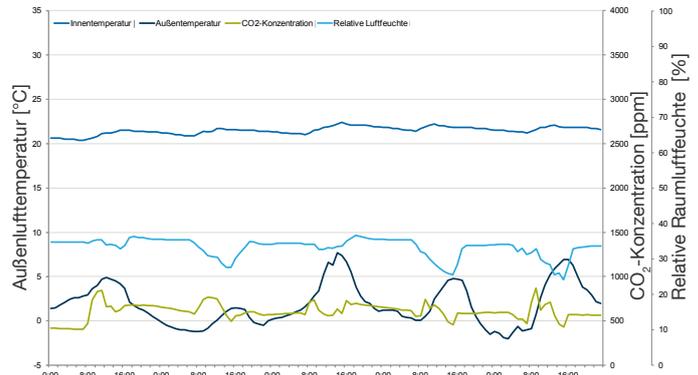


Abb. 47: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Diedorf

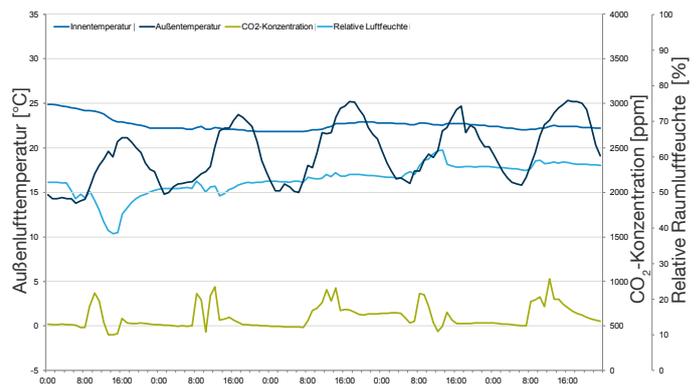


Abb. 48: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Diedorf

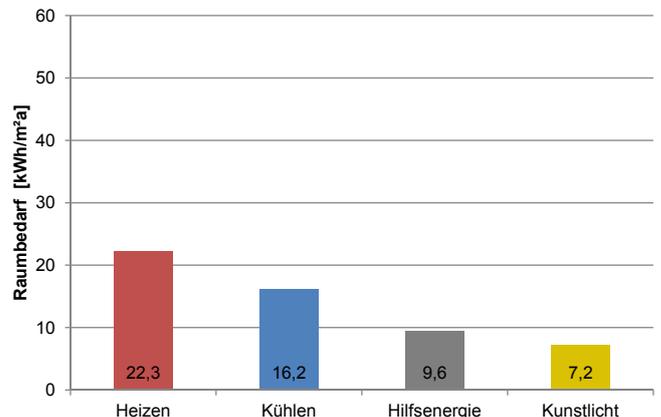


Abb. 49: spez. Raumbedarf, Diedorf

Alle Räume haben einen außenliegenden, automatisch gesteuerten vertikalen Sonnenschutz, welcher direkt auftretendes Sonnenlicht verschattet und nur diffuses Licht in die Klassenräume lässt. Dieser Lamellenraffstore wird abhängig von aktuellen Daten einer Wetterstation gesteuert, so dass die oberseitig aluminiumfarbenden und unterseitig weißen Lamellen sowohl als Sonnenschutz fungieren als auch die Tageslichtnutzung gewährleisten.

Das Kunstlicht wird in der gesamten Schule tageslichtabhängig und über Präsenz gesteuert, um die dafür aufzuwendende Energie so gering als möglich zu halten. In den Klassenräumen schalten die Nutzer bei Bedarf das Kunstlicht selbstständig an. Sie haben es nun eigenverantwortlich in der Hand, das Tageslicht für eine gute Beleuchtung zu steuern. Ein Helligkeitssensor regelt, wann das Licht wieder automatisch gedimmt und abgeschaltet wird, sobald es die geforderte Beleuchtungsanforderung übersteigt. Ein Präsenzmelder schaltet das Kunstlicht aus, wenn nach 15 Minuten keine Bewegung im Klassenraum gemessen wurde. Studien haben gezeigt, dass die Kombination aus Bewegungssensoren mit einer tageslichtabhängigen Stärkeregelung den Stromverbrauch im Vergleich zu einem herkömmlichen Ein-/Ausrichter um mehr als 60 % senken. Die Regelung ist dennoch für alle Nutzer gewöhnungsbedürftig und einige fühlen sich von der Technik bevormundet.



Abb. 50: Klassenraum in Dierdorf

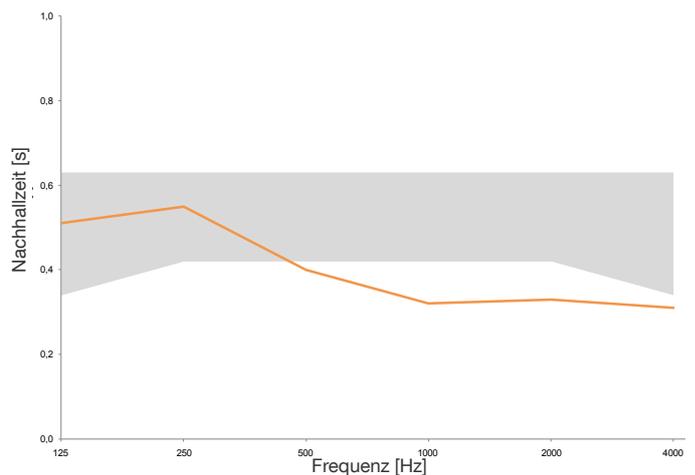


Abb. 51: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Dierdorf

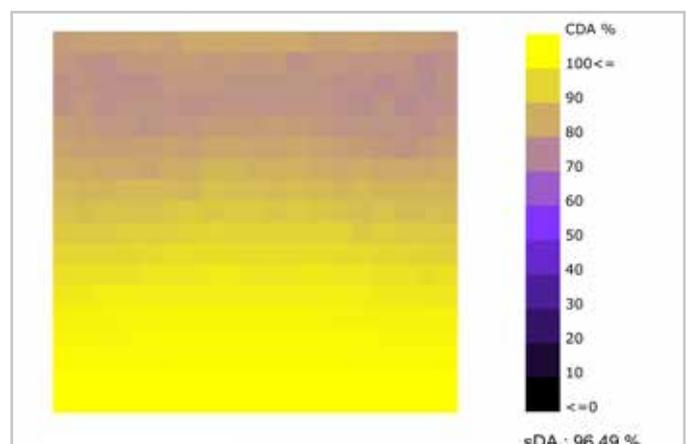


Abb. 52: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Dierdorf

Rückschlüsse auf die Aufenthaltsqualität

3.2.6. Aufenthaltsqualität und Lernfähigkeit

Die Frage nach angemessener Luftqualität, sowie nach thermischem und visuellem Komfort ist ein Thema, das die Architekten und Baumeister, aber auch die Wissenschaft schon im 19. Jahrhundert beschäftigte. Lassen sie uns an der Stelle die Grundlagen der Aufenthaltsqualität in Schulen und deren Auswirkungen auf die schulischen Leistungen angelehnt an die Dissertation von Manuel Winkler [14], beschreiben. Winkler hat in seiner Dissertation den aktuellen Stand der Forschung, aber auch die Geschichte des Themas umfänglich aufgearbeitet. Bereits im Jahre 1869 schreibt Salzmann [7], zitiert nach Luley, „dass sich die menschliche Seele bei dem Eintritte in ein geräumiges Zimmer, das durch hohe und lichte Fenster und weiße Wände hinlänglich erleuchtet, dessen Luft, wo nicht mit balsamischen Gerüchen geschwängert, doch nicht durch Ausdünstungen vergiftet ist, in dem Ordnung und Reinlichkeit dem Ankömmling entgegenlachen, ungemein aufheitere, und ihn geneigt mache, alles, was er da sehen und hören wird, gut aufzunehmen. Dies ist augenscheinlich der Aufmerksamkeit unserer Vorfahren entwischt, denn sonst würden sie auf die Auslegung der Schulstuben, die mehrtheils einem düsteren Kerker ähnlich sehen, mehr Sorgfalt gewendet haben. Es wäre daher zu wünschen, dass künftig bei Anlegung neuer und Ausbesserung alter Schulen darauf gesehen würde, dass sie hinlänglich Raum und Licht, womöglich auch einfache Verzierungen bekämen.“ Pettenkofer [8] – nach ihm wurde dann auch die sog. Pettenkoffer-Zahl einer CO₂-Konzentration von 1.000 ppm als Schwellenwert für gute Luftqualität benannt – schreibt bereits 1858: „Alle Väter und Mütter wissen, dass die Gesundheit ihrer Kinder durchschnittlich häufige Störungen zu erleiden beginnt, sobald sie anfangen, die öffentlichen Schulen zu besuchen. Wenn sie sich dann in den Ferien wieder erholt, und wieder ein blühendes Aussehen gewonnen haben, so bleichen sie bald wieder ab und kränkeln häufiger, wenn die Schule wieder beginnt.“

Seit der 1. Wärmeschutzverordnung im Jahre 1977 wird der Energiebedarf – seinerzeit noch beschränkt auf den Wärmebedarf – reguliert, mit dem Ziel der Energieeffizienz. In diesem Zuge wurden Fassaden in zunehmender Dichtigkeit ausgeführt. In dicht besetzten Räumen, wie z.B. Klassenräumen, hat dies eine Verschlechterung der Luftqualität zur Folge, was wiederum dazu führt, dass zunehmend eine maschinelle Lüftung eingesetzt wird.

Die bauliche Qualität unserer Schulen zeigt exemplarisch eine vom Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) durchgeführte Studie. Dabei erfolgte eine Aufnahme und Bewertung von 22 Schulen im Landkreis Miesbach der bau-

lichen Gegebenheiten, die Einfluss auf das Raumklima nehmen: Raumgrößen, Belegungsdichte, Bauschwere, Sonnenschutzeinrichtungen, Fensterausführungen auch technische Einrichtungen wie Wärmeübergabemöglichkeiten, Belüftungen und Tageslichtversorgung. Die Studie zeigt, dass Klassenräume „nahezu ausschließlich über Fenster belüftet“ werden – was zeigt, dass bei einer Sanierung unserer Bestandsgebäude die Frage des Luftaustauschs von großer Bedeutung ist – und „etwa zwei Drittel der Klassenräume (weisen) eine gute bis mittlere Tageslichtversorgung“ auf. [9].

Aus zahlreichen Studien ist hinreichend erforscht und nachgewiesen, dass Innenraumklima und Luftqualität auf die Arbeitsleistung der Nutzer Einfluss haben. Mendell und Heath [10] studierten 500 Veröffentlichungen und 30 Primärquellen im Kontext von Schülerleistung in Abhängigkeit von Luftqualität und thermischem Komfort. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass schlechte Innenraumqualität (Indoor Environment Quality, IEQ) in Schulen ein häufig vorkommendes Phänomen ist und diese einen eindeutigen und wissenschaftlich nachweisbaren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Aufmerksamkeit der Schüler hat.

Vor allem hinsichtlich der CO₂-Konzentration, stellt sich die Frage, was ein gut austarierter Schwellenwert sein kann, der den Spagat zwischen guter Luftqualität auf der einen Seite und einem hohen Installationsaufwand und Energieverbrauch auf der anderen Seite gerecht wird. Internationale Studien kommen auf unterschiedliche Ergebnisse: So stellten Shendell et al. [11] in ihrer Studie in 436 Klassenzimmern eine Steigerung der „relativen Abwesenheitszeit“ um 10 bis 20 % fest, wenn die Kohlendioxidkonzentration auf 1.000 ppm über der Außenluft anstieg. Ribic [12] konnte zeigen, daß eine Erhöhung der CO₂-Konzentration um ca. 3.000 ppm eine Minderung der Konzentrationsleistung um etwa zehn Prozent bewirkt. Wargocki und Wyon [13] führen an, dass eine Reduzierung von ca. 1.800 ppm auf ca. 800 ppm eine signifikante Reduzierung der Fehlerzahl in einem numerischen Test mit sich brachte. Winkler [14] kommt in seiner Promotion an der Hochschule München zum Ergebnis: „Im hier untersuchten engen Bereich der Kohlendioxidkonzentration scheint es den Probanden nicht möglich zu sein, Unterschiede festzustellen. Eine Raumluftqualität von bis zu 1.500 ppm sollte also als ausreichend „gut“ gelten.“ Alle Studien haben gemein, dass eine erhöhte CO₂-Konzentration zu einer Verminderung der Lernleistung führt – jedoch liegen die Werte deutlich höher als die Pettenkofferzahl und auch höher als die in der DIN 13779:2007 empfohlenen Werte: IDA 1 bis zu 400 ppm über Außen, IDA 2 bis 600 ppm über Außen, IDA 3 bis 1.000 ppm über Außen. IDA 4 mit über 1.000 ppm über Außen wird als niedrige Raumluftqualität beschrieben. Die CO₂-Konzentration der Außenluft liegt bei ca. 400 ppm.

Bereits im Jahre 1870 erließ das Kgl. Württ. Ministerium für Kirchen und Schulwesen eine Verfügung, die wichtige technische Einzelheiten regelt. Diese haben sich bis heute nicht wesentlich verändert. Dort heißt es, dass „dem Kinde ein Luftraum von bis zu 5 cbm gegeben werden müsse, und dazu ein Minimum der Zimmerhöhe von 3,40 m anzunehmen“ (§5,5) sei. Die Fenster sollen, „so hoch gegen die Decke des Zimmers herangeführt werden, als es die Fensterkonstruktion irgend zulässt“ (§10). „Den Fenstern gegenüber, ungefähr in gleicher Höhe, sollen in der Türe oder in der Wand eine, nach Umständen mehrere, durch Schieber oder Jalousien schließbare Gegenöffnungen angebracht sein“ (§13) (zitiert nach Bauer [15]). Leider hat sich im Laufe der Zeit häufig das Volumen je Schüler, als auch die Raumhöhe reduziert.

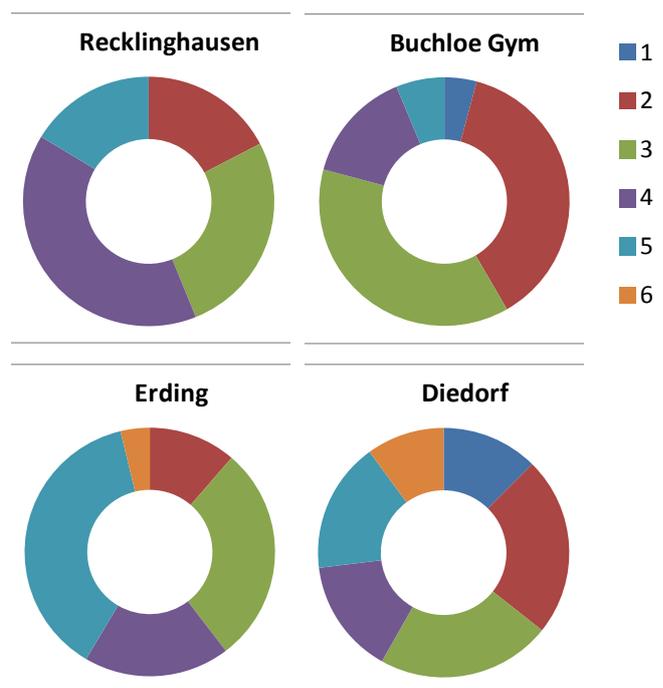
Die vom Fraunhofer Institut durchgeführte, repräsentative Datenerhebung für den Landkreis Miesbach mit Daten von 106 Klassenzimmern zeigt, dass der Median der vorhandenen Raumhöhen bei 3,06 m liegt. Fünfundzwanzig Prozent lagen unter 2,99 m und das Minimum lag bei 2,44 m, das Maximum bei 4,73 m. Für ein Standardklassenzimmer mit 60 m² bedeutet das bei 2,99 m Höhe eine Reduzierung des zur Verfügung stehenden Luftraumes um ca. 12 %, für Klassenzimmer mit dem kleinsten Wert von 2,44 m Höhe sogar um etwa 30 %, was zwangsläufig zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration führt.

Neben der Luftqualität nimmt auch der thermische Komfort Einfluss auf die Leistungsfähigkeit bzw. Lernleistung von Schülern und Studierenden [16]. Aus dem Jahre 1968 stammt eine Studie von Pepler und Warner, bei der sie die Leistungsfähigkeit mit sechs unterschiedlichen Temperaturen an je sechs männlichen und weiblichen Studierenden testeten. Dabei wollten sie herausfinden, wie schnell und effektiv wissenschaftliche Ausdrücke und Konzepte erlernt werden konnten. Erforscht wurde neben der „Geschwindigkeit beim Lernen, die Fehlerrate und der subjektiv empfundene Aufwand beim Lernen“ [17]. Die Temperatur hatte einen signifikanten Einfluss auf alle drei Bereiche. Bei 26,6 °C und 45 % Luftfeuchte war der subjektiv „empfundene Aufwand am geringsten, die Fehlerrate am niedrigsten und die Studenten lernten schneller“. Die relativ hohen Temperaturen und Luftfeuchte bei der die besten Ergebnisse erzielt wurden, wurde von den Autoren der Studie von Sedlbauer et al. auf eine thermische Adaption zurückgeführt, da die Studie bei sehr hohen Außentemperaturen durchgeführt wurde.

3.2.7. 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 der natürlich belüfteten Schulen in Ostfildern 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 im Park, Ostfildern, dass eine halbwegs intensive Lüftung lediglich in der Mittagspause stattfindet. Die Dichtigkeit der Hülle führt dazu, dass die Luft sich auch nicht hinreichend im Laufe der Nacht austauscht, so dass morgens bei Unterrichtsbeginn bereits eine CO₂-Konzentration von 1.500 ppm vorliegt – sprich da bereits der Schwellwert für gute Luft überschritten ist. Es stellt sich also die Frage, ob es ausreicht, in einer natürlich belüfteten Schule einfach nur öffnende 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 – so wie dies die Verfügung des Kgl. Württ. Ministerium aus dem Jahre 1870 bereits vorsah.



Die erstellten Grafiken zur Häufigkeitsverteilung der CO₂-

Abb. 53: Bewertung der Luftqualität

Konzentration zeigen auf, wie oft während der Nutzungszeit gewisse Schwellenwerte überschritten werden. Bei der natürlich belüfteten Schule zeigt sich ein deutlich unterschiedlicher Verlauf im Sommer und Winter. Bei den vier mechanisch belüfteten Schulen liegen die Sommer- und Winterkurven sehr viel näher zusammen und alle haben objektiv gesehen eine sehr gute Luftqualität.

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. Das Berufskolleg in Recklinghausen hat keine individuell öffnbaren Fenster und erhält in der subjektiven Befragung – trotz der gemessenen sehr guten Luftqualität – dennoch nur die Durchschnittsnote von 3,6. Durch das subjektive Ergebnis der Befragung muss man die mechanische Lüftung als alleiniges Mittel der Wahl sicherlich hinterfragen.

3.2.8. Luftfeuchte

Ein erhöhter winterlicher Luftaustausch führt einerseits zu geringeren CO₂-Konzentrationen, gleichzeitig reduziert das kontinuierliche Einbringen der trockenen Außenluft die Raumluftfeuchte. Die natürlich belüftete Schule in Ostfildern unterschreitet die empfohlenen 30 % relative Raumluftfeuchte nie. Dagegen zeigen die Schulen mit mechanischer Lüftungsanlage ohne Feuchterückgewinnung 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 Kontaktlinsenträgern Unbehagen bereitet. Eine Ausnahme bildet die Schule in Erding, wo aufgrund einer Wärme- und Feuchterückgewinnung die relative Luftfeuchte an kalten Tagen nicht wesentlich unter 30 % fällt. Interessanterweise stellt sich aber an kühleren Tagen in der Übergangszeit eine relative Luftfeuchte um die 20 % ein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits bei Außentemperaturen von 5 – 10 °C, sobald die Sonne scheint, die Lufttemperatur im Raum auf 24 °C ansteigt, wodurch wiederum die relative Feuchte sinkt.

3.2.9. Thermischer Komfort

Beim thermischen Komfort im Winter zeigt sich vereinzelt, dass die Mindesttemperatur von 20 °C nicht erreicht wird. Dieses Problem weisen insbesondere Schulen auf, in denen die Wärmeübergabe an die thermische Masse gekoppelt ist. Vor allem die Schule in Recklinghausen, in der primär die Betondecke mit luftgeführter Betonkernaktivierung das Heizen übernimmt, offenbart die Regelungsproblematik träger Heizsysteme in Schulen. Vor allem in den Übergangszeiten ist es in den Morgenstunden nötig, die Räume aufzuheizen. Durch die Wärmeabgabe der Schüler und die solare Einstrahlung drohen dann die Räume – aufgrund der Trägheit der Systeme – bereits bei gemäßigten Außentemperaturen zu überhitzen, so dass wenig später dann gekühlt werden muss.

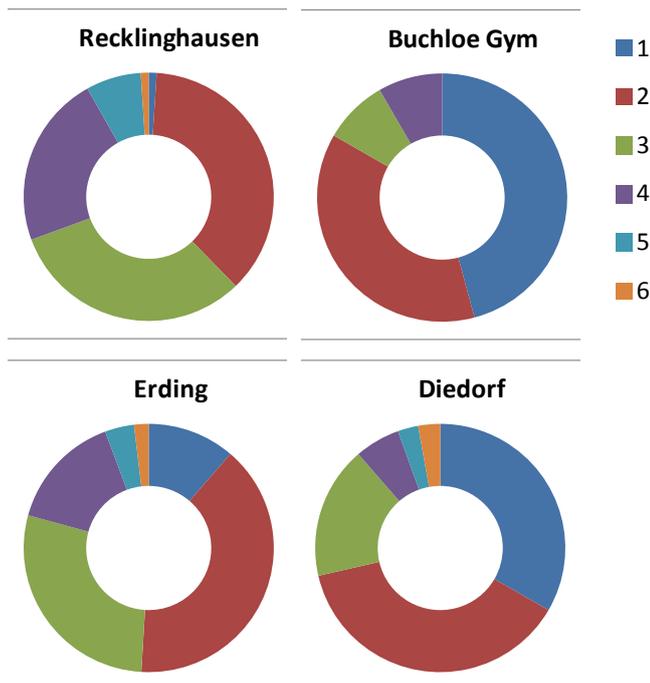


Abb. 54: Bewertung der Luftfeuchte

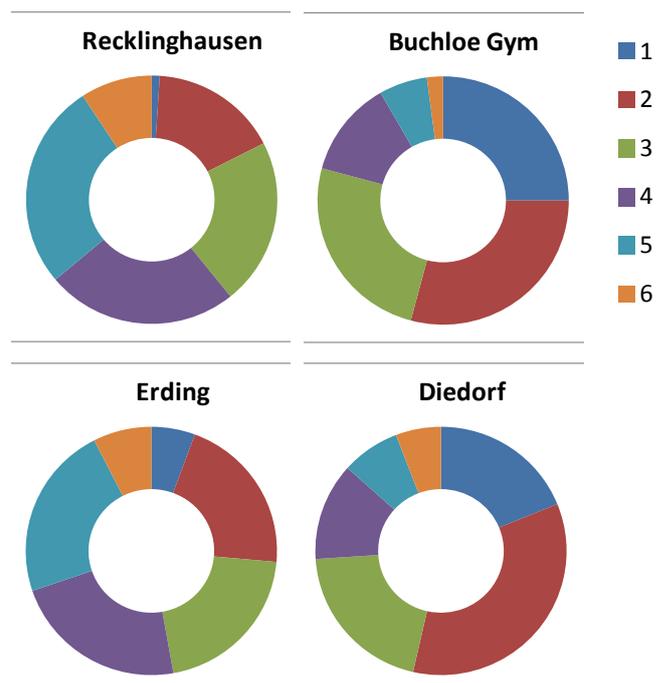


Abb. 55: Bewertung des winterlichen Komforts

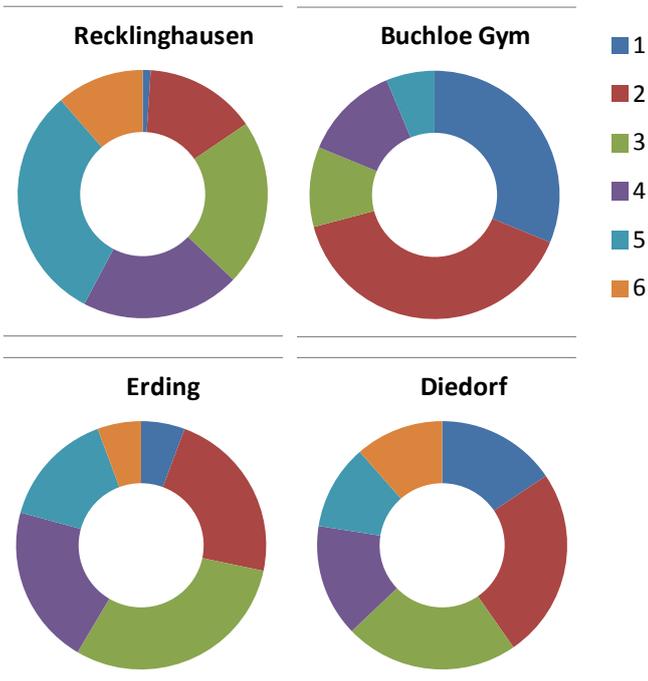


Abb. 56: Bewertung des sommerlichen Komforts

Eine sommerliche Überhitzung findet in der Schule im Park, Ostfildern statt. Hier wird offensichtlich die thermische Gebäudemasse durch eine fehlende Nachtlüftung nicht aktiviert und der textile außenliegende Sonnenschutz hält die solare Lasten nicht hinreichend zurück, so dass es bereits bei gemäßigten Außentemperaturen zu einer Überhitzung kommt.

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 Nachtlüftung. 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 in den vier anderen Schulen, die alle mit einer maschinellen Kühlung ausgestattet sind, in der Regel sehr gut, sowohl in Form der Zuluftkühlung wie z. B. in Erding als auch bei Kühldecken wie im Gymnasium Buchloe. Obwohl man bei letzterer an den Messdaten bei steigenden Außen-

temperaturen fast eine Unterkühlung beobachten kann, schneidet diese Schule bei der Schülerbefragung im Vergleich zu den anderen gekühlten Schulen mit Abstand am Besten ab. In den Übergangszeiten wird in einigen Schulen mit trägem Übergabesystem die maximale Komforttemperatur überschritten. Trotzdem geben die Schüler und Lehrer nur eine mittlere Bewertung, häufig kommt die Bemerkung, es sei tendenziell zu warm. In Recklinghausen und Erding lässt sich die subjektive Wahrnehmung darauf zurückführen, dass die Fenster nicht oder nur eingeschränkt öffnbar sind. Die Forschung hinsichtlich der sogenannten adaptiven Komfortstandards zeigt eindeutig, dass die Nutzer in natürlich belüfteten Räumen eine höhere Raumtemperatur akzeptieren.

3.2.10. 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.

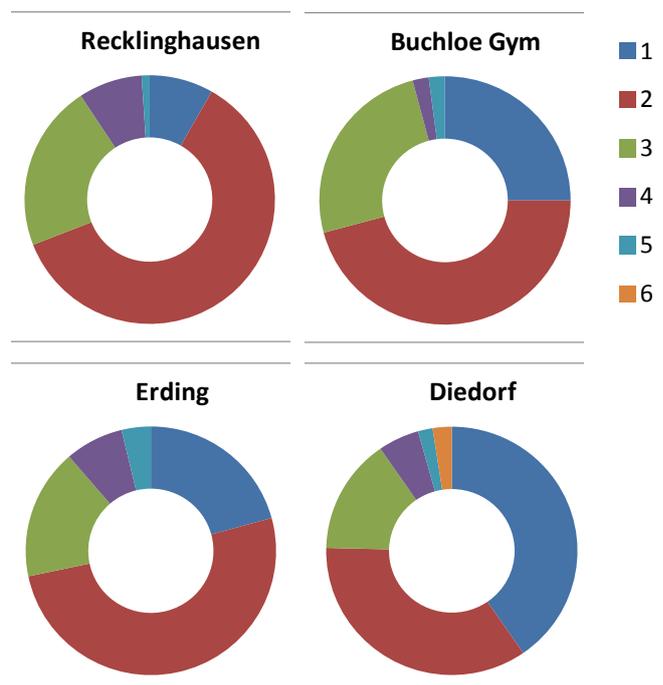


Abb. 57: Bewertung des akustischen Komforts

3.2.11. Visueller Komfort

Alle Schulen erzielen in der Tageslichtsimulation gute bis sehr gute Ergebnisse. Ihr Fensterflächenanteil beträgt durchschnittlich 68 %, wobei Ostfildern mit 55 % das Minimum, Recklinghausen mit 100 % das Maximum markieren. 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 stark schließen, verringert sich der Sichtbezug nach außen. So kommt das Berufskolleg Recklinghausen trotz der Vollverglasung auf einen cDA-Wert von 83,6 %, das Gymnasium Buchloe auf 90,8 % und Diedorf auf 96,5 %. 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. In einigen Schulen wie z. B. Erding reagieren die Lamellen auf den Sonnenverlauf und verändern ihren Neigungswinkel. So wird in der FOS/BOS Erding ein cDA-Wert von fast 100 % erreicht. 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 verstünden 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. So dunkelt das orangefarbene Textil in Ostfildern wegen seiner geringeren Tageslichttransmission den Innenraum stark ab (cDA 76,7 %).

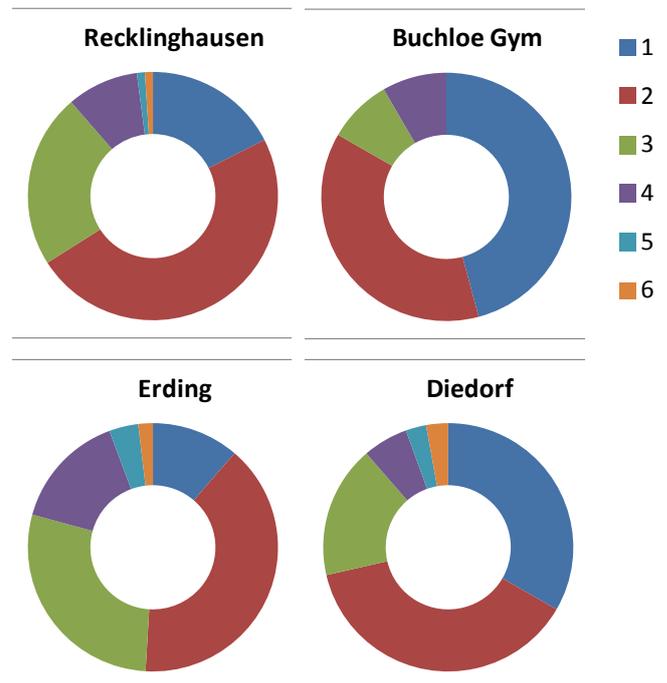


Abb. 58: Bewertung des visuellen Komforts

3.3. Rückschlüsse auf die Technik und den Energiebedarf

3.3.1. 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“. So gab es in Diedorf die Situation, dass bei einer Aufführung der Eingriff in die Lichtsteuerung nicht möglich war, was die Band als auch die Besucher empör-

te. Sondernutzungen sind häufig in der Automatisierung nicht abgebildet. Diese Betriebserfahrungen lassen sich natürlich in die Automatisierung einpflegen – es bedarf aber permanenter Bemühungen der Betriebsoptimierung. Nicht umsonst durchlaufen Schulen wie beispielsweise Diedorf und Erding für die Einregulierung des Systems eine längere Monitoringphase. Ein manueller Eingriff wird vom Nutzer häufig als eine „Störung des Systems“ wahrgenommen. Sicherlich sollten sich die Planungsbeeteiligten 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 Schulen in Recklinghausen und Erding zeigen, 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].

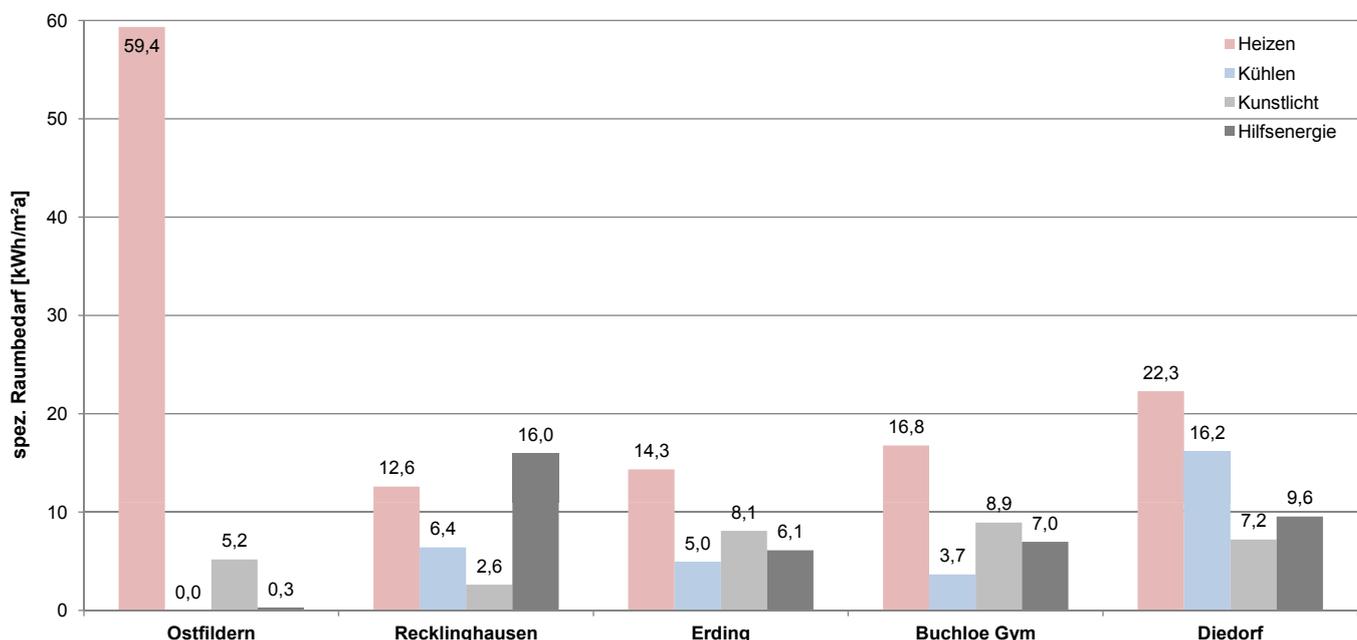


Abb. 59: Simulationsergebnisse für den Raumbedarf (Heizen, Kühlen, Kunstlicht und Hilfsenergie)

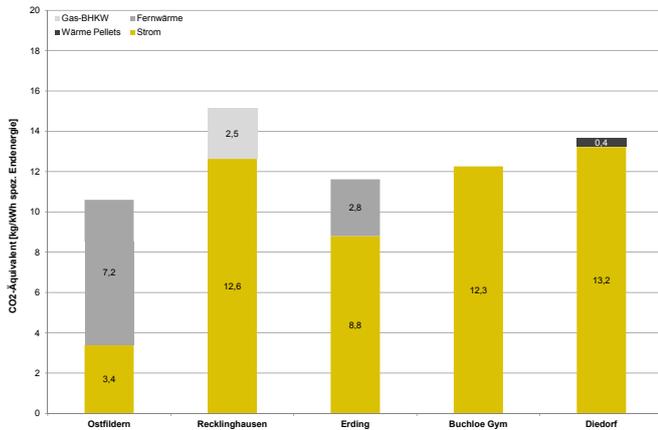
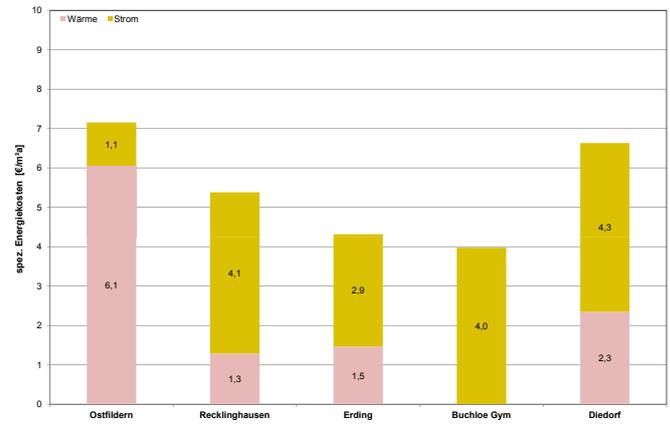

 Abb. 60: Simulationsergebnisse für das CO₂-Äquivalent


Abb. 61: Simulationsergebnisse für die Energiekosten des Gebäudebetriebs

3.3.2. Von der Energieerzeugung zum Energiebedarf

Insgesamt zeigen die mechanisch belüfteten Schulen mit Wärmerückgewinnung eine Verschiebung des Energiebedarfs von Wärme zu Strom. So weist Ostfildern die geringsten CO₂-Emissionen auf, trotz und wegen der fehlenden Lüftungsanlage. Zwar ist der Heizwärmebedarf wegen der fehlenden Wärmerückgewinnung im Vergleich zu den anderen Schulen ca. 3-fach so hoch, der Aufwand für die Hilfsenergie (Lüftungsanlage) aber minimalst (Abb. 59). In Kombination mit dem Fernwärmeanschluss resultiert so ein CO₂-Äquivalent von 10,6 kg/kWh spez. Endenergie. Das Max-Born-Berufskolleg markiert mit 15,2 kg/kWh spez. Endenergie das obere Ende, wenn auch der Wert recht nah an Ostfildern liegt und immer noch als sehr gut eingestuft werden kann. Auch die anderen, technisch sehr modernen Schulen Diedorf, Buchloe und Erding zeigen allesamt ein ähnliches, sehr gutes Ergebnis mit geringen CO₂-Emissionen (Abb. 60).

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?

Auch bei der Betrachtung der Energiekosten für den Gebäudebetrieb liegen alle Schulen - unabhängig von der technischen Ausstattung - mit ca. 4 bis 7 Euro je m² und Jahr recht nahe im niedrigen Bereich zusammen.

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 Filter nicht rechtzeitig gereinigt werden, wurden genau-

so 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“ generell 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.

4. Integrale Planung der Waldorfschule Umlandshöhe

Der Neubau des Oberstufengebäudes und des Verwaltungsneubaus der Waldorfschule in Stuttgart wird in einem integralen Planungsprozess bearbeitet. Dabei arbeiten Architekten, Bauphysiker, Energie- und HLSE-Planer gemeinsam mit Planern der anderen Gewerke (Tragwerk, Brandschutz, ...) sowie in enger Abstimmung mit dem Bauherrn und den Nutzern an einer Lösung, die als zentrales Ziel ein nachhaltiges Gebäude mit einer hohen Aufenthaltsqualität und einem geringen Bedarf an fossiler Energie hat.

Maßnahmen zur Energieeffizienz werden auf diese Weise nicht auf einen bestehenden Gebäudeentwurf aufgesetzt, sondern sind vielmehr integraler Bestandteil der Architektur. So unterstützt der Gebäudeentwurf durch eine entsprechende Form beispielweise eine natürliche, wind- und thermisch angetriebene Belüftung, die Fasadengestaltung wird auf eine Nutzung von blendfreiem Tageslicht optimiert, sodass Lüftungs- und Beleuchtungsstrom eingespart wird. Der Planungsprozess wird begleitet von dynamischen Simulationsrechnungen mit denen die Effizienz verschiedener Maßnahmen quantifiziert wird und der Nutzerkomfort in den Schulräumen nachgewiesen wird.

In den Aufenthaltsbereichen ist eine natürliche Be- und Entlüftung gegeben und der sommerliche Wärmeschutz wird primär über passive Maßnahmen erreicht, zum Beispiel über die offene thermische Masse zum Raum in Verbindung mit einem effizienten außenliegenden Sonnenschutz und der Nachtauskühlung. Gleichzeitig wird die Tageslichtsituation in den Gebäudebereichen durch die Raum- und Fensteranordnungen optimiert. Für die Wärmeenergieerzeugung wird die Verbindung mit den Komponenten aus dem bestehenden Nahwärmenetz vorgesehen. In dem Eurythmiesaal gibt es eine passive Direktkühlung als Bauteilaktivierung in der Trennwand. Die Wärme wird über Erdwärmekollektoren an das Erdreich unterhalb der Bodenplatte übergeben. Des Weiteren wird im Neubau die Einbindung der natürlichen Luftvorkonditionierung über ein Erdkanalsystem berücksichtigt und das Atrium zur Luftverteilung in die Klassenzimmer genutzt. Durch aktive Überströmelemente wird der Luftaustausch unterstützt und der Komfort optimiert. Durch Luftbewegung im Hochsommer wird der empfundene Komfort optimiert, dafür kommen in Sonderbereichen Deckenlüfter zum Einsatz.

Klimaanalyse

Der Konzeptentwicklung werden stündlich aufgelöste Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes¹ zugrunde gelegt. Der Standort Stuttgart fällt in den Bereich des Testreferenzjahres 12 – Mannheim. Für die thermischen Simulationen wird der Extremdatensatz verwendet, der

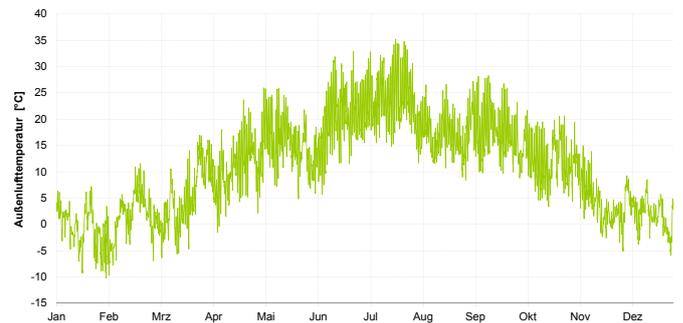


Abb. 62: Verlauf der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)

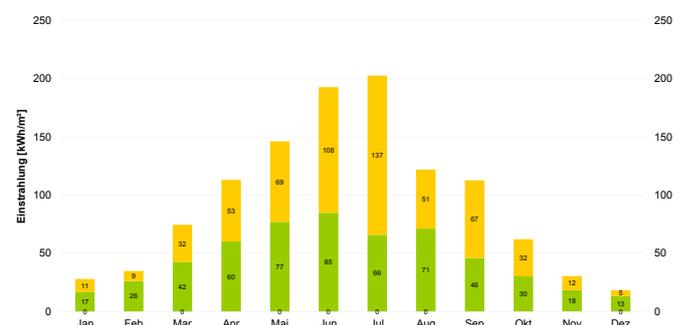


Abb. 63: Monatliche solare Einstrahlung (direkt und diffus) auf die Horizontale (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)

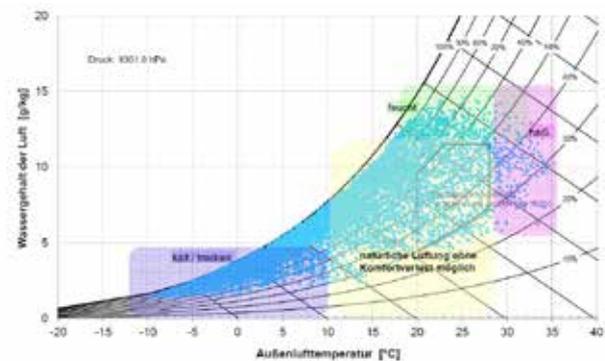


Abb. 64: Absolute Außenluftfeuchte über der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)

sowohl im Winter wie auch im Sommer Perioden mit extremen Bedingungen (niedrige bzw. hohe Temperaturen und Außenluftfeuchten) enthält.

Am Temperaturverlauf in Abbildung 62 erkennt man eine kalte Winterperiode mit Temperaturen bis -10°C über mehrere Tage sowie mehrere längere sommerliche Hitzeperioden mit Tagestemperaturen über 30°C . Nur an wenigen Sommertagen bleiben jedoch auch die Nachttemperaturen über 25°C .

Die Summe der solaren Einstrahlung auf eine horizontale Fläche beträgt etwa $1140 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (vgl. Abbildung 63).

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

4.1. Architektonisches Konzept

4.1.1. Baugrundstück

Das Gelände der Freien Waldorfschule Stuttgart liegt in exponierte Halbhöhenlage unterhalb der Uhlandshöhe zwischen dem alten Stadtkern und den Ende des 19. Jahrhunderts errichteten Arbeitersiedlungen im Bezirk Ost.

Das Planungsgebiet ist geprägt durch eine großzügige Begrünung und das starke Gefälle zur Innenstadt hin: Zwischen dem Pausenhof und der Haußmannstraße fällt das Gelände um ca. 6m ab.

In der Gründerzeit und vor allem in der Zeit zwischen erstem und zweitem Weltkrieg wurden in der durchgrünten Umgebung freistehende Einzelhäuser errichtet. In diese „Villengegend“ fügt sich das Gelände der Schule mit seinen Einzelbauten auf dem Campus ein.

4.1.2. Baukörper

Der Oberstufenneubau fügt sich durch seine Gestaltung als eine „Villa mit Anbau“ in die Nachbarschaft unter der Uhlandshöhe ein, indem Gestaltungselemente der benachbarten Gebäude aufgenommen und in veränderter, der neuen Baugestalt gemäßer Form zum Ausdruck gebracht werden.

Der Neubau ist in drei Baukörper unterteilt, die sich von der Formgebung wie auch vom Material her unterscheiden: Zur Haußmannstraße hin tritt der Neubau als monolithische „Villa“ in Erscheinung, im hinten Bereich beim Durchgang vom Pausenhof zum Festsaal als horizontal gelagerter „Anbau“, während das gläserne Atrium dazwischen beide Bereiche miteinander verbindet.

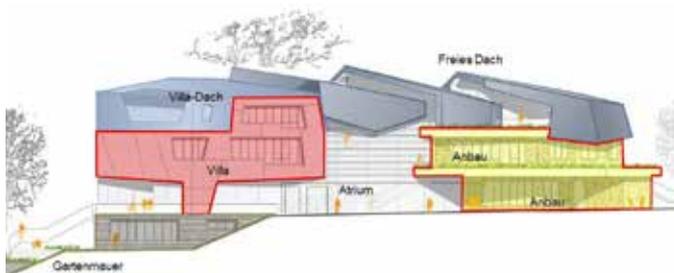


Abb. 65: Optische Unterteilung des Neubaus in drei Baukörper

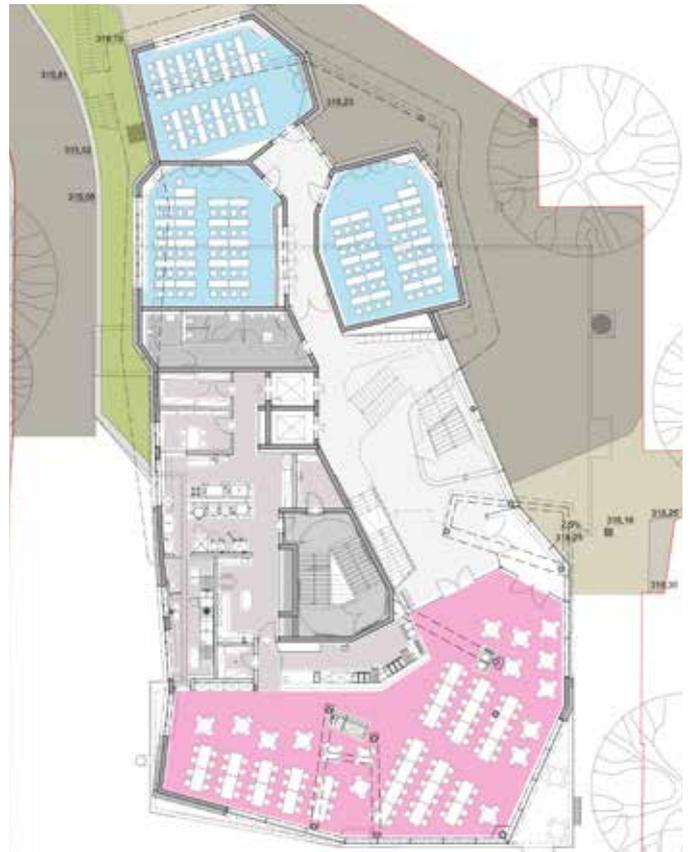


Abb. 66: Grundriss Erdgeschoss



Abb. 67: Grundriss 1. Obergeschoss

Die „Villa“ wird von einer einheitlichen Materialität bei Fassade und Dach geprägt. Ihr etwas strenger geformter Baukörper zeichnet sich durch seine skulpturale Bearbeitung aus. Besonders auffällig sind dabei der zur Hausmannstraße „offene“, d. h. verglaste Speisesaal wie auch die Dachverglasung der Malräume. Das Dach wird als fünfte Fassade in einem für „Villa“ und „Anbau“ gleichen Material gestaltet. Über zwei „Füße“ ist die „Villa“ solide auf dem Garten verankert.

Der Baukörper des Anbaus wirkt durch seine frei gestalteten Ebenen luftiger und leichter. Die Unterrichtsräume können hier etwas freier angeordnet und deshalb stärker den pädagogisch-inhaltlichen Bedürfnissen angepasst werden. Durch seine Höhe und Gestalt stellt er eine Verbindung her zur bestehenden Bebauung auf dem Schulgelände.

Den Anbau und das Atrium überspannt ein frei gestaltetes Dach, das in seiner Gestaltung zur Nachbarschaft hin vermittelt, die Räume optimal belichtet und belüftet und anthroposophische Architektur zeitgenössisch interpretiert.

Die der Hofseite gegenüberliegende Fassade wurde in ihrem äußeren Erscheinungsbild einheitlicher gestaltet. Durch das fehlende Element eines Atriums fügen sich monolithische „Villa“ und gegliederter „Anbau“ hier zu einer harmonischen Einheit zusammen. Durch die so entstehende optische „Längung“ des Baukörpers wird einerseits perspektivisch eine direkte Verbindung zum Haupthaus hergestellt, andererseits auf die Fassade des gegenüberliegenden Gebäudes Bezug genommen.

Durch seine in der Aufsicht annähernd U-förmige Ausbildung bildet der Oberstufenneubau eine einladende Geste hin zu Pausenhof, Haupthaus und Hortbau. Das transparente Atrium führt als „vertikaler Pausenhof“ den Außenraum ins Gebäude hinein fort.

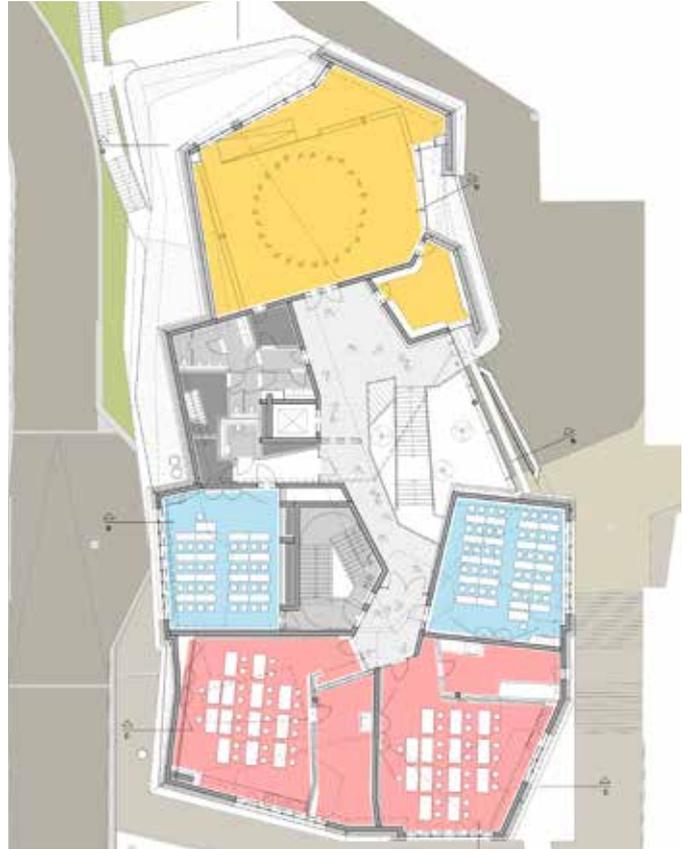


Abb. 68: Grundriss 2. Obergeschoss



Abb. 69: Ansicht Süden



Abb. 70: Längsschnitt

4.1.3. Gebäude

Mit dem Oberstufenneubau werden neue Voraussetzungen für einen pädagogisch sinnvollen und sozial gesunden Schulalltag geschaffen. Die eigentlichen Unterrichtsräume sollen bestmögliche Bedingungen zum Lernen bieten, während die Verkehrsflächen nicht nur der Erschließung, sondern auch der Begegnung, der Kommunikation und dem informellen Austausch dienen und Ausstellungen ermöglichen. Das Herz des neuen Gebäudes ist das Atrium, in dem alle funktionalen Wege zusammengeführt werden und das sich über eine transparente Fassade zum bestehenden Pausenhof hin öffnet. Es wird über großzügige Flure bis an die Unterrichtsräume herangeführt und lädt in verschiedenen räumlichen Situationen zum Verweilen und zum Austausch ein.

Der Haupteingang liegt auf Ebene des Hofes und führt vom Pausenhof in das Atrium. Von hier werden die anderen Geschosse wie auch die drei Klassenzimmer im rückwärtigen Bereich des Hofgeschosses erschlossen. Der Speisesaal kann vom gemeinsamen Windfang aus über getrennte Türen oder über das Atrium betreten werden.

Im ersten Obergeschoss sind neben zwei weiteren Klassenzimmern vor allem die naturwissenschaftlichen Unterrichtsräume untergebracht. Im westlichen Gebäudeteil ist der Physikraum für die Oberstufe mit dazugehöriger Sammlung und Bibliothek untergebracht, im östlichen Teil der Chemieraum für die Oberstufe und der Physik-/Chemiesaal für die Mittelstufe, jeweils mit den dazugehörigen Nebenräumen.

Im zweiten Obergeschoss sind unter dem Dach der „Villa“ neben zwei weiteren Klassenzimmern die Unterrichtsräume für Kunst mit ihren Nebenräumen untergebracht. Gauben, Atelierverglasungen und Oberlichter bieten hier vielfältige Ausblicks- und Belichtungsmöglichkeiten. Im westlichen „Anbau“ bietet der Eurythmiesaal (Gymnastikraum) optimal belichtete Unterrichtsbedingungen. Sitzstufen und Nischen erleichtern die Orientierung.

Das Gartengeschoss / erste Untergeschoss unterhalb des Hofgeschosses nutzt die gut belichteten Flächen unter der „Villa“ für Unterrichtsräume wie die Metallwerkstatt, den Biologiesaal mit Sammlung und den Computerraum. In den im Hang liegenden Bereich befinden sich Lagerflächen und das Küchenlager mit der Anlieferung über die Auffahrt auf das Schulgelände.

Im zweiten Untergeschoss sind neben der Tiefgarage Technikräume und Lagerflächen untergebracht. Die Einfahrt zur Tiefgarage erfolgt von der Auffahrt auf das Schulgelände aus.

Von Beginn an war es der Schule ein Anliegen, den Neubau unter Berücksichtigung aktuellster Umweltstandards zu planen. Maßnahmen zur Energieeffizienz sollen nicht auf einen bestehenden Gebäudeentwurf aufgesetzt werden, sondern vielmehr integraler Bestandteil der Architektur sein. So unterstützt z.B. der Gebäudeentwurf durch seine Bauform eine natürliche, wind- und thermisch angetriebene Belüftung; die Fassadengestaltung wird auf eine optimierte Nutzung von blendfreiem Tageslicht optimiert, sodass Lüftungs- und Beleuchtungsstrom eingespart wird; auf den nach Süden ausgerichteten Dachflächen sind Photovoltaik-Schindeln vorgesehen.

4.1.4. Verkehr (Personen, Kfz, Fahrrad)

Die Zugänge für Fußgänger, Radfahrer und Kraftfahrzeuge auf das Schulgelände bleiben im Prinzip unverändert: Der Hauptzugang auf das Schulgelände für Fußgänger erfolgt weiterhin von der Haußmannstraße über eine große Außentreppe zwischen Hortbau und Oberstufenneubau.

Radfahrer und Kfz erreichen die bestehenden Parkplätze auf dem Niveau der Schulhöfe von der Haußmannstraße aus über die bestehende Auffahrt beziehungsweise über die Einfahrt von der Straße „Zur Uhlandshöhe“ aus.

Da sich durch den Oberstufenneubau weder die Zahl der Schüler noch die Zahl der Angestellten auf dem Gelände ändern wird, bleibt auch der Bedarf an Stellplätzen unverändert. Die Stellplätze für den Schulbetrieb und den Veranstaltungsfall sind im separaten Stellplatznachweis dargestellt.

Wie bei allen Bauten der Schule liegt der Haupteingang zum Oberstufenneubau auf dem Niveau des Pausenhofes. Weitere Zugänge bzw. Notausgänge befinden sich im Gartengeschoss und im Hofgeschoss.

4.1.5. Außenraum

Zusammen mit dem Verwaltungsneubau fasst der Oberstufenneubau den Pausenhof zum Haupthaus und zum Hortbau hin.

Der Entwurf zur Landschaftsgestaltung im Rahmen des Verwaltungsneubaus sieht im Wesentlichen die Wiederherstellung der Pausenhofflächen nach dem Bau vor.

Die entsprechende Planung ist im Freiflächengestaltungsplan im Zusammenhang mit dem aktuellen Bestand dargestellt, also ohne den Oberstufenneubau.

4.2. Voruntersuchung verschiedener Baustoffe auf die Aufenthaltsqualität und die Lebenszyklusanalyse

Wegen der langen Lebensdauer von Gebäuden, die in den meisten Fällen mehr als 50 Jahre ist, ist die Betriebsenergie während des ganzen Lebenszyklus besonders hoch und kann einen großen Einfluss auf deren CO₂-Fußabdruck nehmen. Folglich liegt der Schwerpunkt in Neubauprojekten meistens auf die Reduzierung der Betriebsenergie, obwohl auch die graue Energie einen großen Anteil an den ökologischen Fußabdruck von hocheffizienten Gebäuden aufweist. Somit wurde in einer frühen Planungsphase der Schule der graue Energieaufwand untersucht, der benötigt wird ein Gebäude zu erstellen, zu betreiben und dies mit optimalen Komfortbedingungen zu kombinieren.

Die Lebenszyklusanalyse wurde mit unterschiedlichen Materialvarianten durchgeführt, um unter Berücksichtigung der Behaglichkeit im Innenraum eine nachhaltige Materialwahl treffen zu können. In dieser Analyse werden vier Konstruktionsvarianten mittels Daten von Oekobau.dat und Wecobis verglichen. Dabei werden erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergie, sowie der CO₂-Ausstoß in der Herstellung und am Lebensende betrachtet. Mittels einer dynamischen Simulation wird die Behaglichkeitsqualität der vier Alternativen verglichen, um daraus die notwendige Betriebsenergie für die Heizung zu ermitteln.

Für die Analyse werden folgende Konstruktionsvarianten verglichen:

1. Stahlbetonskelettbau mit Ausfachungen aus Ziegelmauerwerk
2. Stahlbetonskelettbau mit Stahlbetonwänden
3. Massivholzbau
- 4a. Holzrahmenbau mit Ausfachungen aus Lehmziegeln
- 4b. Holzrahmenbau

Die erste Variante zeichnet sich durch eine große thermisch wirksame Masse aus. Im Außenwandbereich sind Wärmedämmziegel vorgesehen, während die Innenwände aus Hochlochziegeln sind, die schallschutztechnisch wirksam sind. In der zweiten Variante sind Hohlraumdecken vorgesehen, die den Materialbedarf der Konstruktion reduzieren. Die dritte Variante sieht tragende Bauteile aus Kreuzlagenholz vor. Kreuzlagenholz wird verklebt, um auftretende Kräfte besser aufnehmen zu können,

wodurch geringere Verformungen auftreten. Außerdem ermöglicht diese Konstruktionsweise eine werkseitige Vorfertigung, die den Aufwand auf der Baustelle reduziert. Zur Sicherung des Brandschutzes sind die Bauteile beidseitig doppelt mit Gipskarton beplankt. Die letzte Variante ist ein Holzrahmenbau, der mit ungebrannten Lehmziegeln ausgefacht wird. Lehmziegel erhöhen die thermische Masse und verringern somit die Temperaturschwankungen im Raum, außerdem benötigen sie in der Herstellung deutlich weniger Energie als gebrannte Ziegel. Darüber hinaus reduzieren Lehmziegel die erforderlichen Brandschutzmaßnahmen und haben eine positive Wirkung auf das Raumklima, da sie mehr Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnehmen als gebrannte Ziegel.

Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wird in allen Varianten darauf geachtet, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) durch die Außenbauteile gleich sind. In allen Varianten sind zudem Fundament, Treppenhäuser und erdberührende Bauteile identisch ausgeführt. Die geringeren statischen Anforderungen, die aus den leichteren Materialien resultieren sind nicht mit einkalkuliert.

Im Rahmen der dynamischen Simulation werden drei repräsentative Wochen betrachtet, jeweils eine im Winter (kälteste Woche 2015), im Sommer (wärmste Woche 2015) und im Frühling, zur Berücksichtigung der Übergangszeiten im Frühling und Herbst. Im Sommer wird eine Nachtlüftung implementiert um die Raumtemperaturen tagsüber zu reduzieren. Es werden drei Parameter zur Beurteilung des Innenraumkomforts verwendet: die operative Temperatur, die CO₂-Konzentration der Raumluft und die Tageslichtwerte während der Nutzungszeit von 8:00 bis 15:00 Uhr. Die CO₂-Konzentration wird in ppm (parts per million) gemessen und sollte 1.500 ppm nicht überschreiten, um eine annehmbare Raumluftqualität sicherzustellen. Dieser Wert wird verwendet um eine natürliche Lüftung über die Fenster zu simulieren. Steigt die CO₂-Konzentration im Modell über 1.500 ppm, werden die Fenster geöffnet. Um den Einfluss der Konstruktionsweise beurteilen zu können, berechnet die Simulation keine Heizungsanlage.

Im Winter erreichen beide schweren Varianten (1 und 2) teilweise behagliche Raumtemperaturen über 21 °C und können beinahe das ganze Jahr ohne Heizung betrieben werden. Nur bei extrem niedrigen Außentemperaturen ist ein Heizen nötig. Hauptsächlich herrschen in den unteren Stockwerken geringere und somit unbehaglichere Temperaturen. Im Fall der Leichtbauweisen (Varianten 3 und 4b) werden im Winter in einigen Räumen überhaupt keine behaglichen Temperaturen erreicht. Im Erdgeschoss sind die Temperaturen durchgängig zu niedrig. Beide Varianten benötigen in allen Räumen Heizungen, um ein behagliches Raumklima sicherzustellen (Abb. 71).

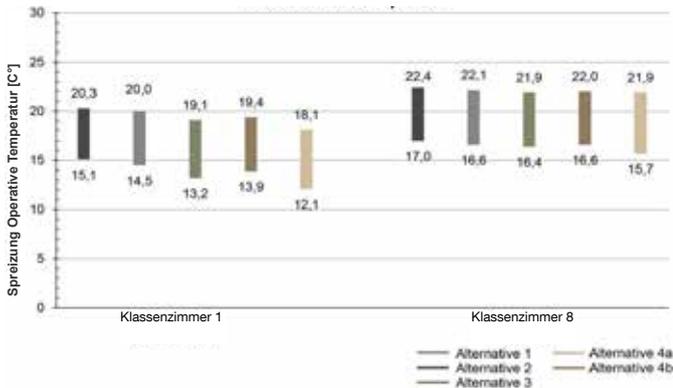


Abb. 71: Temperaturspreizungen im Winter in dem besten (Raum 8) und schlechtesten (Raum 1) für alle Konstruktionsvarianten

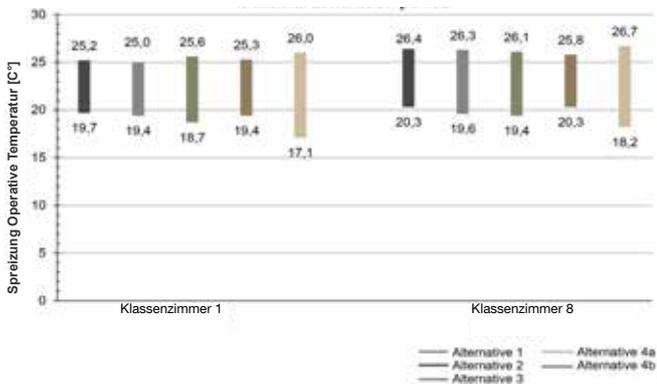


Abb. 72: Temperaturspreizungen im Sommer in dem besten (Raum 8) und schlechtesten (Raum 1) für alle Konstruktionsvarianten

Im Sommer liegen die Temperaturen in allen Varianten im behaglichen Bereich (Abb. 72). In keiner Variante steigt die Temperatur während der Nutzungszeit deutlich über die Komfortgrenze von 25 °C. Allerdings zeigt sich, dass die Temperaturen in den Varianten 3 und 4b (Leichtbauweise) stärker schwanken als in den Massivbauten.

Insgesamt zeigt die Simulation, dass eine schwere Bauweise einen höheren thermischen Komfort ermöglicht, was einen geringeren Energiebedarf in der Raumtemperierung bewirkt. Dies zeigt der Anteil der Belegungszeit, in dem die Raumtemperatur nicht innerhalb der Behaglichkeitsgrenzen (21-25 °C) liegt.

Konstruktion	Anteil Unzufriedener - PPD
Variante 1	6,5 %
Variante 2	3,9 %
Variante 3	16,5 %
Variante 4a	22,5 %
Variante 4b	12,7 %

Anhand der dynamischen Simulation wird der Heizenergiebedarf für die unterschiedlichen Varianten ermittelt werden. In Kombination mit Strom- und Warmwasserbedarf ergibt sich die Betriebsenergie für die unterschiedli-

	A1	A2	A3	A4a	A4b
Strom [kWh/a]	46.992				
TWW [kWh/a]	21.706				
Heizwärme [kWh/a]	3.408	3.242	5.302	10.882	5.172
Endenergie [kWh/a]	72.106	71.940	74.000	79.580	73.870
Primärenergie [kWh/a]	173.054	172.656	177.600	190.992	177.288

Abb. 73: End- und Primärenergiebedarf im Betrieb für die Varianten

chen Szenarien. Lediglich der Heizenergiebedarf ist unterschiedlich.

Für die Lebenszyklusanalyse der Konstruktion wird das Treibhauspotential mittels CO₂-Äquivalenz [kg] sowie die graue Energie, unterteilt in die gesamte erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergie [MJ], der Bauteile betrachtet. Dabei werden der Herstellungsaufwand und die damit verbundenen Emissionen, sowie der Rückbau bzw. Abriss betrachtet. Zusätzlich wird das Potential für Wiedergewinnung und Recycling der Materialien und Rohstoffe betrachtet. Da die Kategorien A4-5 (Transport und Einbau) sowie C1-2 (Rückbau/Abriss und Transport) insgesamt nur etwa 1 % der Gesamtbilanz ausmachen [20], sind sie in der Betrachtung ausgeklammert. Die Werte für die Analyse stammen von Oekobau.dat und Wecobis. Falls für ein Produkt keine Daten verfügbar waren, wurde ein vergleichbares Produkt zur Berechnung verwendet.

Im Variantenvergleich zeigt sich, dass die schweren Bauweisen deutlich mehr nicht-erneuerbare Primärenergie benötigen und mehr CO₂ ausstoßen als die leichten Konstruktionen. Dies liegt unter anderem daran, dass Zement sehr viel nicht-erneuerbare Primärenergie in der Produktion benötigt. Im Rückbau und Recycling entstehen in allen Fällen negative Werte, da einige Produkte thermisch verwertet werden und somit Energie abgeben, die nicht aus fossilen Quellen genommen werden muss. Besonders die XPS-Dämmung der erdberührenden Bauteile enthält sehr viel Energie. Zur Vergleichbarkeit wird diese in den Darstellungen ausgeklammert, um die Auswirkung der anderen Materialien besser gegenüber stellen zu können.

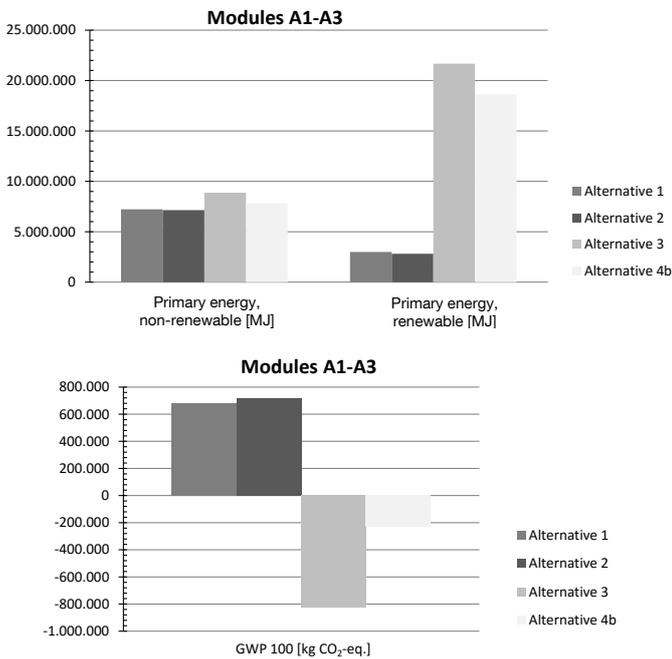


Abb. 74: Vergleich des erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteils Primärenergie und des Treibhauspotentials (GWP) für alle Varianten in der Produktion

Die Leichtbauvarianten haben einen großen Anteil erneuerbarer Primärenergie, aufgrund des Sonnenlichts, welches die Bäume zum Wachsen aufnehmen. Außerdem zeichnen sie sich durch eine negative CO₂-Bilanz in der Produktion aus, da dieses im Holz eingelagert wird. Im Fall der thermischen Verwertung wird das CO₂ am Ende des Lebenszyklus wieder freigesetzt. Da die Bilanzen sich auf die Masse der Baustoffe beziehen, fallen Betonbauteile wie die Fundamente bei den Leichtbauten stärker ins Gewicht. Auch brandschutztechnisch notwendige Maßnahmen, wie Gipskartonplatten machen zum Beispiel in der 4. Variante zusammen mit OSB Platten 50 % der nicht-erneuerbaren Primärenergie in der Produktion aus.

In den Leichtbauweisen kann anteilig mehr Masse wiederverwendet oder stofflich verwertet werden. Da die Wiederverwendbarkeit allerdings im Bezug auf die Masse angegeben wird, sind die Werte der Bauweisen schwer vergleichbar. Zum Beispiel stellt in Variante 3 Holz nur 25 % der Masse des Gebäudes dar, während die Fundamentplatte deutlich schwerer ist. Von der Gebäudemasse werden 43 % der Masse stofflich verwertet, was hauptsächlich das Fundament und andere Betonbauteile sind.

Für den Variantenvergleich werden die Bauteile, die in allen Fällen gleich sind nicht berücksichtigt. Die Leichtbauvarianten 3 und 4 haben deutlich höhere Anteile an erneuerbarer Primärenergie. Aufgrund der brandschutztechnischen notwendigen Maßnahmen hat aber Variante drei einen recht hohen Anteil an nicht-erneuerbarer Pri-

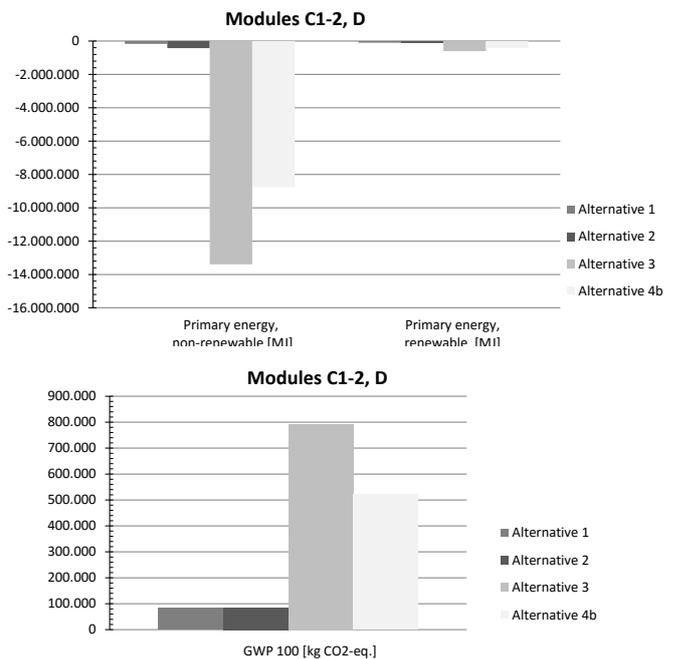


Abb. 75: Vergleich der vier Konstruktionsweisen für die Module C1-2, D

märenergie im Herstellungsprozess, der in der Gesamtbilanz durch die negativen Werte am Lebensende verringert wird. Variante drei hat als einzige einen negativen CO₂-Ausstoß, was an dem eingelagerten CO₂ im Holz liegt.

Für die ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung werden der Primärenergiebedarf im Gebäudebetrieb über 50 Jahre und der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf der Bauteile zusammengerechnet. Der erneuerbare Primärenergiebedarf wird nicht betrachtet, da dieser nicht zur Reduktion fossiler Ressourcen beiträgt. Variante drei (Massivholz) hat den geringsten Energiebedarf aller Varianten, obwohl diese Variante nicht den geringsten Heizenergiebedarf hat. Variante zwei (Beton), die am wenigsten Heizenergie im Betrieb benötigt, hat einen sehr hohen Primärenergiebedarf und CO₂-Ausstoß in der Produktion. Im Vergleich dazu ist Variante eins (Beton & Ziegel) noch schlechter, da sie einen höheren Heizwärmebedarf hat als Variante zwei. Variante vier ist die leichteste Konstruktion, benötigt aber deswegen am meisten Energie zum Heizen, was sich in der Gesamtbilanz negativ auswirkt.

Es zeigt sich, dass sowohl die Betriebsenergie als auch die graue Energie des Gebäudes relevant sind. Variante zwei hat in der Simulation die besten Ergebnisse in Hinblick auf Behaglichkeit im Innenraum. Wird in dieser Variante die Heizungsanlage raus gerechnet, schneidet die Variante immer noch schlechter ab als Variante drei mit Heizung.

	TWW-Bedarf [kWh/a]	Heizwärmebedarf [kWh/a]	Summe Betriebsenergiebedarf über 50 Jahre [kWh]	Graue Energie Materialien [kWh]	Graue Energie Technische Ausrüstung [kWh]	Gesamtsumme über 50 Jahre [kWh]
Alternative 1	52.094	8.179	3.013.680	1.867.792	270.370	5.243.267
Alternative 2	52.094	7.781	2.993.760	1.959.217	270.370	5.131.922
Alternative 3	52.094	12.725	3.240.960	- 1.257.952	270.370	2.253.378
Alternative 4a	52.094	26.117	3.910.560	- 519.859	270.370	3.661.071
Alternative 4b	52.094	12.413	3.225.360	- 260.243	270.370	3.235.487

Abb. 76: Primärenergiebedarf (nicht-erneuerbar) der Varianten über 50 Jahre

	CO ₂ -Emissionen TWW [kg/a]	CO ₂ -Emissionen Heizwärme [kg/a]	Summe CO ₂ -Emissionen Betriebsenergie über 50 Jahre [kg]	Enthaltener Kohlenstoff in den Materialien [kg]	Enthaltener Kohlenstoff in der technischen Ausrüstung [kg]	Gesamtsumme über 50 Jahre [kg]
Alternative 1	12.350	1.939	714.493	762.935	52.355	1.529.783
Alternative 2	12.350	1.844	709.771	800.615	52.355	1.562.740
Alternative 3	12.350	3.016	768.378	- 32.866	52.355	787.866
Alternative 4a	12.350	6.191	927.129	250.965	52.355	1.230.449
Alternative 4b	12.350	2.942	764.679	289.541	52.355	1.106.575

Abb. 77: CO₂-Ausstoß der Varianten über 50 Jahre

Letztendlich zeigt der Vergleich, dass schwere Gebäude ein ausgeglichenes Raumklima ermöglichen und geringeren Heizaufwand darstellen. Die geringeren Lasten zum Heizen ermöglichen einfachere technische Anlagen. Allerdings enthalten die Gebäude deutlich mehr graue Energie durch ihre größere Masse, die nicht durch die Einsparungen im Betrieb ausgeglichen werden kann.

Leichte Konstruktionen können dagegen nicht ohne Heizsystem gebaut werden und erreichen ohne Gebäudetechnik keine behaglichen Bedingungen im Innenraum. Allerdings sind die verwendeten Materialien in der Produktion weniger Energie-intensiv, womit die Gebäude deutlich weniger Primärenergie über den gesamten Lebenszyklus benötigen.

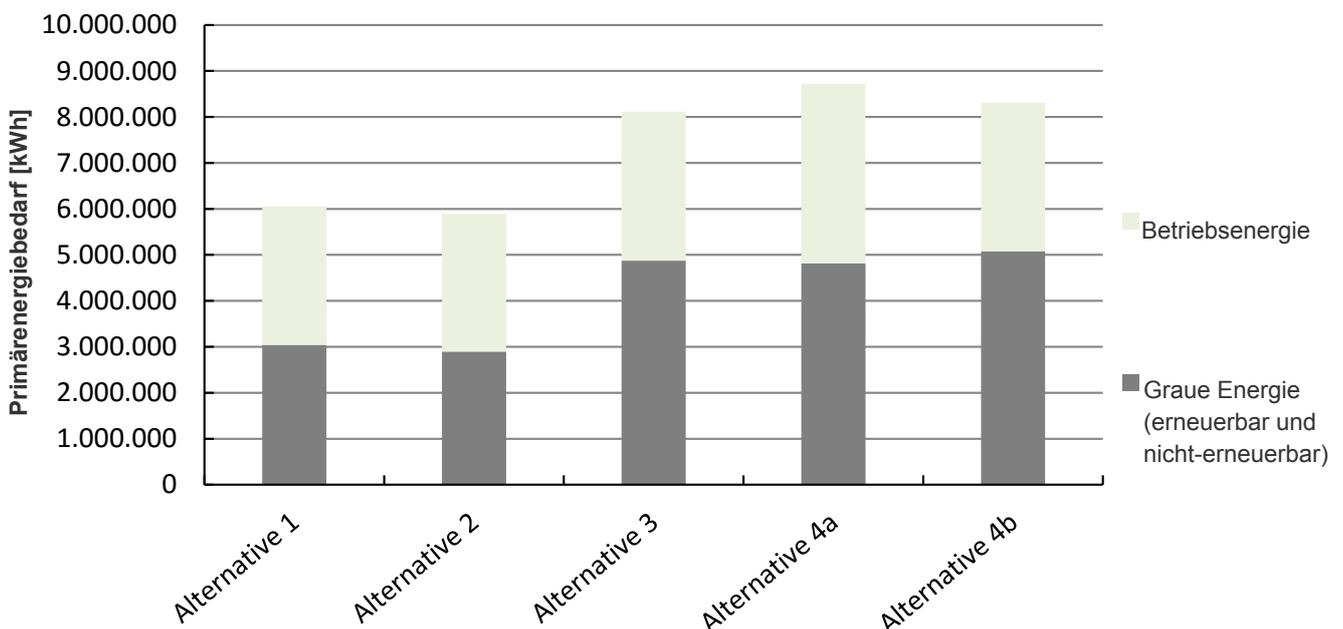


Abb. 78: Gesamtbilanz graue Energie und Betriebsenergie der Lebenszyklusanalyse

4.3. Haustechnikkonzept

4.3.1. Beschreibung des Lüftungskonzeptes

Dem Bauherrn wird ein Lüftungs- und Energiekonzept vorgeschlagen, das einerseits zu einer hohen Aufenthaltsqualität in Bezug auf die Luftgüte, Tageslichtverfügbarkeit und den thermischen Komfort, gleichzeitig aber zu einem niedrigen Primärenergiebedarf führt. Das Konzept für die wichtigsten Bereiche sind im Folgenden Abbildungen 79 - 81 beschrieben.

Dabei werden insbesondere die Anforderungen an die Schalldämmung der Fassaden und die für eine Schule/Büro notwendige Innenraumakustik berücksichtigt unter primärem Einsatz einer natürlich angetriebenen Lüftung.

Eine zentrale mechanische Lüftung ist in der Küche, sowie im Speisesaal, erforderlich. Der Speisesaal bietet auf den rd. 200 m² ca. 180 Personen Platz. Außerdem werden innenliegende WC und Sanitärräume sowie innenliegende UG Räume mechanisch entlüftet resp. be- und entlüftet.

Für die Klassen und Aufenthaltsräume wurde eine weitgehend natürliche Be- und Entlüftung einer zentralen mechanischen Lüftung Vorrang gegeben, um den Strombedarf, vor allem aber die immensen Betriebskosten und den Wartungsaufwand gering zu halten. Die Verbindung

dieser Lüftungsstrategie mit dem Gebäudeentwurf stellt fast das wichtigste Hauptmerkmal der Schule dar und manifestiert sich im zentralen Atrium. Es ist gleichermaßen sozialer Treffpunkt als auch Lüftungszentrale, da es als „Lunge“ der Waldorfschule dient. Die Vorkonditionierung der Zuluft erfolgt zuerst in einem Erdkanalsystem und anschließend im zentralen Atrium. Im Winterfall wird die Zuluft somit vorerwärmt, im Sommerfall durch das Erdreich vorgekühlt. Aktive, sprich mechanisch betriebene Überströmelemente im Türbereich der Klassenzimmer befördern die Luft aus dem Atrium in die jeweiligen Unterrichtsräume. Die aktiven Überströmelemente dienen auch dem Ablüften über die Fassade. Im Vergleich zur normalen Fensterlüftung kann somit ein hoher Komfort gewährleistet werden, da Kaltluftabfall durch Fensteröffnen vermieden wird. Eine flächendeckende zentrale mechanische Lüftung wird aufgrund der Erkenntnisse aus den Analysen der 5 Schulen, des hohen Raumbedarfs für ein Zentralgerät, für die Lüftungskanäle und der unflexiblen Steuerungsmöglichkeit nicht umgesetzt. Dies trägt dem Anspruch des Bauherrn Rechnung, einerseits eine hohe Energieeffizienz für das Gebäude zu erreichen, gleichzeitig jedoch den Aufwand an technischen Anlagen zu begrenzen. Die eingesparten Kosten können so in eine großflächige Photovoltaikanlage investiert werden.

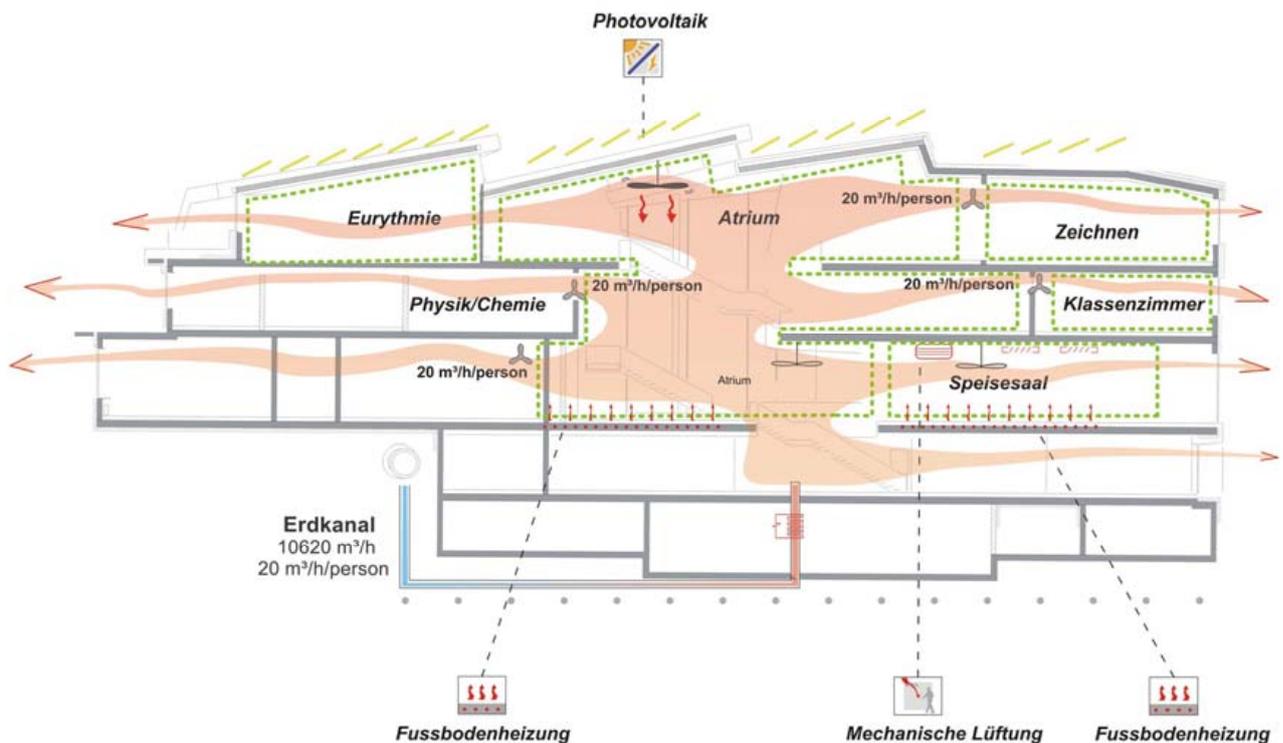


Abb. 79: Konzept Winter

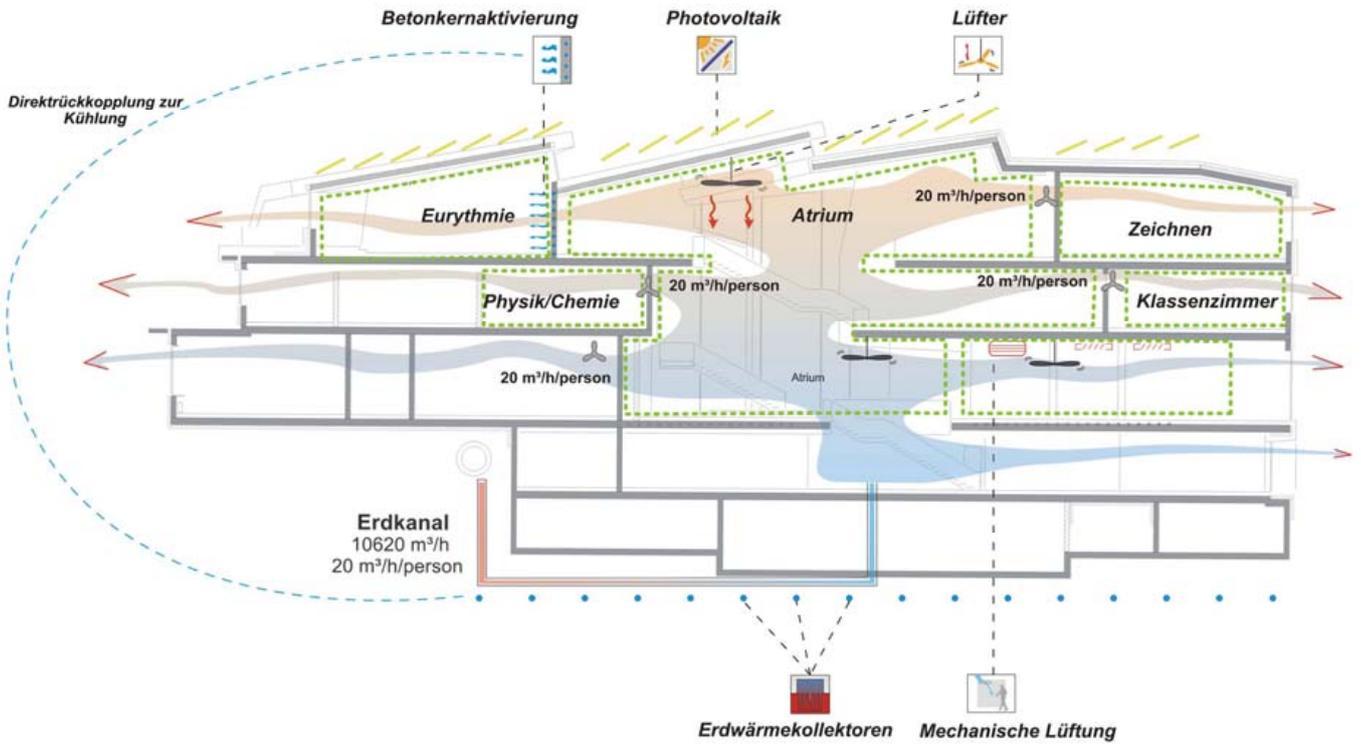


Abb. 80: Konzept Sommer Tag

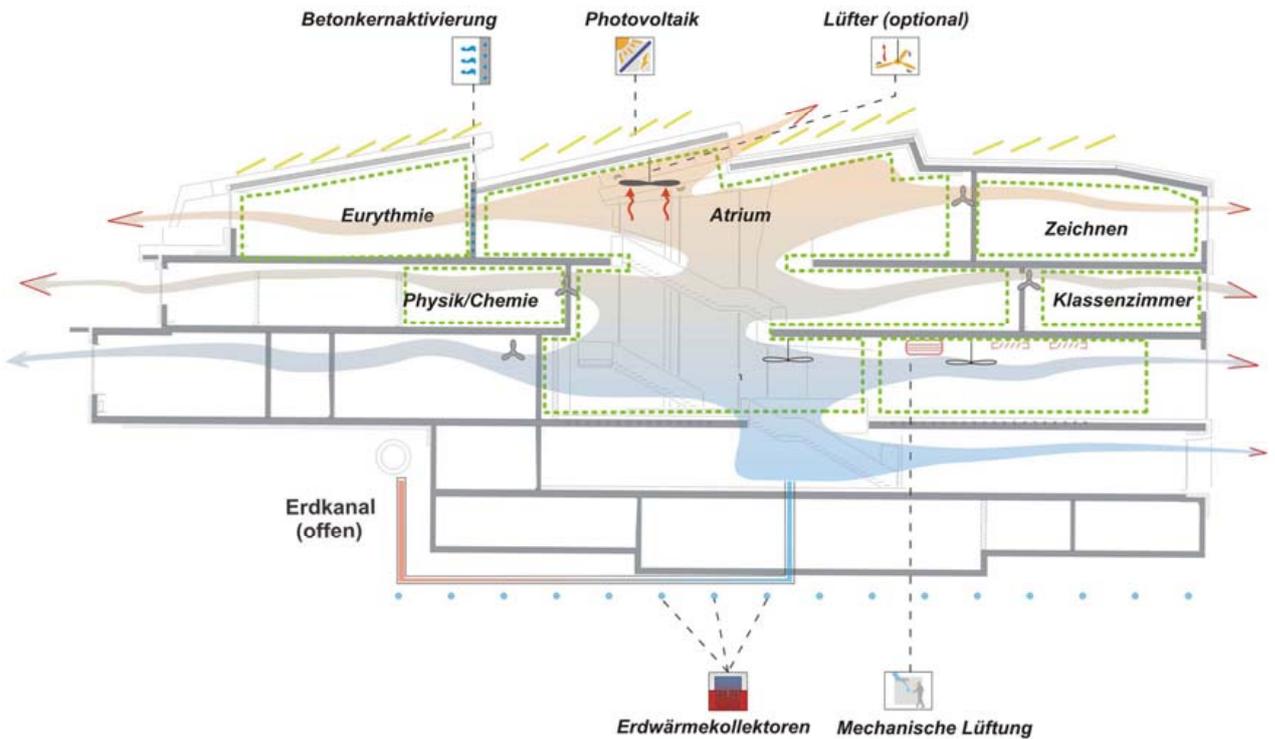


Abb. 81: Konzept Sommer Nacht

Auch 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.

Die Architektur der Gebäude mit der Anordnung von Klassenzimmern/Büros, die eine direkte Anbindung an das Foyer/Treppenhaus haben oder über Eck verlaufen, unterstützt nicht nur die natürliche Belichtung der Unterrichtsräume, sondern auch die Querlüftung der Räume.

Die Grundkonditionierung erfolgt über die exponierte thermische Masse in Verbindung mit der nächtlichen Durchlüftung (Nachtlüftungspülung) und dadurch Abkühlung. Im Verbund mit einem außenliegenden Sonnenschutzsystem wird so der sommerliche Komfort optimiert.

Das Konzept zeichnet sich im Wesentlichen durch folgende Merkmale aus:

- Guter Wärmeschutz durch hohen Dämmstandard der opaken Bauteile
- sehr gute 3-fach Wärmeschutzverglasung mit guter Rahmenqualität U-Glas ca. $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ Tageslichttransmission (T_{vis}) ca. 70%, Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) ca. 45%.
- U-Rahmen $< 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Luftdichte Bauweise zur Verringerung der unbeabsichtigten Lüftungsverluste Zielwert: n_{50} -Wert $< 1.0 \text{ 1/h}$
- Winter: Beheizung mittels Flächenheizung in den Erschließungsbereichen und dem Speisesaal, schnell reagierende Heizkörper in den Klassenzimmern/Büros
- Sommer: Kühlung mittels Nachtlüftungspülung unter Ausnutzung von Speichereffekten durch größtenteils nicht abgehängte Decke zur Reduzierung der sommerlichen Überhitzung
- Sommerlicher Wärmeschutz durch effizienten außenliegenden beweglichen Sonnenschutz
- effiziente Wärmerückgewinnung zur Reduzierung des Lüftungswärmebedarfs in den zentralen mechanischen Lüftungsgeräten (Küche und Speisesaal).
- Deckenventilator im Atrium zur Durchmischung der sich einstellenden Temperaturunterschiede über die Höhe und zur Optimierung des sommerlichen Komforts
- Deckenventilator im Speisesaal zur Optimierung des sommerlichen Komforts
- Dezentrale Belüftung der Klassenräume über das Atrium stellt die Luftversorgung sicher

Lüftung der Klassenräume

Die Klassenräume sowie die Fachräume haben öffnere Fenster in der Fassade zur Lüftung. Der Antrieb der Lüftung bei offenen Türen ergibt sich primär durch Druckunterschiede aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, der statischen Höhe des Raumes einschließlich der Dachhöhe des Foyers und der unterschiedlichen Winddrücke in Fassade und auf dem Dach. Optional kann Strom genutzt werden um unterstützt durch Lüfter eine Luftbewegung zu erzwingen. Zur Komfortoptimierung wird die Möglichkeit der aktiven Luftüberströmung aus dem Foyer vorgesehen durch Überströmelemente in den Trennwänden. Für die Zuführung der Außenluft in das Foyer ist ein Erdkanal vorgesehen, in dem die Luft vorkonditioniert wird. Dadurch verringert sich im Winter der Heizwärmebedarf für die Nacherwärmung der Zuluft, an sehr heißen Sommertagen wird kühlere Luft als die Außenluft zugeführt.

Es ist geplant, die Zuluft aus dem Atrium in die Klassenräume über Kleinventilatoren zu transportieren und über die Fenster abzulüften. Dazu werden einzelne Fenster mit einem Sensor ausgestattet um dem aktiven Überströmelement in der Trennwand zum Korridor die Freigabe zu erteilen. Um den Volumenstrom unabhängig von den Außenbedingungen und der resultierenden Druckdifferenz weitgehend konstant zu halten wird empfohlen die Fenster mit stufenweisen Öffnungspositionen auszustatten.

Die Räume sollen passiv über nächtliche Auskühlung mittels Außenluft gekühlt werden. Zur erhöhten Durchlüftung können dafür Fenster gekippt werden und Türen offen stehen. Geschossdecken werden zur Nutzung der thermischen Speichermasse weitgehend von Abhängungen oder Einbauten freigehalten. Eine Belegung mit akustisch wirksamen Materialien auf etwa $\frac{1}{3}$ der Deckenfläche ist jedoch möglich.

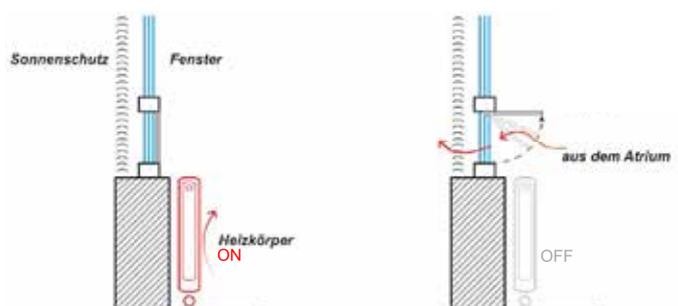


Abb. 82: Lüftungskonzept in der Fassade

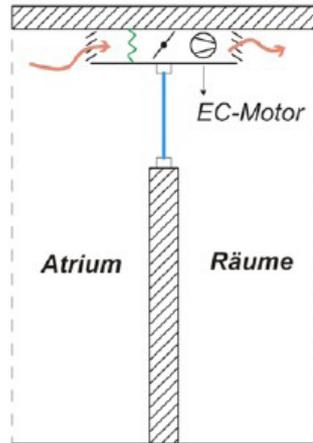


Abb. 83: Schema der aktiven Überströmelemente in der Trennwand

Lüftung von Speisesaal und Küche

Der im E0 vorgesehene Speisesaal und die zugehörige Küche erhalten jeweils eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung. Aufgrund des geringeren Platzbedarfs wird ein Kreislaufverbundsystem eingesetzt.

Das Lüftungsgerät für den Speisesaal wird mit einer mit Wärmerückgewinnung mittels Rotor ausgestattet.

Im Sommer und in der Übergangszeit soll der Bereich des Speisesaals natürlich belüftet werden um so den Strombedarf zu reduzieren und Betriebskosten einzusparen. Dafür werden Öffnungen in der Fassade vorgesehen.

Deckenlüfter im Foyer

Das Deckenlüftersystem wird in dem Foyer vorgesehen um folgende Komfortoptimierungen zu erreichen:

- Im Winter wird der thermischen Schichtung im Foyer entgegengewirkt damit die Temperaturdifferenz zwischen Dachgeschoss und Eingangsbereich gering bleibt. Die Durchmischung reduziert den Heizbedarf indem das normalerweise auftretende Warmluftpolster unter dem Dach genutzt und durchmischt wird mit den unteren kühleren Bereichen.
- Im Sommer kann der Lüfter bei heißen Außentemperaturen tagsüber dazu genutzt werden um eine Luftbewegung im Foyer zu generieren die eine Komfortoptimierung zur Folge hat. Optional kann noch in Betracht gezogen werden den Lüfter nachts in Betrieb zu nehmen um eine Nachtlüftung zu unterstützen, jedoch sollte dies bevorzugt über den thermischen Auftrieb realisiert werden um den Strombedarf zu minimieren.

Deckenlüfter im Speisesaal

Im Sommer wird der Lüfter bei heißen Außentemperaturen tagsüber dazu genutzt werden um eine Luftbewe-

gung zu generieren die eine Komfortoptimierung zur Folge hat. Dadurch wird eine Reduzierung der empfundenen Temperatur von 3 K erreicht.

4.3.2. Heizung und passive Kühlung

Für die Beheizung des Schulgebäudes werden statische Heizflächen (Kompaktheizkörper, Radiatoren, Radiavektoren) mit thermostatischer Regelung vorgeschlagen, da

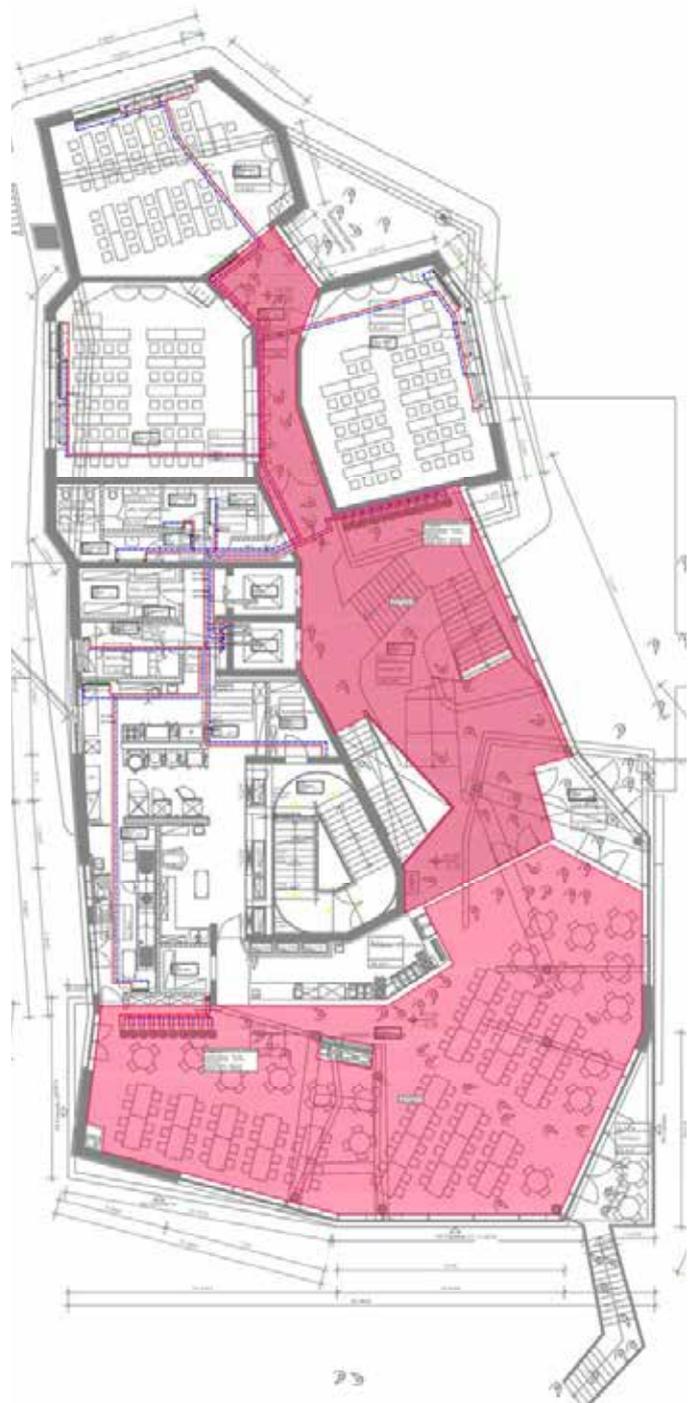


Abb. 84: Thermisch aktivierte Flächen im Erdgeschoss

diese in der Regel schnell auf die im Schulbetrieb auftretenden wechselnden Lastanforderungen reagieren. Eine passive Kühlung ist über die Decken der Schulräume und deren Nachtauskühlung vorgesehen.

In dem Foyer und dem Speisesaal wird der Fußboden aktiviert da die Decke entsprechend abgehängt ist und somit die aktive Fläche nicht sichtbar wäre.

Im Eurythmiesaal wird eine Bauteilaktivierung in den Trennwänden vorgesehen um den sommerlichen Komfort im Verbund mit der Holzkonstruktion zu optimieren. Im Verbund mit dem Erdwärmekollektorsystem wird ein hocheffizienter passiver Betrieb (=ohne Kältemaschine) erzielt.

4.4. Thermische Simulation

Fünf repräsentative Zonen wurden simuliert (s. Abb. 85) um das vorherig beschriebene Konzept zu rüfen und den Energiebedarf des gesamten Gebäudes abzuleiten. Diese Zonen repräsentieren die Worst-Case-Szenarios bezogen auf die internen Gewinne (sommerliche Überhitzung) und die Exposition zum Außenraum (Wärmeverluste im Winter).

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 Mannheim) zu beschreiben, wurde die DIN15251EN herangezogen.

Die Wetterdaten reflektieren extreme Winter/Sommerbedingungen von den letzten Jahren, deshalb kann diese

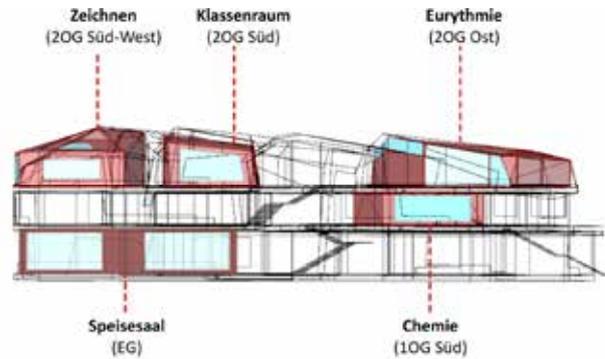


Abb. 85: Darstellung der Referenzräume der thermischen Simulation

Betrachtung als Stresstest für das gesamte Gebäude gesehen werden.

Die Ergebnisse werden in Komfortgrafiken visualisiert. Jeder einzelne grüne Punkt repräsentiert eine Stunde des Jahres während der Nutzungszeit. Die x-Achse stellt den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur dar. Von der Regulierung wird die Betrachtung des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur gefordert um die menschliche Körperanpassung an unterschiedliche Innenraumbedingungen in Gebäude zu betrachten. Diese Situation entsteht beispielsweise in Schulen, da die Benutzer sich kontinuierlich tagsüber im Gebäude aufhalten. Auf der y-Achse wird hingegen die operative Raumtemperatur während der Nutzungszeit betrachtet. Die Regulierung fordert nicht nur die Betrachtung der Lufttemperatur, sondern die Einbeziehung der Oberflächentemperaturen, welche das Komfortempfinden im Innenraum beeinflussen.

Die untere rote Linie (erlaubte Minimum Temperatur) und die obere blaue Linie (erlaubte Maximum Temperatur) definieren den empfohlenen Komfortbereich. Um die

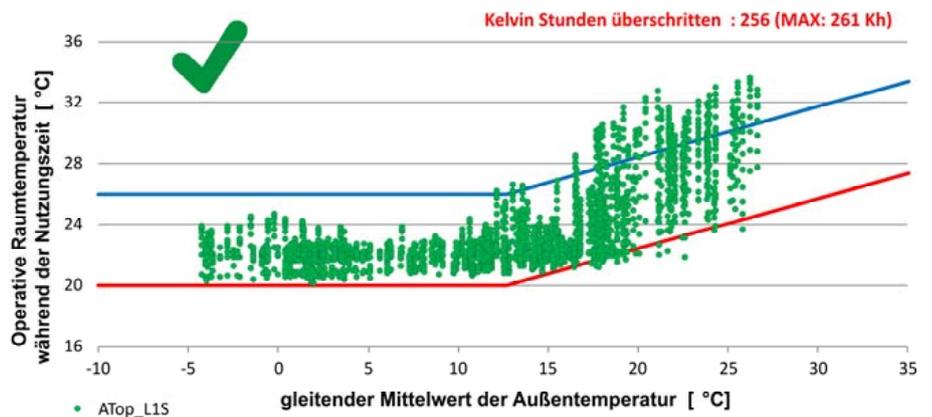
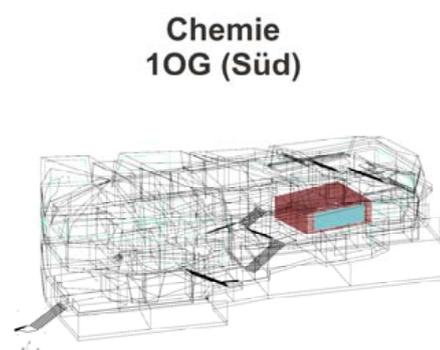


Abb. 86: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Chemie 1. OG“

**Klassenraum
2OG (Süd)**

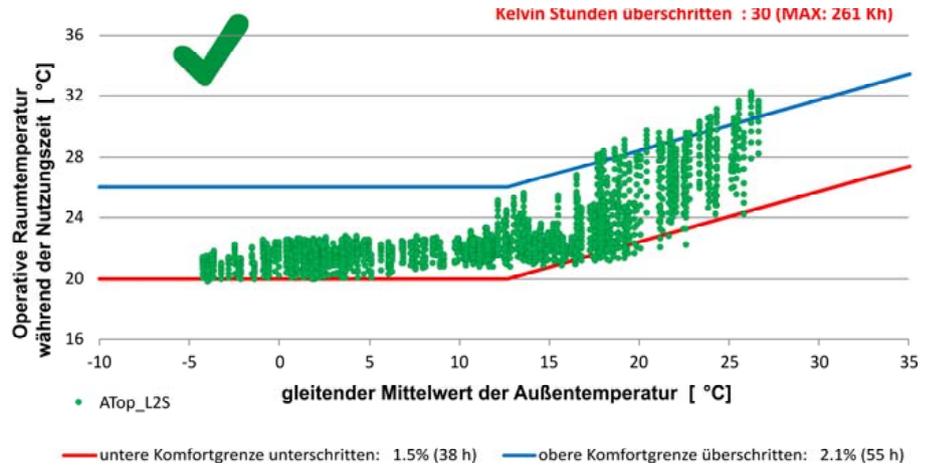
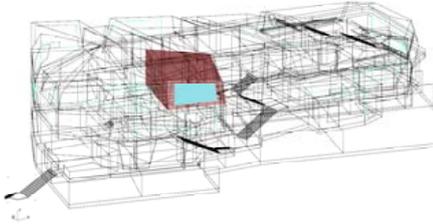


Abb. 87: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Klassenraum 2. OG Süd“

**Zeichnen
2OG (Süd-West)**

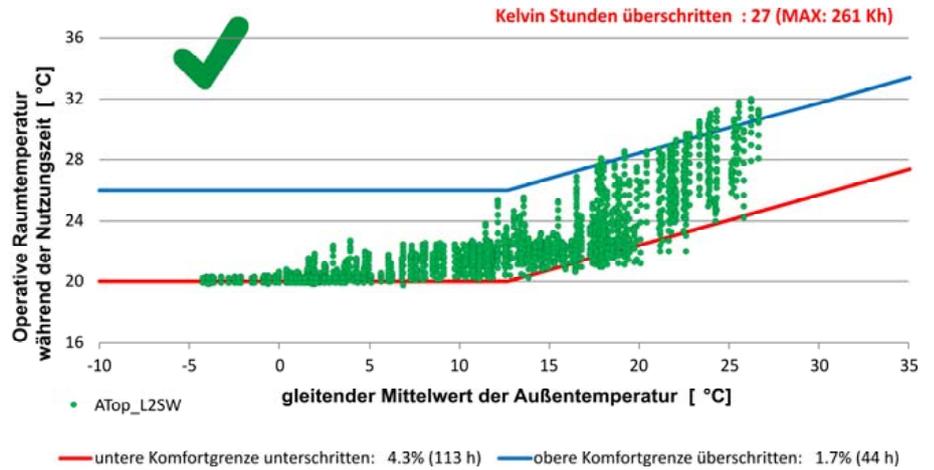
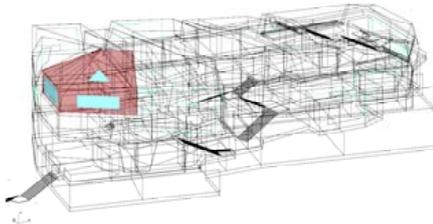


Abb. 88: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Zeichnen 2. OG Süd“

**Eurythmie
2OG (Ost)**

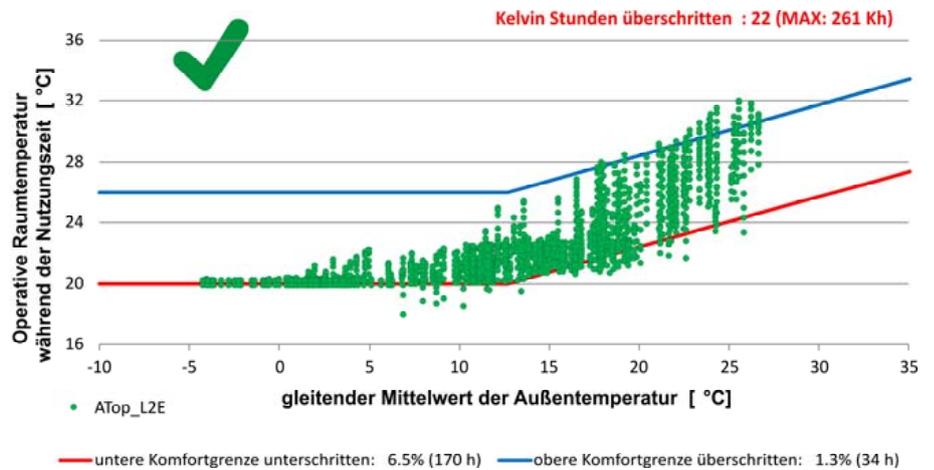
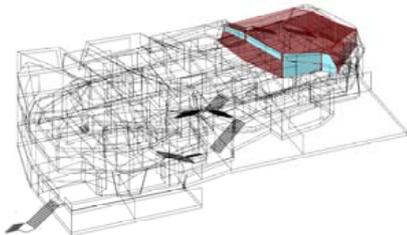


Abb. 89: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Eurythmie 2. OG Ost“

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

Wie zuvor ist eine maximale Anzahl an Kelvinstunden definiert. Ungleich zuvor ist diese Zahl auf eine Formel, die in Relation zu den Stunden des Jahres während der Nutzungszeit steht, basiert. Im Atrium und in den unterschiedlichen Klassenzimmern ist ein Maximum von 261 h erlaubt, welche den Komfortbereich überschreiten. Im Speisesaal tritt ist eine maximale Überschreitung von 438 Kh auf.

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

Es ist möglich eine geläufige Tendenz für Klassenräume zu erkennen. Der Komfort im Innenraum ist hauptsächlich von dem vorgegebenen Belegungsgrad von Benutzern beeinflusst: In Räumen mit einem geringen Belegungsgrad (z.B.: Eurythmie oder Zeichnen) sind die Temperaturen niedriger als in Räumen mit hohem Belegungsgrad. In den stark belegten Klassenräumen ist eine angemessene hygienische Belüftung im Winter und eine aktivierte Decke (Kühlmodus) im Sommer die Schlüsselfaktoren um den Komfort im Innenraum zu garantieren.

Die vorher beschriebenen Anforderungen an den Komfort im Innenraum werden auch vom Speisesaal und dem Atrium, welche andere Nutzungsprofile haben, erfüllt.

Wie zu erwarten ist das Atrium auf Grund der Luftschichtung im oberen Bereich wärmer als im unteren Bereich des Raumes. Im Winter wird die Luftschichtung durch einen Deckenlüfter durchbrochen um den Komfort im unteren Bereich des Raumes zu erhöhen.

4.5. Tageslichtsimulation

Gleichzeitig zu den thermischen Simulationen wurden Tageslichtsimulationen berechnet. Um die ideale Balance zwischen thermischen und visuellen Komfort zu finden, wurden in einem iterativen Prozess der Innenausbau, die Glaseigenschaften und die geometrischen Gegebenheiten der Öffnungen untersucht.

Unter Anbetracht der Nutzung des Gebäudes ist der visuelle Komfort ein essentieller Aspekt um in den Räumen gute Lernverhältnisse für Schüler zu erreichen. Außerdem zeigen viele Studien eine starke Verbindung zwischen Tageslicht in Innenräumen und menschlicher Gesundheit. Um jedoch überbelichtete Bereiche zu verhindern, war von Anfang an die treibende Vision nicht nur

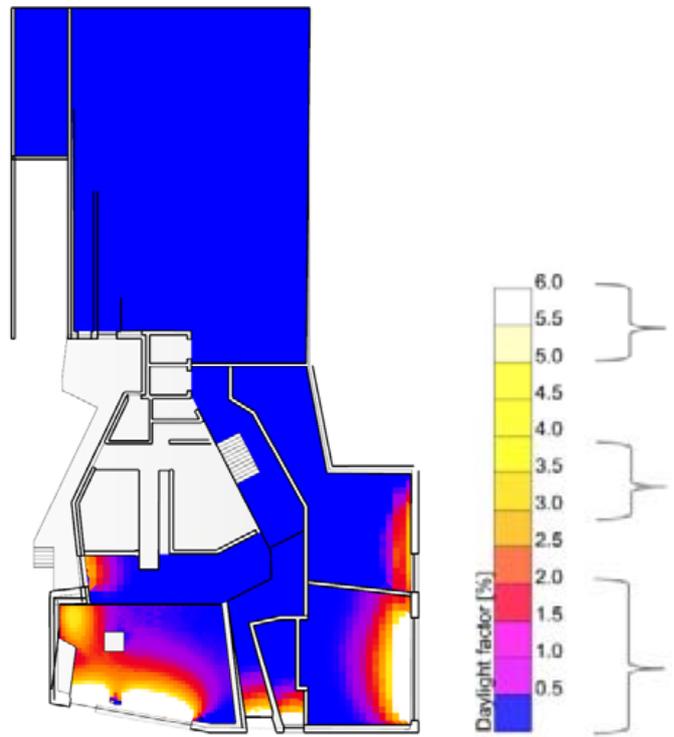


Abb. 90: Tageslichtquotient UG

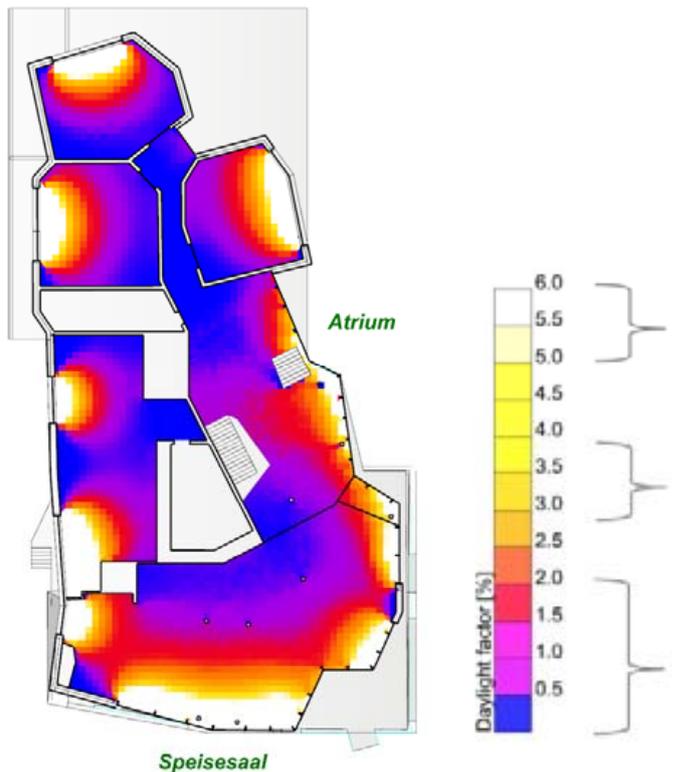


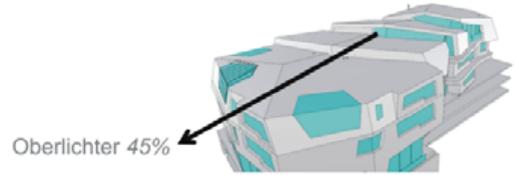
Abb. 91: Tageslichtquotient EG

Opake Materialien Lichtreflexion:

Boden außen	20%
Boden innen	20%
Wand außen	35%
Nachbar Gebäude	35%
Wand innen	50%
Decke	70%

Transparent Materialien Lichttransmission:

Glas außen transparent	65%
------------------------	-----



Nachbar Gebäude
35%

Boden innen 20%
Decke 70%

Wand innen
50%

Glas außen transparent
65%

Boden außen
20%

Wand außen
35%

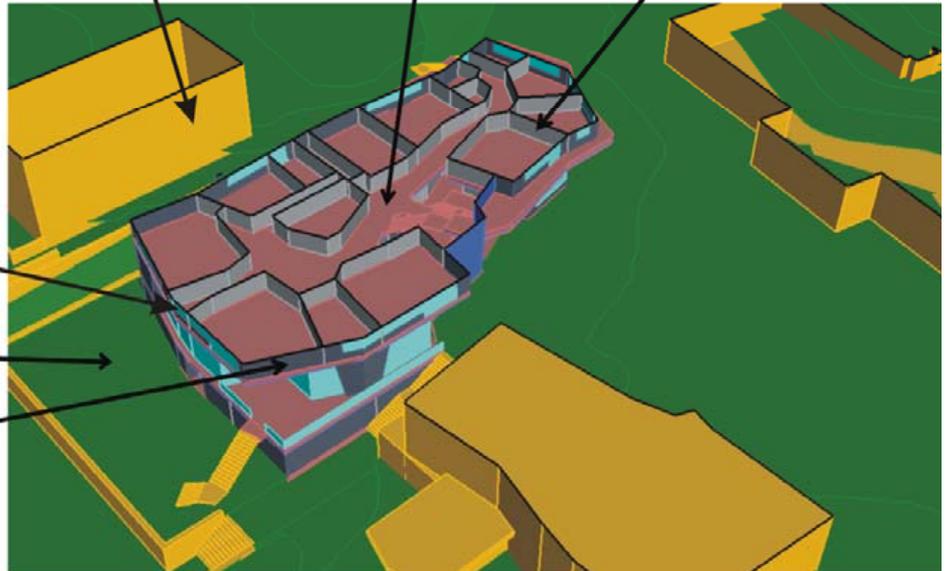


Abb. 92: Randbedingungen für die Tageslichtsimulation

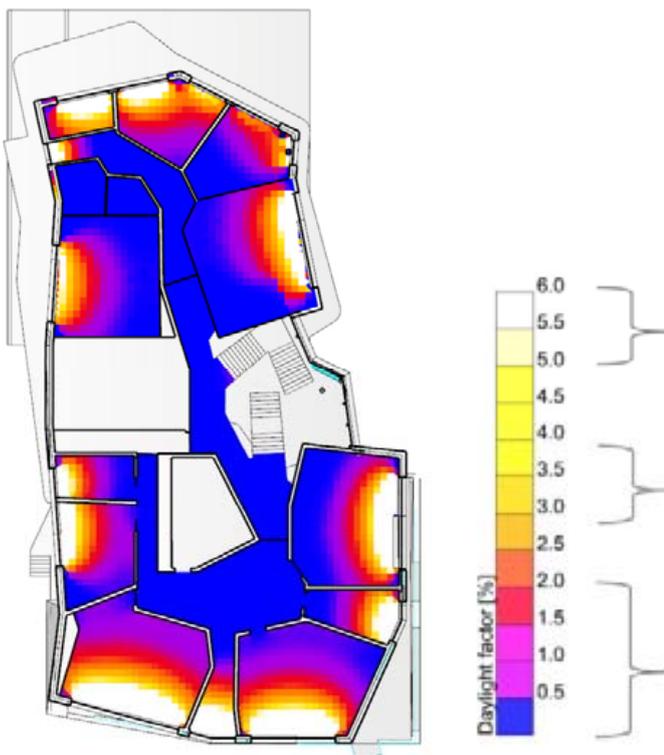


Abb. 93: Tageslichtquotient 1.OG

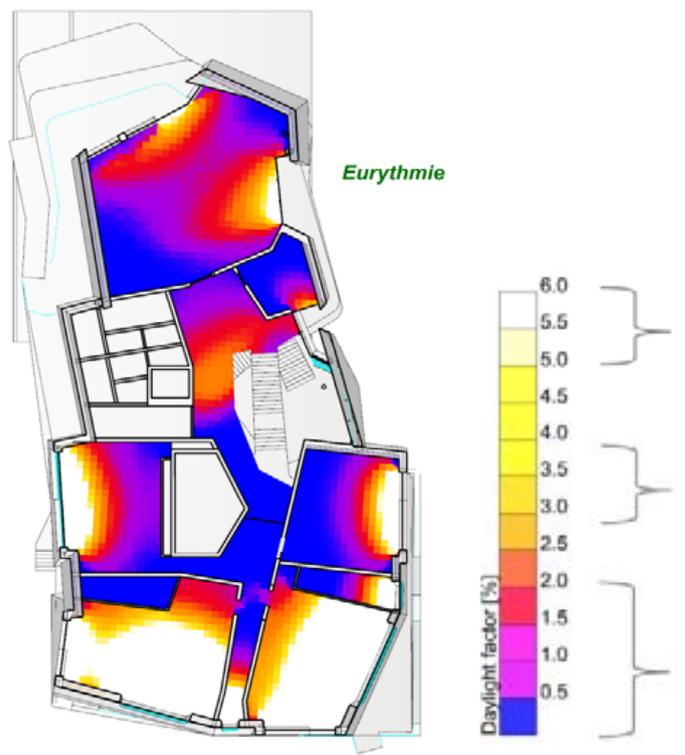


Abb. 94: Tageslichtquotient 2.OG

die Quantität, sondern auch die Qualität von einer natürlichen Belichtung anzuvisieren. Es soll eine homogene Verteilung von Licht im Innenraum erreicht werden.

Die folgenden Randbedingungen in Abb. 92 wurden in Bezug auf die farbliche Innengestaltung (Lichtreflexion) und die Eigenschaften der Fenster (Transparenz der Verglasung) betrachtet.

Für die Simulation wurde der Tageslichtfaktor als Maß genommen. Laut Definition beschreibt der Tageslichtfaktor das Verhältnis von internen zu externen Licht Levels bei bewölktem Himmel. Die Abwesenheit von direkter Sonneneinstrahlung definiert den Tageslichtfaktor als Worst-Case-Szenario und ist deshalb ideal um Geometrien und Positionen von Öffnungen zu untersuchen. Außenliegende beweglicher Sonnenschutz und innenliegende Jalousien sind essentiell um Blendung durch direkte Sonneneinstrahlung zu kontrollieren.

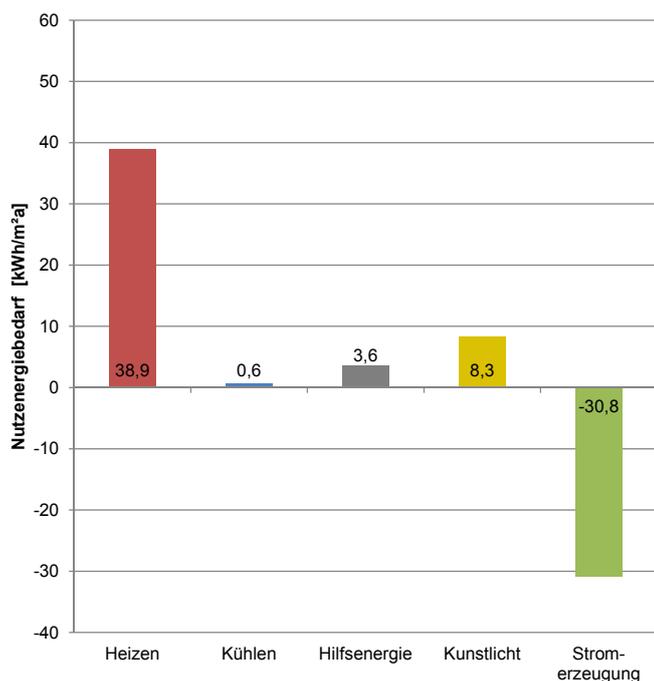


Abb. 95: Nutzenergiebedarf der Waldorfschule

4.6. Energiebedarf

Der Energiebedarf für das gesamte Gebäude wurde aus dem thermisch simulierten fünf Zonen Model hochgerechnet (s. Abb. 95).

Die benötigte Wärme wird von dem schuleigenen, bereits bestehenden Nahwärmenetz geliefert. Hier erzeugt ein BHKW sowohl Strom als auch Wärme und verfügt somit über einen guten Primärenergiefaktor von 0,88.

Die Dachlandschaft wird mit 456 m² flächendeckend mit Photovoltaikmodulen besetzt. Diese produzieren so viel Strom, dass nur ca. 1/3 für die künstliche Beleuchtung und die Hilfsenergie benötigt wird, der restliche Überschuss kann ins öffentliche Netz gespeist werden. Die Finanzierung dieser großen Fläche an PV ist zum Großteil durch die Einsparungen durch den Verzicht der mechanischen Lüftungsanlage möglich. Auch auf die Energiebilanz der Waldorfschule wirkt sich der hohe Stromüberschuss positiv aus. Primärenergetisch kann so bilanziell bis auf 0,26 kWh/m²a der komplette Energiebedarf gedeckt werden, so dass in Summe ein Nearly Zero Energy Standard erreicht wird (Abb. 96).



Abb. 96: Primärenergiebedarf der Waldorfschule

5. Fazit

Die Herangehensweise des vorliegenden Forschungsprojekts kann als äußerst zielführend betrachtet werden. Durch die umfangreiche, vorangegangene Untersuchung der 5 beispielhaften neugebauten Schulen konnten wichtige Rückschlüsse für die Planung des neuen Schulgebäudes für die Waldorfschule gezogen werden.

Wir können auch nach unseren Untersuchungen keine eindeutige Position für die Planung der technischen Gebäudeausrüstung an Schulen ableiten. Es gibt kein richtig und kein falsch, da bei allen Schulen sowohl positive als auch negative Aspekte bei der Aufenthaltsqualität festzustellen sind. Die Untersuchungen zeigen aber auch, dass es eine Diskrepanz zwischen der objektiven Messung und der subjektiven Wahrnehmung gibt. Maschinell belüftete Schulen haben objektiv in Bezug auf die CO₂-Konzentration vor allem im Winter die bessere Luftqualität. Trotzdem ist die subjektive Wahrnehmung oft eine andere und eine rein mechanische Lüftung – im ungünstigsten Fall ohne öffentbare Fenster – vom Nutzer abgelehnt und die Luftqualität als schlecht beurteilt wird.

Zusätzlich reduziert die maschinelle Lüftung bei fehlender Feuchterückgewinnung die Raumluftfeuchte. Dies ließe sich durch den Einsatz einer Zuluftbefeuchtung korrigieren, jedoch besteht dann die Gefahr der Keimbildung, was eine gewissenhafte Überwachung und Wartung erfordert. Findet diese Wartung nicht, oder in nicht hinreichendem Maße statt, verteilen sich die Keime durch die Lüftungsanlage im ganzen Gebäude. Im Wissen um den Zustand vieler Schulen ist diese Maßnahme sicherlich nicht zu empfehlen. Eine vernünftige und pragmatische Lösung wäre die Frischluftmenge an kalten Tagen zu reduzieren und mit einer natürlichen Stoßlüftung in den Pausen zu kombinieren. Zusätzlich empfiehlt sich der Einsatz einer Wärme- und Feuchterückgewinnung.

Hinzu kommt das generelle Thema der Wartung und Instandhaltung. Je höher der Grad der technischen Ausstattung, desto größer ist der Aufwand dafür. Hygienisch muss das Luftverteilsystem in einwandfreiem Zustand gehalten werden. Dazu gehört unter anderem die regelmäßige Filterreinigung, damit eine mechanische Lüftung

tatsächlich die Luftqualität verbessert und mit minimalem Strombedarf arbeitet. Der technische Zustand ist permanent zu überwachen und sicherzustellen. Brandschutzklappen können zufallen, Stellantriebe ausfallen, etc. Dies führt zu laufenden Kosten, die aufzuwenden sind, will man die Funktion der Luftqualität gewährleisten und vermeiden, dass sich Systeme verschlechtern.

Letztlich kann man sagen, dass sowohl eine maschinelle Lüftung als auch eine natürliche Lüftung möglich ist; jedoch sollte die mechanische Lüftung aus den erwähnten Gründen mit einer natürlichen Lüftung kombiniert werden, die sogenannte Hybridlüftung. Bei der Dimensionierung ist die Stoßlüftung in den Pausen zu berücksichtigen, wodurch sich die Luftmenge nahezu halbieren lässt (ca. 15 m³/h je Schüler). Eine derart reduzierte Luftmenge stellt den Aufwand einer Einzelraumregelung, wie sie beispielsweise in Diedorf zum Einsatz kam, in Frage. Dort regeln Sensoren für CO₂ und die Anwesenheit die Luftmenge für jeden einzelnen Raum. Dies ist aus energetischer Sicht genauso begrüßenswert wie die Tatsache, dass dies in einer Pilotschule wie Diedorf getestet wird. Trotzdem stellt sich die Frage, ob dies ein Ansatz ist, der auf andere Schulen übertragbar ist. Ist der finanzielle Aufwand gerechtfertigt und können die notwendigen Wartungs- und Instandhaltungszyklen der Anlagen in dem Maße gewährleistet werden, dass das System auch in 10 oder 20 Jahren noch einwandfrei funktioniert? Technisch einfacher wäre z. B. in den Hauptunterrichtszeiten alle Räume mechanisch zu lüften. In den geringer belegten Nachmittagsstunden erfolgt eine maschinelle Belüftung nur in einzelnen Flügeln des Gebäudes. Sollten andere Räume belegt sein, können diese, wie in Schulen nach wie vor üblich, über die Fenster gelüftet werden.

Dahingegen verdeutlichen die Messergebnisse der natürlich belüfteten Schule in Ostfildern, dass auch eine natürliche Lüftung geplant sein muss, es reicht nicht aus, ausschließlich öffentbare Fenster zur Verfügung zu stellen. Es bedarf einer kontrollierten „Undichtigkeit“ in Kombination mit einer fassadennahen Erwärmung der kalten Außenluft sowie einem natürlichen Antrieb. Hierfür kann eine Querlüftung unter Ausnutzung des Winddrucks oder

der thermische Antrieb einer Kaminlüftung herangezogen werden.

Die Entscheidung für eine natürliche bzw. mechanische Lüftung muss selbstverständlich auch Parameter aus dem Kontext berücksichtigen: Das kann beispielsweise eine schlechte lokale Luftqualität oder eine erhöhte Schallbelastung von einer stark befahrenen Straße sein.

Für die Planung der Waldorfschule entschieden sich die Verantwortlichen für eine hybride Lüftung, allerdings nicht im klassischen Sinne einer mechanischen Lüftungsanlage in Kombination mit Fensterlüftung. Hier sieht die integrale Planung eine natürliche Vorkonditionierung der Frischluft über einen Erdkanal vor. Die vorkonditionierte Luft strömt im Atrium aus und wird dort weiter vorewärmt. Aktive Überströmelemente in den Trennwänden bringen diese Luft in die Klassenzimmer, so dass hier immer ein ausreichender Luftwechsel stattfinden kann und die CO₂-Konzentration im akzeptablen Rahmen bleibt. Durch diese Lösung können die sehr hohen Investitionen für die mechanische Lüftungsanlage eingespart und an anderer Stelle eingesetzt werden. Außerdem fällt der Wartungsaufwand für die notwendige dauerhafte Kontrolle, Reinigung (Filterwechsel) und Instandhaltung weg. Öffnbare Fenster gewährleisten darüberhinaus auch eine hohe Nutzerakzeptanz.

Die Messungen an den 5 Schulen verdeutlichen auch, dass ein vernünftiger sommerlicher Wärmeschutz, zumindest in normalen Klassenräumen, auch ohne maschinelle Kühlung möglich ist. Hierfür ist eine gute Kompromiss zwischen dem Anteil akustisch wirksamer Flächen und der exponierten thermischen Masse wichtig. Einige Schulen zeigen, dass mit ca. 30 % akustisch wirksamer Belegung der Decke, flankiert durch andere Maßnahmen, ein sehr guter akustischer Komfort erzielt wird. Bezüglich der thermischen Masse gilt aber: je mehr Speichermasse, desto besser. Diese ist vor allem dann wirksam, wenn die tagsüber eingespeicherte Wärme durch eine effektive Lüftung in den Nachtstunden wieder aus den Bauteilen ausgespeichert wird. Schulen wie die FOS/BOS Erding

setzen das mit einer mechanisch unterstützten Nachtauskühlung erfolgreich um, allerdings benötigt die Lüftungsanlage dafür wieder Strom – optimal wäre eine natürlich betriebene Quer- oder Kaminlüftung.

Zusätzlich bedarf es zwingend der effektiven Kontrolle solarer Wärmeeinträge über einen außenliegenden Sonnenschutz. Beim Einsatz von flächigen, textilen Behängen sollte die Wahl auf ein Textil mit einer solaren Transmission unter 5 % fallen. Solch ein Textil ist für gewöhnlich blickdicht und reduziert im geschlossenen Zustand signifikant die Tageslichtnutzung.

Um den sommerlichen Wärmeschutz in der Waldorfschule sicherzustellen soll ein außenliegender, sich dem Sonnenstand anpassender Sonnenschutz installiert werden. Dieser besitzt im oberen Bereich eine Tageslichtlenkung, so dass die Klassenräume auch dann mit natürlichem Licht versorgt werden, wenn der Sonnenschutz auf Grund von Blendung geschlossen ist. In der Nacht wird das Gebäude mittels einer Nachtlüftungspülung in Kombination mit der Nutzung der Speichermasse gekühlt. Große Ventiltore in den öffentlichen Bereichen verbessern durch Luftbewegung die thermische Behaglichkeit. Der Eurythmie-Raum wird als einziger Raum durch eine Bauteilaktivierung aktiv gekühlt. Das niedrige Temperaturniveau zur Kühlung wird dabei über natürliche Quellen (Erdwärmekollektoren) gewonnen, so dass keine Kältemaschine zum Einsatz kommen muss. Auch dies ist ein Erkenntnis aus den Untersuchungen der Schulen: ist eine geothermische Wärmeerzeugung verbaut, sollte im Sommer das Kühlpotential des Erdreichs ohne maschinelle Kühlung zur Verbesserung des thermischen Komforts genutzt werden. Beim Einsatz von technischen Systemen ist die Angemessenheit und Robustheit kritisch zu hinterfragen. Beispiel Angemessenheit: Vergleicht man die Technikzentralen z.B. der Schulen in Ostfildern und Diedorf, so muss man zwangsläufig die Frage stellen, ob es richtig ist, dass wir das Volumen der Klassenräume wirtschaftlichen Zwängen unterwerfen und stets kleiner machen, während das Volumen für Technikzentralen in den Untergeschossen stets größer wird. Beispiel Robust-

heit: Begutachtet man den Wartungszustand älterer bestehender Schulen, ist es um diesen meist nicht allzu gut bestellt. Dies ist keine Ausnahme sondern die Regel und hat zur Konsequenz, dass die eingesetzten Systeme und Strategien wartungsarm, robust und angemessen sein müssen. Die technischen Systeme bilden grundsätzlich die Achillesferse bezüglich funktionaler Robustheit. Zum einen erfordert der Betrieb eine gute Wartung und Instandhaltung, andererseits haben die Systeme eine sehr viel geringere Lebenszeit als das Gebäude. Vor allem die MSR-Technik basiert bereits nach wenigen Jahren auf einer Hardware, die nicht mehr dem Stand der Technik entspricht und ggf. keine Komponenten mehr erhältlich sind.

In der Waldorfschule wird in Summe möglichst wenig Technik eingesetzt. Die Wärmeversorgung erfolgt über lokal vorhandene Wärmequellen in Form des bestehenden Blockheizkraftwerks. Die Wärmeübergabe in den Klassenräumen lässt sich mit schnell reagierenden Heizkörpern gut auf sich ändernde Anforderungen regeln. Ein guter Wärmeschutz mit einem hohen Dämmstandard minimiert den Heizwärmebedarf. Ein effizienter außenliegender Sonnenschutz in Kombination einer Nachtauskühlung stellt den sommerlichen Wärmeschutz sicher. Passive Maßnahmen reduzieren den Wärme- und Kunstlichtbedarf zusätzlich.

Durch den Verzicht auf eine mechanische Lüftungsanlage und die Wahl der hybriden Lüftung mittels der aktiven Überströmelemente können hohe Investitionen eingespart werden. Diese Kosten können im Gegenzug in eine großflächige Photovoltaikanlage auf dem Dach mit insgesamt 456 m² Fläche investiert werden. Dadurch werden jährlich über 80 MWh Strom produziert, 3-fach so viel, wie die Schule selbst für den Gebäudebetrieb benötigt.

In der Bilanz kann somit auch der Wärmebedarf kompensiert werden, so dass ein Primärenergiebedarf von 0,26 kWh/m²a resultiert und die Waldorfschule den Nearly Zero Energy Standard erfüllt.

6. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Übersichtsplan der bestehenden Gebäude auf dem Grundstück der Waldorfschule Uhlandshöhe
- Abb. 2: Lageplan mit den beiden neu integrierten Gebäuden auf dem Grundstück der Waldorfschule Uhlandshöhe
- Abb. 3: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Ostfildern
- Abb. 4: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Ostfildern
- Abb. 5: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Ostfildern
- Abb. 6: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Ostfildern
- Abb. 7: Kalte repräsentative Woche (25.-29.04.2016), Ostfildern
- Abb. 8: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Ostfildern
- Abb. 9: spez. Raumbedarf, Ostfildern
- Abb. 10: Klassenraum in Ostfildern
- Abb. 11: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Ostfildern
- Abb. 12: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Ostfildern
- Abb. 13: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Recklinghausen
- Abb. 14: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Recklinghausen
- Abb. 15: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Recklinghausen
- Abb. 16: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Recklinghausen
- Abb. 17: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Recklinghausen
- Abb. 18: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Recklinghausen
- Abb. 19: spez. Raumbedarf, Recklinghausen
- Abb. 20: Klassenraum in Recklinghausen
- Abb. 21: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Recklinghausen
- Abb. 22: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Recklinghausen
- Abb. 23: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Erding
- Abb. 24: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Erding
- Abb. 25: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Erding
- Abb. 26: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Erding
- Abb. 27: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Erding
- Abb. 28: Warme repräsentative Woche (30.05.-03.06.2016), Erding
- Abb. 29: spez. Raumbedarf, Erding
- Abb. 30: Klassenraum in Erding
- Abb. 31: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Erding
- Abb. 32: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Erding
- Abb. 33: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Buchloe
- Abb. 34: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe
- Abb. 35: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Buchloe
- Abb. 36: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Buchloe
- Abb. 37: Kalte repräsentative Woche (14.-18.03.2016), Buchloe
- Abb. 38: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Buchloe
- Abb. 39: spez. Raumbedarf, Buchloe
- Abb. 40: Klassenraum in Buchloe
- Abb. 41: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Buchloe
- Abb. 42: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Buchloe
- Abb. 43: Kumulierte Wahrscheinlichkeit, Diedorf
- Abb. 44: CO₂-Konzentration im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Diedorf
- Abb. 45: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Außenlufttemperatur, Diedorf
- Abb. 46: Raumlufftemperatur im Verhältnis zur Raumlufffeuchte, Diedorf
- Abb. 47: Kalte repräsentative Woche (29.02.-04.03.2016), Diedorf
- Abb. 48: Warme repräsentative Woche (27.06.-01.07.2016), Diedorf
- Abb. 49: spez. Raumbedarf, Diedorf
- Abb. 50: Klassenraum in Diedorf
- Abb. 51: Nachhallzeiten bei verschiedenen Frequenzen, Diedorf
- Abb. 52: Continuous Daylight Autonomy (cDA), Diedorf
- Abb. 53: Bewertung der Luftqualität
- Abb. 54: Bewertung der Luftfeuchte

- Abb. 55: Bewertung des winterlichen Komforts
- Abb. 56: Bewertung des sommerlichen Komforts
- Abb. 57: Bewertung des akustischen Komforts
- Abb. 58: Bewertung des visuellen Komforts
- Abb. 59: Simulationsergebnisse für den Raumbedarf (Heizen, Kühlen, Kunstlicht und Hilfsenergie)
- Abb. 60: Simulationsergebnisse für das CO₂-Äquivalent
- Abb. 61: Simulationsergebnisse für die Energiekosten des Gebäudebetriebs
- Abb. 62: Verlauf der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)
- Abb. 63: Monatliche solare Einstrahlung (direkt und diffus) auf die Horizontale (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)
- Abb. 64: Absolute Außenluftfeuchte über der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)
- Abb. 65: Optische Unterteilung des Neubaus in drei Baukörper
- Abb. 66: Grundriss Erdgeschoss
- Abb. 67: Grundriss 1. Obergeschoss
- Abb. 68: Grundriss 2. Obergeschoss
- Abb. 69: Ansicht Süden
- Abb. 70: Längsschnitt
- Abb. 71: Temperaturspreizungen im Winter in dem besten (Raum 8) und schlechtesten (Raum 1) für alle Konstruktionsvarianten
- Abb. 72: Temperaturspreizungen im Sommer in dem besten (Raum 8) und schlechtesten (Raum 1) für alle Konstruktionsvarianten
- Abb. 73: End- und Primärenergiebedarf im Betrieb für die Varianten
- Abb. 74: Vergleich des erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteils Primärenergie und des Treibhauspotentials (GWP) für alle Varianten in der Produktion
- Abb. 75: Vergleich der vier Konstruktionsweisen für die Module C1-2, D
- Abb. 76: Primärenergiebedarf (nicht-erneuerbar) der Varianten über 50 Jahre
- Abb. 77: CO₂-Ausstoß der Varianten über 50 Jahre
- Abb. 78: Gesamtbilanz graue Energie und Betriebsenergie der Lebenszyklusanalyse
- Abb. 79: Konzept Winter
- Abb. 80: Konzept Sommer Tag
- Abb. 81: Konzept Sommer Nacht
- Abb. 82: Lüftungskonzept in der Fassade
- Abb. 83: Schema der aktiven Überströmelemente in der Trennwand
- Abb. 84: Thermisch aktivierte Flächen im Erdgeschoss
- Abb. 86: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Chemie 1. OG“
- Abb. 85: Darstellung der Referenzräume der thermischen Simulation
- Abb. 87: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Klassenraum 2. OG Süd“
- Abb. 88: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Zeichen 2. OG Süd“
- Abb. 89: Simulationsergebnis des thermischen Komforts für die Zone „Eurythmie 2. OG Ost“
- Abb. 90: Tageslichtquotient UG
- Abb. 91: Tageslichtquotient EG
- Abb. 92: Randbedingungen für die Tageslichtsimulation
- Abb. 93: Tageslichtquotient 1.OG
- Abb. 94: Tageslichtquotient 2.OG
- Abb. 95: Nutzenergiebedarf der Waldorfschule
- Abb. 96: Primärenergiebedarf der Waldorfschule

Fotos Außenansicht und Klassenzimmer der 5 untersuchten Schulen:
 The Pk. Odessa Co. Simon Jüttner, Markus Lanz, Sebastian Schels

7. Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Union Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung), Brüssel 2010
- [2] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007, Stand: September 2007
- [3] 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
- [4] 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
- [5] DIN EN 18041: Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung, Stand: Mai 2016
- [6] Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und –versorgungen, http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf (09.07.2017)
- [7] Salzmann, Christian Gotthilf: Noch etwas über Erziehung Teil I, Berlin 1869, zit. nach: Luley, Michael: Eine kleine Geschichte des deutschen Schulbaus. Vom späten 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart, Frankfurt/M.-Berlin-Bern-Bruxelles-New York-Oxford-Wien 2000
- [8] Pettenkofer, Max: Besprechung allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen, München 1858
- [9] Hellwig, Runa Tabea, Matthias Kerken, Simon Schmidt: Ausstattung von Klassenräumen mit Einrichtungen zum Temperieren, Lüften und Belichten. Bauphysik 31/2009, S. 157–162
- [10] Mendell, M. J., G. A. Heath: Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence students performance? A critical review of the literature. Indoor Air, 15/2005, S. 27–52, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x
- [11] Shendell, D. G. et al.: Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho, Indoor Air, 14/2004, S. 333–341
- [12] Ribic, Werner: Schulstudie, Ziel: Keine Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit durch schlechte Luft an Österreichs Schulen, Unser Weg 5/2007, S. 195–198
- [13] Wargocki, Pawel, David P. Wyon: Research Report on Effects of HVAC On Student Performance, ASHRAE Journal 48/2006, S. 23–28, http://awilkinson.us/sustain/2D_4_Effects_HVAC_onStudentPerformance.pdf
- [14] Winkler, Manuel H.: Analyse subjektiver Erhebungsdaten einer Licht- und Raumklimastudie in einer Bildungseinrichtung, Forschungsergebnisse aus der Bauphysik Band 23, Stuttgart 2016
- [15] Zit. nach: Bauer, Eugen: Schulbau pädagogisch gesehen, Villingen 1963
- [16] Sedlbauer, Klaus, Andreas Holm, Runa Hellwig: Raumklima und Schülerleistung. Forschungsbericht, Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2009, www.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-23991-Band%202.pdf (13.7.2017).

- [17] Pepler, R. D., R. E. Warner: Temperature and Learning: An Experimental Study, in: ASHRAE Annual Meeting, Research Report No. 2089 RP-57, Lake Placid-New York 1968, S. 211–219, zit. nach: Sedlbauer, Holm, Hellwig 2009.
- [18] OWP/P Architects, VS Furniture, Bruce Mau Design (Hg.): The Third Teacher, New York 2010
- [19] Sartori I. and Hestnes A.G.: Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. Energy and Buildings, Vol. 39 Issue 3, pp.249-257, 2007 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>