

Verein für ein freies Schulwesen, Waldorfschulverein e.V.

Freie Waldorfschule Uhlandshöhe

Frau Elisabeth Beck-Seith

Haußmannstr. 44

70188 Stuttgart

Realisierung eines Nearly Zero Energy Standards für die freie Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart

Abschlussbericht des Forschungsprojekts

gefördert unter dem Aktenzeichen Az: 33278/02-25 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Technische Universität München

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Professor Dipl.-Ing. Thomas Auer

Arcisstr. 21

80333 München

Thomas Schmid, Bilge Kobas, Philipp Vohlidka, Serena Keller, Christian Hepf

München, Oktober 2025

Verein für ein freies Schulwesen, Waldorfschulverein e.V.

Freie Waldorfschule Uhlandshöhe

Frau Elisabeth Beck-Seith

Haußmannstr. 44

70188 Stuttgart

Realisierung eines Nearly Zero Energy Standards für die freie Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart

Abschlussbricht des Forschungsprojekts

gefördert unter dem Aktenzeichen Az: 33278/02-25 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Technische Universität München

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Professor Dipl.-Ing. Thomas Auer

Arcisstr. 21

80333 München

Thomas Schmid, Bilge Kobas, Philipp Vohlidka, Serena Keller, Christian Hepf

München, Oktober 2025



Antragsteller und Kooperationspartner

ANTRAGSTELLER

Verein für ein freies Schulwesen,

Waldorfschulverein e.V.
Freie Waldorfschule Uhlandshöhe
Frau Elisabeth Beck-Seith
Haußmannstr. 44
70188 Stuttgart

Im September 1919 von Emil Molt und Rudolf Steiner gegründet, ist die Freie Waldorfschule Uhlandshöhe die weltweit erste Waldorfschule. Pädagogische Grundlage bildet die anthroposophische Menschenkunde Rudolf Steiners. Ziel der Schule ist die Entwicklung kognitiver, kreativer, künstlerischer, praktischer und sozialer Fähigkeiten gleichermaßen. Sie bietet daher einen vielseitigen Fächerkanon, der neben dem notwendigen Fachwissen zu einer breiten Allgemeinbildung führt. Nahezu tausend Schüler besuchen die zweizügige Schule mit ihrer eigenständigen Form gemeinsamer Bildung aller Jugendlichen (Einheitliche Grund- und Höhere Schule). Die Freie Waldorfschule steht allen Kindern und Jugendlichen offen, sämtliche staatliche Schulabschlüsse können erreicht werden. Etwa 90 Lehrkräfte und über 40 Mitarbeiter sind an der Schule tätig, die Schule wird von ca. 940 Schülern besucht. Die Freie Waldorfschule Uhlandshöhe ist eine staatlich anerkannte Ersatzschule in freier Trägerschaft.

KOOPERATIONSPARTNER

Technische Universität München

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

Prof. Thomas Auer

Arcisstraße 21

80333 München

Telefon: 089 289 22475

Telefax: 089 289 23851

lehrstuhl.klima@ed.tum.de

Der Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen (vormals Bauklimatik und Haustechnik) ist Teil des Departments für Architektur der Technischen Universität München. Ordinarius des Lehrstuhls ist Professor Thomas Auer.

Fachliche Schwerpunkte des Lehrstuhls sind energieoptimiertes und klimagerechtes Bauen, Aufenthaltsqualität, ganzheitliches Planen, passive Gebäudekonzepte, innovative Gebäudetechnik, Nachhaltigkeit sowie städtische Energiekonzepte im gesamtwirtschaftlichen Kontext.

Am Lehrstuhl beschäftigt sind ca. 20 Mitarbeitende der Fachrichtungen Architektur, Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen und Umweltwissenschaften. Dieses äußerst interdisziplinäre Team verfügt über eine langjährige Forschungserfahrung, wobei die zahlreichen durchgeführten Projekte stets von einem großen Praxisbezug geprägt sind. Die in den letzten Jahren abgeschlossenen und laufenden Projekte umfassen sowohl Forschungsaufträge von Bundes- und Staatsministerien als auch Kooperationen mit großen Industrieunternehmen, Mittelständlern und Planungsbüros.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	5
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	9
TABELLENVERZEICHNIS	17
ABKÜRZUNGEN UND BEGRIFFSERKLÄRUNGEN	19
ZUSAMMENFASSUNG	21
1. EINLEITUNG: WALDORFSCHULE UHLANDSHÖHE IN STUTTGART	23
2. FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE UND ZIELSETZUNG	31
2.1 ANFORDERUNGEN AN DIE AKTIVEN ÜBERSTRÖMELEMENTE	31
2.2 NACHHALTIGKEIT	33
2.3 INNOVATIONSCHARAKTER	34
2.4 ARBEITSPAKETE UND DARSTELLUNG DES LÖSUNGSWEGS	35
3. MOCKUP	39
3.1 BESCHREIBUNG DES LÜFTUNGS- UND ENERGIEKONZEPTE UHLANDSCHULE	39
3.1.1 Lüftung der Klassenräume	45
3.1.2 Deckenlüfter im Foyer	48
3.1.3 Heizung und passive Kühlung	49
3.2 LÜFTUNGSANLAGE	50
3.2.1 Bauweise	50
3.2.2 Aufbau	53
3.3 STEUERUNGSSYSTEM	64
3.4 MESSUNGEN	65
3.4.1 Messgeräte	65
3.4.2 Bauakustik Prüfung nach DIN EN ISO 16283-1	66
3.4.3 Strömungsmessung	68
3.4.4 Leistungsmessungen	71
3.4.5 Strömungsvisualisierung	79
3.5 KOSTEN	85
3.6 AUSBLICK	87
3.6.1 Fazit	90

4.	UNTERSUCHUNGEN ZUR MATERIALITÄT	91
4.1	EMISSIONEN (VOCs), SCHADSTOFFE.....	91
4.1.1	<i>Zielsetzung / Vorgehensweise.....</i>	<i>91</i>
4.1.2	<i>Zusammenfassung</i>	<i>92</i>
4.1.3	<i>Vorbemerkung, Vorgang und Anlagen</i>	<i>111</i>
4.2	RAUMAKUSTIK	112
4.2.1	<i>Klassenzimmer 1.11</i>	<i>112</i>
4.2.2	<i>Klassenzimmer 3.01</i>	<i>114</i>
4.3	LEBENSZYKLUSKOSTEN.....	117
4.4	ÖKOBILANZIELLE BETRACHTUNG.....	120
5.	MONITORING	127
5.1	GRUNDLAGEN.....	127
5.2	THERMISCHE SIMULATION	130
5.2.1	<i>Sommerlicher Wärmeschutz (DIN 4108-2:2013)</i>	<i>130</i>
5.2.2	<i>Thermischer Komfort</i>	<i>132</i>
5.2.3	<i>Primärenergiebilanz.....</i>	<i>136</i>
5.3	TAGESLICHTSIMULATION	136
5.4	MESSUNGEN	140
5.4.1	<i>Konzentration von CO₂.....</i>	<i>142</i>
5.4.2	<i>Temperatur</i>	<i>152</i>
5.4.3	<i>Heizungszähler.....</i>	<i>153</i>
5.4.4	<i>Tageslicht.....</i>	<i>154</i>
5.5	NUTZERBEFRAGUNG (SURVEY).....	156
6.	PÄDAGOGISCHE INTEGRATION	157
6.1	THEMENSCHWERPUNKTE ZUR PÄDAGOGISCHEN INTEGRATION DES ARCHITEKTONISCHEN KONZEPTS.....	157
6.2	VORLESUNG UND WORKSHOP	160
6.3	LEITGEDANKEN	162
7.	SYMPOSIUM.....	165
7.1	HINTERGRUNDINFORMATION	166
7.2	INHALT	168
7.3	BEWERBUNG	177
7.4	ERGEBNISVERBREITUNG	181
7.4.1	<i>Internetpräsenz und Domain</i>	<i>181</i>

7.4.2 Themenblock I bis III	184
7.4.3 Referierende	186
7.4.4 Einblicke (Auszüge aus den Vorträgen)	187
7.4.5 Weitere Informationen	188
7.4.6 Statistiken	189
ERGEBNISSE UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	193
LITERATURVERZEICHNIS.....	195
ANHANG ABSCHLUSSBERICHT.....	I
ANHANG A1 - BELEGUNG KLASSENÄUUME WALDORFSCHULE UHLANDSHÖHE	I
ANHANG PLÄNE.....	III
ANHANG P1 - GRUNDRISSSE	V
ANHANG P2 - MESSDATENERFASSUNG	IX
ANHANG ZUM BERICHT LÜFTUNGSMOCKUP	XI
ANHANG B1 - BERICHT AKUSTIKMESSUNG.....	XIII
ANHANG B2 - STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITSMESSERGEBNISSE	XXII
ANHANG B3 - BEDIENUNGSANLEITUNG.....	XXIV
ANHANG ZUM PRÜFBERICHT INNENRAUMLUFTQUALITÄT	XXV
ANHANG C1 - MESSPROTOKOLLE.....	XXVII
ANHANG C2 - BILDDOKUMENTATION	XXXIII
ANHANG C3 - VORBEMERKUNG	XLVI
ANHANG C4 - VORGANG	XLVII
ANHANG C5 - ANLAGEN	XLVIII
ANHANG ZUM BERICHT ZUR ENTWURFSPLANUNG	LIX
ANHANG D1 - ZUSAMMENFASSUNG OSN	LXI
ANHANG D2 - RANDBEDINGUNGEN FÜR DIE THERM. SIMULATION DES OSN	LXII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan.....	25
Abbildung 2: Energiekonzept im Winter	28
Abbildung 3: Energiekonzept im Sommer / Tag	29
Abbildung 4: Energiekonzept im Sommer / Nacht und in der Übergangszeit.....	29
Abbildung 5: Primärenergiebilanz des Gebäudes [2]	30
Abbildung 6: Konzept Winter	41
Abbildung 7: Konzept Sommer (tagsüber)	42
Abbildung 8: Konzept Sommer (nachts).....	42
Abbildung 9: Energie- und Lüftungskonzept EG	43
Abbildung 10: Energie- und Lüftungskonzept 1. OG	44
Abbildung 11: Energie- und Lüftungskonzept 2. OG	44
Abbildung 12: Energie- und Lüftungskonzept 1. UG	45
Abbildung 13: Konzeptschnitt Klassenraum - Sommer	46
Abbildung 14: Konzeptschnitt Klassenraum - Winter	47
Abbildung 15: Konzeptschnitt Klassenraum - Nacht	47
Abbildung 16: Komfortlüftungskonzept in der Trennwand (Frischlufte).....	48
Abbildung 17: Lüftungskonzept in der Fassade	48
Abbildung 18: Zuluft mit einem Ventilator.....	51
Abbildung 19: Abluft mit einem Ventilator.....	51

Abbildung 20: Zuluft mit zwei Ventilatoren.....	52
Abbildung 21: Abluft mit zwei Ventilatoren.....	53
Abbildung 22: Auslegen des Mockups vorderer Teil.....	56
Abbildung 23: Auslegen des Mockups hinterer Teil	56
Abbildung 24: Schienen Deckenaufhängung (Quelle HILTI)	57
Abbildung 25: befestigte Auslassbox	58
Abbildung 26: zweite Baugruppe befestigt.....	59
Abbildung 27: Mockup befestigt.....	60
Abbildung 28: Gesamtes Mockup im Überblick	61
Abbildung 29: Verkabelung überprüfen	62
Abbildung 30: Verkabelung des Mockups.....	63
Abbildung 31: Schaltplan Mockup.....	63
Abbildung 32: Mess- und Steuerungselemente	65
Abbildung 33: links: Strömungsmessgerät, rechts: Messöffnung mit Verschlussstopfen	66
Abbildung 34: Aufbau der Abdichtung	66
Abbildung 35: links abgedichteter Aufbau, rechts offen	67
Abbildung 36: Anzahl der Messpunkte aus DIN EN 12599	69
Abbildung 37: Zusammengefasste Ergebnisse Strömungsmessung	71
Abbildung 38: Leistungsmessung der Klappen.....	72
Abbildung 39: Leistungsmessung EcoWatt Lüfter Stufe mit 10V.....	73

Abbildung 40: Leistungsmessung EcoWatt Lüfter Stufe mit 6V	74
Abbildung 41: Leistungsmessung Rohrventilator	74
Abbildung 42: Leistungsdiagramm EcoWatt CAB-250	75
Abbildung 43: Energiebedarfsvergleich	78
Abbildung 44: Fensteröffnung 1	79
Abbildung 45: Fensteröffnung 2	79
Abbildung 46: Fensteröffnung 1, kältere Luft.....	80
Abbildung 47: Fensteröffnung 1, wärmere Luft	81
Abbildung 48: Fensteröffnung 1, hohe Geschwindigkeit	82
Abbildung 49: Fensteröffnung 2, wärmere Luft	83
Abbildung 50: Fensteröffnung 2, hohe Geschwindigkeit	84
Abbildung 51: Durchmischung im Raum wie Abbildung 48.....	85
Abbildung 52: Strömungen in Auslassbox mit Prallklappe	88
Abbildung 53: Schnitt: Abhangdecke mit Lüftungsschlitzen	88
Abbildung 54: Grundriss: Abhangdecke mit Lüftungsschlitzen	89
Abbildung 55: Variante ohne Auslassbox.....	89
Abbildung 56: Darstellung der einzelnen Messpositionen für die Klassenräume 1.11 (links) und 3.01 (rechts)	112
Abbildung 57: Raumakustische Messergebnisse aller Positionen (Klassenraum 1.11)	113
Abbildung 58: Gemessene und berechnete Nachhallzeiten (Klassenraum 1.11)	113

Abbildung 59: Raumakustische Messergebnisse aller Positionen (Klassenraum 3.01)	115
Abbildung 60: Gemessene und berechnete Nachhallzeiten (Klassenraum 3.01).....	115
Abbildung 61: Ergebnisse Lebenszykluskostenberechnung - Berechnungsergebnis gesamt.....	118
Abbildung 62: Verteilung der gesamten Investitionen.....	118
Abbildung 63: Verteilung der Investitionen nach Kostengruppen	119
Abbildung 64: Lebenszyklusphasen und -module nach DIN EN 15978-1	121
Abbildung 65: Gebäudegrunddaten (LCA).....	122
Abbildung 66: Übersicht Energiebilanz	122
Abbildung 67: Treibhausgaspotenzial / GWP	123
Abbildung 68: Primärenergie nicht erneuerbar / PEne	124
Abbildung 69: Primärenergie gesamt + Anteil in % erneuerbar / PEges + PEern	125
Abbildung 70: Verlauf der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz).....	128
Abbildung 71: Monatliche solare Einstrahlung (direkt und diffus) auf die Horizontale (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz).....	129
Abbildung 72: Absolute Außenluftfeuchte über der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz).....	129
Abbildung 73: Darstellung der Referenzräume der thermischen Simulation	130
Abbildung 74: DIN 4108-2:2013 Randbedingungen	131
Abbildung 75: DIN 4108-2:2013 Definition von Kelvinstunden	132
Abbildung 76: Kelvinstunden nach DIN 4108 für die untersuchten Zonen	132

Abbildung 77: Ergebnisse des thermischen Komforts nach DIN EN 15251.....	134
Abbildung 78: Thermischer Komfort für die untersuchten Zonen	135
Abbildung 79: Primärenergiebilanz des Gebäudes	136
Abbildung 80: Randbedingungen der Tageslichtsimulation	137
Abbildung 81: Ergebnisse der Tageslichtsimulation.....	139
Abbildung 82: Anordnung der Sensoren im Klassenraum 1.11 (Foto: Rafael Gonzalez, Plan basierend auf Bildern von Behnisch Architekten [11])	141
Abbildung 83: Anordnung der Sensoren im Klassenraum 2.12 (Foto: Rafael Gonzalez, Plan basierend auf Bildern von Behnisch Architekten [11])	141
Abbildung 84: Anordnung der Sensoren im Klassenraum 3.01 (Foto: Rafael Gonzalez, Plan basierend auf Bildern von Behnisch Architekten [11])	141
Abbildung 85: Klassenraum 1.11, CO ₂ -Konzentration während der Unterrichtszeiten gegen Außentemperatur	147
Abbildung 86: Klassenraum 3.01, CO ₂ -Konzentration während der Unterrichtszeiten gegen Außentemperatur	148
Abbildung 87: CO ₂ -Konzentration gegen Außentemperatur	149
Abbildung 88: Gesamtstunden, in denen das Fenster während eines Tages geöffnet war, gegen die Außentemperatur	149
Abbildung 89: Klassenraum 1.11, Gesamtstunden, in denen die CO ₂ -Konzentration während der Unterrichtsstunden pro Monat über 1500 ppm liegt.....	150
Abbildung 90: Klassenraum 3.01, Gesamtstunden, in denen die CO ₂ -Konzentration während der Unterrichtsstunden pro Monat über 1500 ppm liegt.....	150
Abbildung 91: Klassenraum 3.01, Beispielswoche aus einer warmen Periode.....	151
Abbildung 92: Klassenraum 3.01, Beispielswoche aus einer kalten Periode	151

Abbildung 93: Klassenraum 1.11, Innentemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur	152
Abbildung 94: Klassenraum 3.01, Innentemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur	153
Abbildung 95: Innentemperatur und Heizungsähler (Klassenraum 1.11, 3.01, Gesamt)	153
Abbildung 96: Klassenraum 1.11, Tageslicht.....	154
Abbildung 97: Klassenraum 3.01, Tageslicht.....	155
Abbildung 98: Klassenraum 1.11, Gesamtanzahl der Stunden, in denen das Tageslichtniveau unter 200 Lux liegt, aufsummiert über die Monate	155
Abbildung 99: Klassenraum 3.01, Gesamtanzahl der Stunden, in denen das Tageslichtniveau unter 200 Lux liegt, aufsummiert über die Monate	156
Abbildung 100: Fotos von der Veranstaltung (Fotos: Bilge Kobas)	161
Abbildung 101 Veranstaltungsposter Symposium (Serena Keller, TUM)	167
Abbildung 102: Foto Symposium Theaterhaus Stuttgart (Foto: TUM)	175
Abbildung 103: Fotos Symposium Stefan Behnisch (links), Sabine Djahanschah (rechts) (Foto: TUM)	175
Abbildung 104: Exkursion Freie Waldorfschule Uhlandshöhe (Foto: TUM)	176
Abbildung 105 Titelcover Symposium (Serena Keller, TUM).....	177
Abbildung 106 Website - Dokumentation des abgeschlossenen Symposiums (TUM) [20]	182
Abbildung 107: Beispiel LinkedIn Beitrag vom 05.02.2025 (TUM) [23]	183
Abbildung 108 Website - Dokumentation der Themenblock I bis III (TUM) [20]	184
Abbildung 109: Website - Dokumentation der Referierenden (TUM) [20]	186

Abbildung 110 Website – Filmische Dokumentation Symposium (TUM) [20]	187
Abbildung 111: Website - Einblicke; Auszüge aus den Vorträgen (TUM) [20]	188
Abbildung 112: Website - Exkursion, weitere Informationen zum Symposium (TUM) [20]	189
Abbildung 113: Statistikbericht Stadtkarte - Traffic nach Standort im Zeitraum Februar 2024 bis September 2025 (wix.com); Maps Data: Google, Kartendaten ©2025 [21]	190
Abbildung 114: Statistikbericht Stadtkarte (Detailansicht Deutschland) - Traffic nach Standort im Zeitraum Februar 2024 bis September 2025 (wix.com); Maps Data: Google, Kartendaten ©2025 [21]	190
Abbildung 115: Statistikbericht Seitenaufrufe - Traffic nach zeitlichem Verlauf im Zeitraum Februar bis Dezember 2024 (wix.com) [21].....	191
Abbildung 116 Statistikbericht Seitenaufrufe - Traffic nach zeitlichem Verlauf im Zeitraum Februar bis April 2024 (wix.com) [21]	192
Abbildung 117: Statistikbericht Seitenaufrufe - Traffic nach zeitlichem Verlauf im Zeitraum Januar bis September 2025 (wix.com) [21]	192

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauteilliste	54
Tabelle 2: Ergebnis Akustikmessung	67
Tabelle 3: Mindestanforderung für Klassenräume.....	67
Tabelle 4: ermittelte Messstellen.....	70
Tabelle 5: Nutzungsprofil Klassenzimmer	76
Tabelle 6: Jahresenergiebedarf Variante 1	76
Tabelle 7: Jahresenergiebedarf Variante 2	77
Tabelle 8: mechanische Lüftung	77
Tabelle 9: Kosten der Variante mit einem Ventilator	86
Tabelle 10: Kosten der Variante mit zwei Ventilatoren.....	86
Tabelle 11: Raum 1.11, 2.12	93
Tabelle 12: Raum 3.01	100
Tabelle 13: Probenahmebedingungen Raum 2.12 (vor ca. 8 Stunden)	109
Tabelle 14: Probenahmebedingungen Raum 1.11 (vor ca. 8 Stunden)	110
Tabelle 15: Probenahmebedingungen Raum 3.01 (vor ca. 8 Stunden)	110
Tabelle 16: Probenahmebedingungen Raum 3.01 (vor ca. 1 Stunden)	111
Tabelle 17: Gemessene, berechnete und empfohlene Nachhallzeiten (Klassenraum 1.11).....	114
Tabelle 18: Gemessene, berechnete und empfohlene Nachhallzeiten (Klassenraum 3.01).....	116

Tabelle 19: Pädagogische Integration158

Tabelle 20: Redaktionsplan: Inhalte der Videobotschaften.....179

Abkürzungen und Begriffserklärungen

AIR	Ausschuss für Innenraumrichtwerte
BB	Bundesverband Baustoffe
EEWärmeG	Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
ERW	Einzelrichtwerte
EPD	Environmental Product Declaration (deutsch: Umweltproduktdeklaration)
F _c	Abminderungsgrad einer Sonnenschutzvorrichtung
GLT	Gebäudeleittechnik
GWP	Global warming potential (deutsch: Erderwärmungspotenzial)
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad eines transparenten Bauteils
HK	Herstellungskosten
HVAC	Heating, Ventilation und Air Conditioning (deutsch: Lüftungs- und Klimaanlage)
IAQ	Indoor Air Quality
IC-Meter	Indoor Climate Meter (deutsch: Raumklimamessgerät)
IRK	Innenraumlufthygiene-Kommission
i.V.m.	in Verbindung mit
KG	Kostengruppe
LCA	Life Cycle Assessment (deutsch: Lebenszyklusanalyse)
LCC	Life Cycle Cost (deutsch: Lebenszykluskosten)
MRT	Mean Radiant Temperature (deutsch: mittlere Strahlungstemperatur)
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

NRF	Netto-Raumfläche
NK	Nutzungskosten
Ökobaudat	Datenbank für die Ökobilanzierung von Gebäuden
OSN	Oberstufenneubau
PE	Primärenergie
PENRT	Primärenergie, nichterneuerbar, total
PERT	Primärenergie, erneuerbar, total
PM	Particulate Mater (deutsch: Feinstaub)
PMV	Predicted Mean Vote (deutsch: erwartete durchschnittliche Empfindung)
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied (deutsch: erwartete unzufriedene Personen)
PPM	Parts per Million
PV	Photovoltaik
SVOC	Semivolatile Organic Compounds (deutsch: semiflüchtige organische Verbindungen)
TIC	Total ion current (deutsch: Totalionenstrom)
TVOCs	Total Volatile Organic Compounds (deutsch: Summe der flüchtigen organischen Verbindungen)
UBA	Umweltbundesamt
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VOCs	Volatile Organic Compounds (deutsch: Flüchtige organische Verbindungen)
VVOC	Very Volatile Organic Compounds (deutsch: sehr flüchtige organische Verbindungen)
WMZ	Wärmemengenzähler
ZTV	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen

Zusammenfassung

Der Innovationscharakter dieses Forschungsprojekts besteht darin aufzuzeigen, dass eine freie architektonische Sprache auch ohne eine sehr hohe technische Gebäudeausrüstung gezielt Herausforderungen klimatischer und technischer Art lösen kann. Dem Bauherrn wird dafür ein Lüftungs- und Energiekonzept vorgeschlagen, das einerseits zu einer hohen Aufenthaltsqualität in Bezug auf die Luftgüte, Tageslichtverfügbarkeit und den thermischen Komfort, andererseits aber gleichzeitig auch zu einem niedrigen Primärenergiebedarf führen kann. Für die Klassen und Aufenthaltsräume wird eine mechanisch unterstützte natürliche Lüftung vorgeschlagen. In einem ersten Schritt wird für das Lüftungssystem, um die genauen Anforderungen zu überprüfen, ein Mockup entwickelt. Dabei wird das Mockup so gebaut, dass ein gewisser Abschnitt der benachbarten Zonen, in dem Fall Atrium und Klassenzimmer, mit abgebildet werden können. Das Lüftungskonzept wird realisiert. Neben dem Lüftungskonzept und der emissionsarmen Materialität spielen auch geringe Geruchsemissionen und Schadstoffbelastungen eine wichtige Rolle. Diesbezüglich werden nach Fertigstellung des Gebäudes Untersuchungen zur Raumluft durchgeführt und hierbei speziell auf Emissionen (VOCs) und Schadstoffe eingegangen. Weiterhin erfolgt eine Betrachtung der Lebenszykluskosten und der ökobilanziellen Bewertung des gebauten Projekts. Das darauffolgende geplante zweijährige Monitoring konnte aufgrund von längeren Bauzeitverzögerungen nicht wie ursprünglich geplant durchgeführt werden. Die Monitoringphase wird daher abgewandelt und in begrenztem Umfang durchgeführt. Ein Baustein im pädagogischen Konzept der Waldorfschule ist es, dass die Schülerinnen und Schüler ein Verständnis für ihre umgebende Lebenswelt entwickeln. Hierfür werden Themenschwerpunkte formuliert und Leitgedanken entwickelt. Insgesamt wird aufgezeigt, wie mithilfe eines gering technisierten Lüftungs- und Energiekonzepts eine hohe Aufenthaltsqualität im Schulbau zu erreichen ist. Zur Erlangung der energetischen Ziele ist die Optimierung des Betriebs erforderlich und bedarf dem Engagement der Betreiber. Die Ergebnisse zeigen, dass dafür Potenziale vorhanden sind.

Das Projekt wurde vom Verein für ein freies Schulwesen, Waldorfschulverein e.V. „Freie Waldorfschule Uhlandshöhe“ beantragt und gemeinsam mit der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen durchgeführt. Das Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 33278/02-25.

1. Einleitung: Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart

Beschreibung der Ausgangssituation / Stand der Technik

Gegenstand dieses Forschungsprojektes ist der geplante Neubau der freien Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart. Der Ersatzneubau für zwei bestehende Gebäude schafft den dringend benötigten Platz, der wegen des steigenden Bedarfs an Ganztagesbetreuung gebraucht wird. Der Waldorfschulverein formulierte schon vor Planungsbeginn seine hohen Erwartungen an Energieeffizienz, Aufenthaltsqualität und die zu verwendenden Materialien. Dem vorliegenden Projektantrag vorhergehend wurde deshalb das bereits von der DBU geförderte Forschungsprojekt „Entwicklung von beispielhaften Neubaumaßnahmen für die Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart auf Basis von Messungen und Analysen neugebauter Schulen“ (AZ 33278/01) initiiert [1]. Die Themenpunkte der Kapitel „Raum und Komfort“ sowie „Technik und Energie“ ist ab Seite 42 des PDFs zu finden.

In diesem Projekt wurden 5 bestehende Schulen bezüglich ihrer Typologie, Materialität und verbrauchten Haustechnik umfassend analysiert. Hauptaugenmerk lag auf einer langfristigen Datenerfassung der Aufenthaltsqualität dieser Schulen. Diese umfassen Innentemperatur, relative Luftfeuchte und CO₂-Konzentration. Zusätzlich wurde mittels dynamischer Gebäudesimulation sowohl der Energiebedarf als auch die Tageslichtnutzung ermittelt. Ergänzend durchgeführt wurde eine Einzelmessung der vorherrschenden Nachhallzeiten.

Durch die Analyse der Messergebnisse konnte festgestellt werden, dass fast alle Systeme sowohl Vor- als auch Nachteile ausweisen. Allgemeingültige, „blind“ auf alle Schulen übertragbare Maßnahmenempfehlungen konnten nicht wie erhofft abgeleitet werden. Wichtige Parameter für eine energieeffiziente Schule konnten dennoch abgeleitet werden:

- 1) Die Minimierung des Strombedarfs für Kunstlicht durch die Wahl eines geeigneten Leuchtmittels sowie einer optimierten Tageslichtnutzung. Dies lässt sich am besten mit außenliegenden Lamellenbehängen realisieren, die sonnenstandsge-regelt sind und optimalerweise über eine Tageslichtlenkfunktion verfügen.

- 2) Dies geht einher mit einem optimalen sommerlichen Wärmeschutz, um Kühlbedarf zu vermeiden. Unterstützt wird dies durch freiliegende thermische Speichermasse in Kombination mit Nachtauskühlung. Bei den Untersuchungen zum akustischen Komfort zeigte sich, dass nicht zwingend die gesamte Decke mit Schallabsorbern bedeckt sein muss, um gute Nachhallzeiten zu erwirken.
- 3) Den Einsatz einer CO₂-armen Wärmeerzeugung. Die Wärmeübergabe sollte durch schnell reagierende Übergabesysteme erfolgen, da bei trägen Systemen die Gefahr der Überhitzung in den Übergangszeiten besteht.
- 4) Eine gute Luftqualität lässt sich allein durch Fensterlüftung schwer herstellen. Allerdings zeigt die Auswertung des subjektiven Nutzerbefindens, dass die Luftqualität bei mechanisch belüfteten Schulen in der Regel als schlecht empfunden wird. Optimal wäre deshalb eine kontrollierte natürliche Lüftung. Fällt die Wahl dennoch auf eine mechanische Lüftung fällt, ist eine Minimierung des Hilfsenergiebedarfs der maschinellen Lüftung anzustreben. 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.

Die Übertragbarkeit dieser Prinzipien wurde in einem kontinuierlichen iterativen Planungsprozess zwischen dem Architektur- und dem Ingenieurbüro auf die neue Waldorfschule getestet und weitestgehend umgesetzt.

Aufgabenstellung und Umweltrelevanz

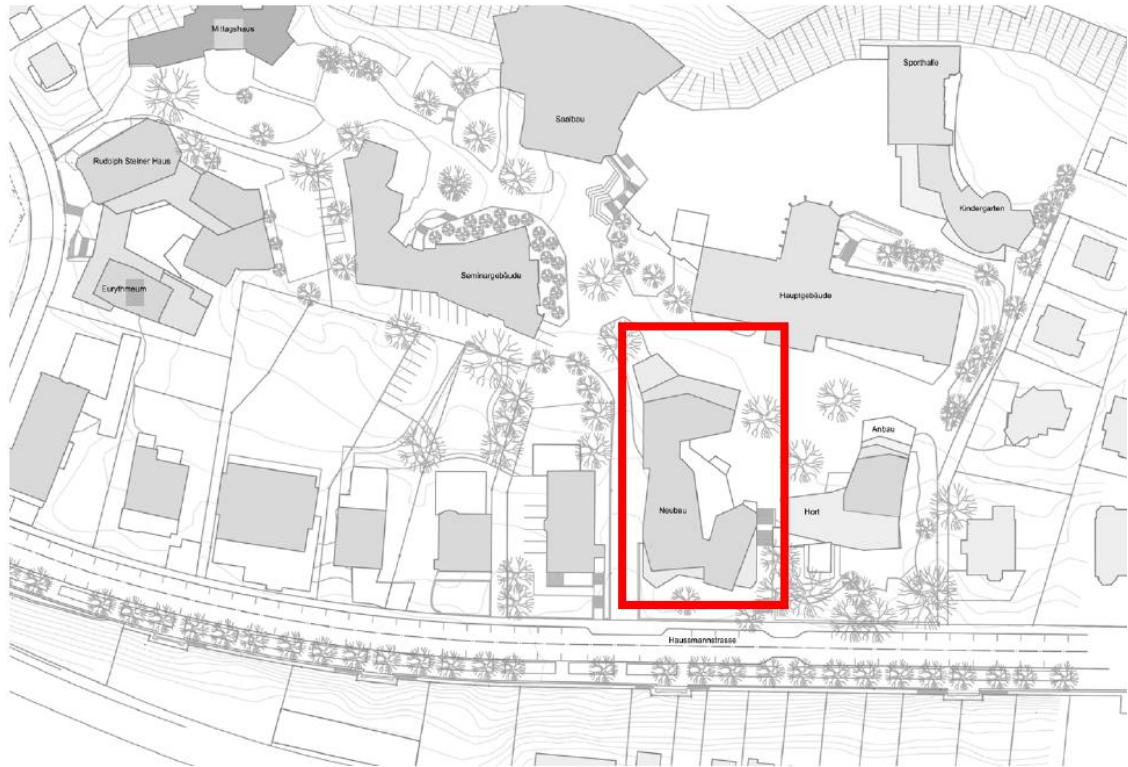


Abbildung 1: Lageplan

Der Neubau des Oberstufengebäudes der Waldorfschule in Stuttgart wurde in einem integralen Planungsprozess bearbeitet. Dabei arbeiteten 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. Die Erkenntnisse aus dem parallel laufenden Forschungsprojekt flossen dabei konsequent in die Planung mit ein.

Gleichzeitig wurde ein architektonisch ansprechendes und angemessenes Gebäude geschaffen. Städtebaulich wird der Neubau, bedingt durch die Hügellage, zum einen das neue Gesicht der Waldorfschule zur Stadt hin, zum anderen wirkt es zum Innenhof hin nicht zu prominent und verschärft die beengte Situation nicht noch weiter.

Architektonisch fügt es sich harmonisch in das bestehende Gesamtensemble ein, dennoch hat es einen Ausdruck, welcher der Anthroposophie zugewandten Waldorfschule auch ästhetisch-künstlerisch auf eine zeitgenössische Weise gerecht wird.

Die Maßnahmen zur Energieeffizienz wurden auf diese Weise 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 (eingesparte Kosten können für PV herangezogen werden)
- Nutzung von lokalen Wärmequellen durch das bestehende BHKW
- großflächige Integration von Photovoltaik in der Dachlandschaft

Folgende Voraussetzungen für die Erfüllung des energetischen Standards wurden dabei identifiziert:

- Minimierung von Emissionen (z.B. VOCs) durch geeignete Materialauswahl bei gleichzeitiger Reduzierung des erforderlichen Luftwechsels
- Funktionalität der hybriden Lüftung (aktive Überstromöffnungen)
- Aktiver, informierter Nutzer für den korrekten Gebäudebetrieb

Der Planungsprozess wurde von Anfang an begleitet von dynamischen Simulationsrechnungen mit denen die Effizienz verschiedener Maßnahmen quantifiziert wird und der Nutzerkomfort in den Schulräumen nachgewiesen wird. Der Gebäudeentwurf unterstützt

durch seine entsprechende Form beispielweise eine natürliche, wind- und thermisch angetriebene Belüftung, gleichzeitig wurde die Fassadengestaltung auf eine optimierte Nutzung von blendfreiem Tageslicht optimiert. Die weitgehend natürliche Be- und Entlüftung der Schule wurde 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 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 natürliche Vorkonditionierung der Zuluft erfolgt über ein Erdkanalsystem und tritt im Atrium aus. Im Winterfall sowie im Sommerfall (tagsüber) wird die Zuluft durch das Erdreich vorerwärmt bzw. vorgekühlt. Aktive, sprich mechanisch betriebene Überströmelemente im Türbereich der Klassenzimmer befördern die Luft aus dem Atrium in die jeweiligen Unterrichtsräume (hybride Lüftung). Über horizontale Fensterstreifen als Klappen in der Fassade strömt die Luft aus den Klassenzimmern ab. Im Vergleich zur normalen Fensterlüftung kann somit ein hoher Komfort gewährleistet werden, da Kaltluftabfall im Winter und hohe Zulufttemperaturen im Sommer durch Fensteröffnen vermieden werden.

Eine Richtungsumkehr der Lüftung ergibt sich im Sommerfall (nachts) und in der Übergangszeit: dann dient das Atrium als Kamin und ermöglicht eine natürliche Querlüftung der Klassenräume. Diese Richtungsumkehr wird mittels einer motorischen Klappe bewerkstelligt. Das Zusammenspiel gilt es zu entwickeln, so dass eine kostengünstige, robuste Lösung erzielt wird. Dieses System trägt dem Anspruch des Bauherrn Rechnung, einerseits eine hohe Energieeffizienz für das Gebäude zu erreichen, gleichzeitig jedoch den Aufwand an technischen Anlagen zu begrenzen. Eine mechanische Lüftungsanlage wird nur in der Küche und im Speisesaal umgesetzt.

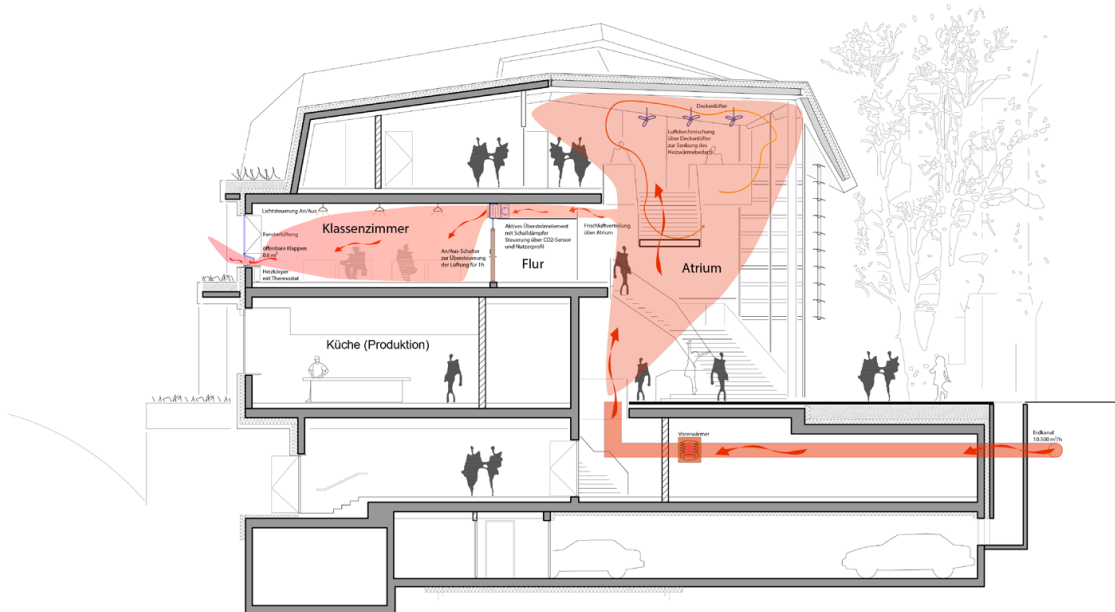


Abbildung 2: Energiekonzept im Winter

Als Wärmeübergabesystem sollen statische Heizflächen mit thermostatischer Regelung realisiert werden. Diese reagieren schnell auf die im Schulbetrieb auftretenden wechselnden Lastanforderungen. 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.

Der sommerliche Wärmeschutz soll ausschließlich über passive Maßnahmen realisiert werden, ein aktives Kühlsystem ist nicht vorgesehen. Dies geschieht unter Einsatz der thermischen Masse in Verbindung mit Nachtlüftung sowie einem effizienten außenliegenden Sonnenschutz.

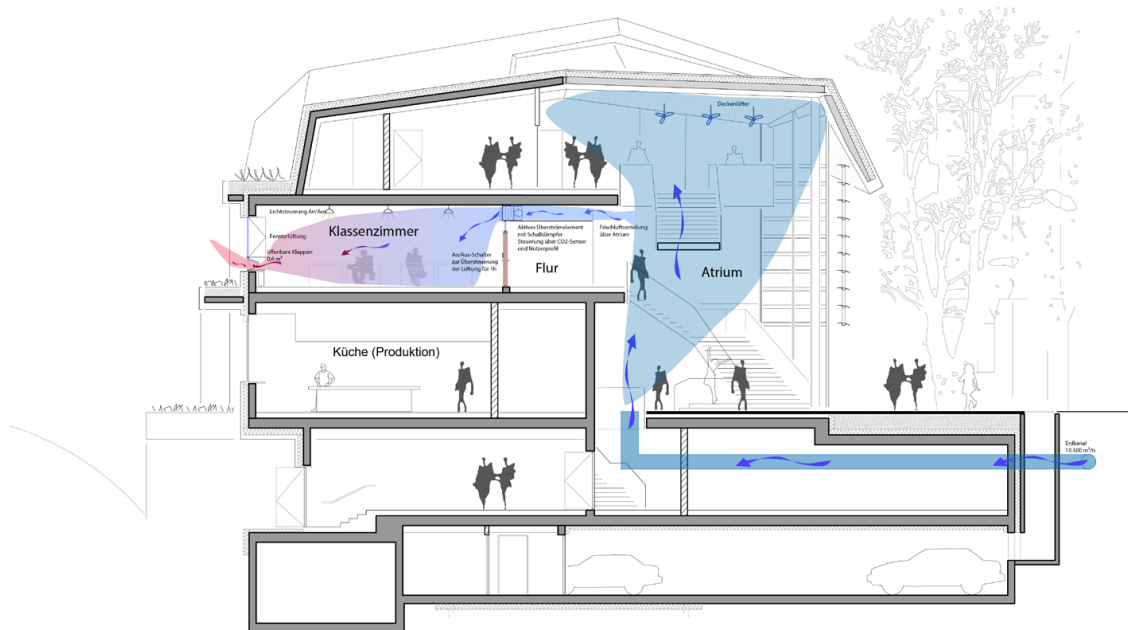


Abbildung 3: Energiekonzept im Sommer / Tag

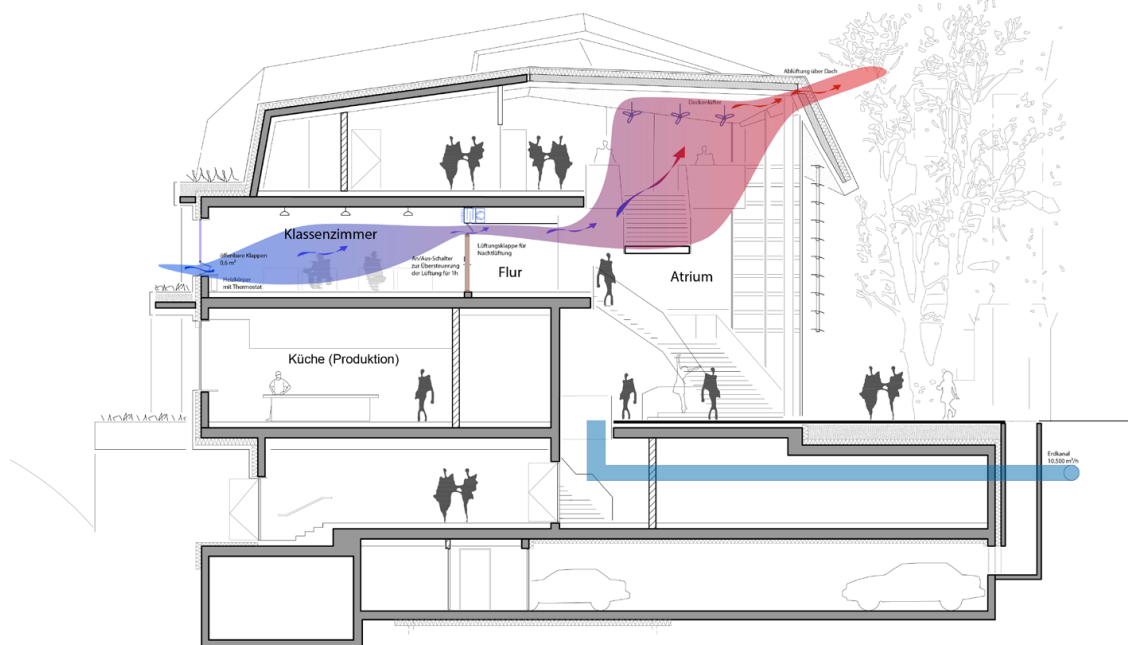


Abbildung 4: Energiekonzept im Sommer / Nacht und in der Übergangszeit

In einzelnen Gebäudebereichen wie dem Atrium oder dem Speisesaal kommen große Deckenventilatoren zum Einsatz, die durch eine Erhöhung der Luftbewegung den Aufenthaltskomfort erhöhen.

Die Dachlandschaft mit 456 m² wird flächendeckend mit Photovoltaikmodulen besetzt. Die Finanzierung dieser großen Fläche an PV ist zum Großteil durch die Einsparungen durch den Verzicht der mechanischen Lüftungsanlage möglich.

Der Energiebedarf und daraus resultierend der Primärenergiebedarf für das gesamte Gebäude wurde aus dem thermischen Model ermittelt. Dabei wurden Energiebedarfs-werte mit den Primärenergiefaktoren von 1,8 für Strom und 0,88 für Wärme aus dem Nahwärmenetz angesetzt.

Die Primärenergiebilanz ist in Abbildung 5 dargestellt.

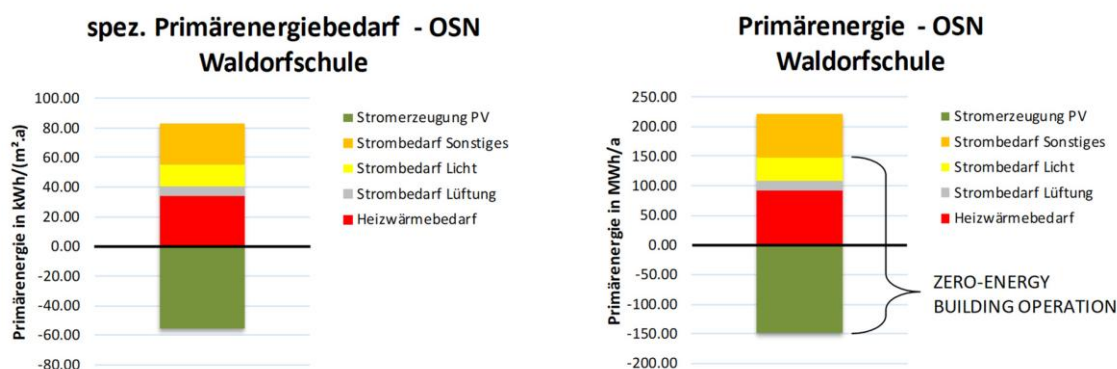


Abbildung 5: Primärenergiebilanz des Gebäudes [2]

Die Ergebnisse zeigen, dass der Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb ohne Nutzerstrom (unter Sonstiges angegeben) durch die Stromerzeugung des PV-Dachs abgedeckt werden kann. [2]

2. Forschungsschwerpunkte und Zielsetzung

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollen folgende Schwerpunkte analysiert und evaluiert werden:

2.1 Anforderungen an die aktiven Überströmelemente

Eine gute Luftqualität ist in Schulen essentiell. Durch die hohen Belegungsdichten in Klassenzimmern steigt die CO₂-Konzentration bei unzureichendem Luftwechsel rasant an und erreicht Werte weit über den empfohlenen Grenzwerten der DIN 13779. Allerdings zeigen die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt, dass dies ausschließlich in der kalten Jahreszeit problematisch ist. Überschreitungen der CO₂-Konzentration in der warmen Jahreszeit konnten nicht festgestellt werden. Das bedeutet, dass es zumindest im Winter nicht ausreicht, lediglich eine Fensterlüftung für die Nutzer anzubieten, da sie in diesem Fall nicht bzw. zu selten zum Einsatz kommt.

Beim Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage hingegen werden die Grenzwerte durchgehend eingehalten. Allerdings führt die Entscheidung für eine solche Lösung zu negativen Konsequenzen auf anderen Ebenen. Zum einen braucht eine Lüftungsanlage sehr viel Platz, sowohl für die Lüftungszentrale als auch für die Leitungsführung. Dies geht einher mit einem sehr hohen Investitions- und Instandhaltungsaufwand. Im Anbetracht des Zustands unserer öffentlichen Gebäude ist es demnach mehr als fraglich, ob die notwendigen Wartungsarbeiten (Filterwechsel, Leitungsreinigung, etc.) dieser Technik wie erforderlich durchgeführt werden. Weil davon nicht auszugehen ist, ist die nächste Konsequenz, dass der Energieverbrauch deutlich höher ausfallen wird, als es die Simulationsergebnisse bzw. Berechnungsverfahren vorgeben. Außerdem zeigen Analysen aus Nutzerbefragungen, dass die Luftqualität subjektiv deutlich schlechter wahrgenommen wird, als es die Messwerte versprechen.

Aus diesen Gründen entschied man sich beim Neubau der Waldorfschule auf eine mechanische Lüftungsanlage zu verzichten und stattdessen Lösungswege für eine kontrollierte, natürliche (hybride) Lüftung zu suchen. Außerdem war es auch Wunsch des Bauherrn, ein passives, robustes, aber klimatisch und hygienisch angenehmes Raumklima

zu schaffen. Wie vorab beschrieben ist der gewählte Lösungsweg, eine Vorkonditionierung der Zuluft mittels eines Erdkanals zu erreichen. Die frische Luft gelangt als erstes in das zentrale Atrium der Schule. Aktive Überströmöffnungen bringen die Luft im Türbereich in die jeweiligen Klassenzimmer. Diese Lösung wird in der Form erstmalig umgesetzt und stellt die Verantwortlichen vor die Herausforderung, im Planungsprozess die unterschiedlichsten Anforderungen dieses Systems vertieft zu bearbeiten und zu verifizieren. Zum einen soll eine Richtungsumkehr der Lüftung mittels motorischer Klappe in das System der Überströmöffnungen integriert werden (vorab beschrieben). Zum anderen werden die Konzepte Induktionslüftung und Quellsüftung gegeneinander abgewogen: Ein Zuluftelement oben in der Trennwand angebracht erfordert eine Induktion, um Zugerscheinungen zu vermeiden (erhöhter Druckverlust). Bei einer Quellsüfteinbringung hingegen, wird die Luft vertikal in der Trennwand nach unten geführt (Gefahr der Schallschutzreduzierung) und unten der Auslass angebracht. Aufgrund der sommerlichen Lüftungsrichtung muss die Luft jedoch oben entnommen werden. In einem Mockup sollen diese Anforderungen getestet werden. Die Erkenntnisse dienen dem Planungsteam als wichtige Vorbereitung für die Ausschreibung der Überströmelemente.

Schall

Um den Unterricht auch bei konzentriertem Arbeiten nicht zu stören, darf der Ventilator möglichst wenige Schallemissionen produzieren. Auch die Schalltransmission aus dem Atrium, in dem sich immer Menschen aufhalten werden, muss verhindert werden. Eine Quellsüfteinbringung in das Klassenzimmer würde eine vertikale Luftführung innerhalb der Trennwand (zum Atrium hin) erfordern und somit riskieren den Schallschutz zu reduzieren.

Luftmenge

Um die Räume mit ausreichend frischer Luft zu versorgen, muss die notwendige Luftmenge je aktiven Elements definiert werden. Es müssen Entscheidungen getroffen werden, ob ein einfacher und deshalb weniger komplexer Lüfter ausreicht, oder ob es sinnvoller ist, einen Zeit- und CO₂-gesteuerten Lüfter zu installieren.

Brandschutz

Die strengen Anforderungen an den Brandschutz müssen unter allen Umständen eingehalten werden.

Architektonische Integration

Wie und wo kann die Einheit integriert werden, um sowohl technischen als auch gestalterischen Ansprüchen zu genügen? Gibt es eine bauliche Maßnahme durch Wandversprünge? Wird das Gerät über dem Türstock oder an einer anderen Stelle der Trennwand integriert?

Um Antworten auf diese Fragestellungen zu erhalten, ist ein Mockup des betreffenden Ausschnitts im Maßstab 1:1 zu bauen. Dort können verschiedene Geräte auf die oben genannten Punkte durch Messuntersuchungen (Luftmenge / Schallpegel) getestet werden. Das Mockup ist von seinen Abmessungen so zu gestalten, dass am Mockup auch die in AP 2 genannten Materialuntersuchungen durchgeführt werden können.

2.2 Nachhaltigkeit

Im Forschungsprojekt „Zukunftsfähiger Schulbau“ kommen die Wissenschaftler zu dem Schluss, dass die Hauptkriterien für nachhaltige Architektur, neben energetischen Aspekten, sowohl die architektonische Qualität, als auch die verwendeten Materialien im Innenraum darstellen. Weitere müssen zwingend für Robustheit, Qualität und Langlebigkeit stehen. Schulen sind ein architektonischer Typus, der besonders anfällig für einen schwer fassbaren Abnutzungsprozess ist.

Der hohe Anspruch des Bauherrn an die einzusetzenden Innenraummaterialien geht über das Maß der Robustheit hinaus. Neben der erforderlichen Langlebigkeit sollen sie auch über geringe Geruchsemissionen und Schadstoffbelastungen (VOCs) verfügen. Durch eine Reduzierung dieser Emissionen ist es gleichzeitig möglich den Luftwechsel zu reduzieren, da weniger Luftbelastungen abgeführt werden müssen. Somit hat auch

der Aspekt der ausgewählten Innenausbaumaterialien Einfluss auf den Energieverbrauch. Die Materialien müssen darüber hinaus selbstverständlich auch den gesetzlichen Anforderungen entsprechen (Vorschriften zur brandschutztechnischer Ausstattung, Schulbaurichtlinien, etc.). Diese Fragestellungen betreffen alle Bauteile des Innenausbaus (Wände, Decken, Böden). Für die Materialuntersuchungen wurde auch hier das gebaute Mockup herangezogen. Zusätzlich wird die Betrachtung auf die Lebenszykluskosten (LCC) sowie auf grundlegende Aspekte der ökobilanziellen Bewertung (LCA) des gebauten Gebäudes gelegt.

2.3 Innovationscharakter

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die im interdisziplinären Forschungsprojekt „Zukunftsfähige Schulen“ entwickelten Lösungsansätze, die an der Waldorfschule Uhlandshöhe angewendet wurden, in der Umsetzung zu begleiten und zu dokumentieren. So konnte erreicht werden, die klimatischen und akustischen Herausforderungen auch architektonisch und gestalterisch zu lösen. Der Innovationscharakter dieses Forschungsprojekts besteht darin aufzuzeigen, dass eine freie architektonische Sprache auch ohne eine sehr hohe technische Gebäudeausrüstung gezielt Herausforderungen klimatischer und technischer Art lösen kann und dennoch - auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten - ein Nearly Zero Energy Standard erreicht werden kann. Dabei ist hervorzuheben, dass dieser Wert in der Energiebilanz der Schule trotz der fehlenden Wärmerückgewinnung (auf Grund der Entscheidung für eine natürliche Lüftung) erreicht werden kann. Durch den Verzicht auf eine mechanische Lüftungsanlage können immense Kosten eingespart werden, die in die Photovoltaikmodule investiert werden können. Durch ihre Stromerzeugung kann der resultierende Primärenergiebedarf auf ein Minimum reduziert werden. Auch die Wartungskosten, die solche Systeme mit sich bringen, werden dadurch eingespart. Die aktiven Überströmelemente zur Unterstützung der hybriden Lüftung spielen dabei genauso eine wichtige Rolle, wie die zu verwendenden, emissionsarmen Materialien des Innenausbaus.

2.4 Arbeitspakete und Darstellung des Lösungswegs

Das Forschungsprojekt ist in fünf Arbeitspakete untergliedert:

AP 1:

Mockup für die aktive Überströmung (WD/TUM/TS/BA)

Kernthema der Waldorfschule Uhlandshöhe ist das zentrale Atrium als Herz und Lunge des neuen Schulgebäudes. In Bezug auf das Thema der natürlichen Lüftung wird in ihm die Luft vorerwärmt und durch aktive Überströmelemente im Türbereich in die Klassenzimmer eingebracht.

Um die genauen Anforderungen an dieses Element zu überprüfen, ist ein Mockup (realitätsgetreuer Ausschnitt des betreffenden Bereichs als 1:1-Modell) zu bauen. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die 3 wichtigsten Parameter ziehen:

- 1) die notwendige Luftmenge
- 2) Schallemissionen/ Schalltransmissionen
- 3) die architektonische Integration

Das Mockup ist von Anfang an so zu bauen, dass ein gewisser Abschnitt der benachbarten Zonen, in dem Fall Atrium und Klassenzimmer, mit abgebildet werden. In diesen Bereichen können die in AP 2 beschriebenen Materialuntersuchungen vorgenommen und durchgeführt werden.

Ergebnisse:

- Bau des Mockups
- Definition der Anforderungen an das aktive Überströmelement aus den Untersuchungen als Vorbereitung für die Ausschreibung
- Koordinationsleistung

AP 2:

Untersuchungen zu einer angemessenen, emissionsarmen Materialität im Schulbau (WD/TUM/BA)

Neben der erforderlichen Langlebigkeit spielen auch geringe Geruchsemissionen und Schadstoffbelastungen eine wichtige Rolle: Die Materialien des Innenausbaus müssen neben einer hohen Robustheit selbstverständlich auch den gesetzlichen Anforderungen entsprechen (Vorschriften zur brandschutztechnischer Ausstattung, Schulbaurichtlinien, etc.). Diese Fragestellungen betreffen alle Bauteile des Innenausbaus (Wände, Decken, Böden). Für die Materialuntersuchungen, die in enger Abstimmung mit dem Bauherrn erfolgen, soll auch hier das gebaute Mockup herangezogen werden. Neben der Untersuchung der Materialität erfolgt eine Betrachtung der Lebenszykluskosten sowie grundlegende Aussagen zur ökobilanziellen Bewertung des gebauten Projekts.

Ergebnisse:

- Aussagen zu Ausbaumaterialien in Bezug auf Robustheit, Emissionen (VOCs), Schadstoffe etc.
- Grundlegende Aussagen zur ökobilanziellen Bewertung sowie Lebenszykluskosten des gebauten Projekts
- Raumakustik: Kompromiss zwischen thermischer Masse und Schallabsorption i.V.m. unterschiedlichen Anforderungen (Schulbaurichtlinien, Anforderungen durch Inklusion, etc.)
- Dokumentation der Ergebnisse

AP 3:

Monitoring und Betriebsoptimierung (TUM/TS)

In einer zweijährigen Monitoringphase (nach dem ursprünglichen Projektplan) soll sowohl der Energieverbrauch als auch die Aufenthaltsqualität des Gebäudes gemessen werden. Durch die Erfassung der realen Verbräuche kann einerseits die Prognose der Simulationsergebnisse abgeglichen werden, außerdem lässt sich durch das Aufdecken

von fehlerhaften Einstellungen das Haustechniksystem optimieren. Messungen in Bezug auf Tageslicht, thermischen Komfort und CO₂-Konzentration zeigen das bauklimatische Verhalten des Gebäudes auf. Eine Nutzerbefragung über das subjektive Empfinden ergänzt die gemessenen Daten.

Hinweis: Diese Kampagne konnte aufgrund von längeren Bauzeitverzögerungen nicht wie ursprünglich geplant durchgeführt werden. Die Fertigstellung des Gebäudes sollte ursprünglich im November 2019 erfolgen. Der Bezug der Schule durch Schülerinnen und Schülern konnte erst gegen April des Jahres 2022 erfolgen. Die Monitoringphase wurde daher abgewandelt und mit Änderungen bezüglich der ursprünglichen Kampagne in begrenztem Umfang durchgeführt. Das bedeutet, um dennoch grundlegende Basisdaten aus Sommer- und Winter-Monaten auswerten zu können, wurde ein Basismonitoring auf etwa ein Jahr festgelegt, sodass das Projekt schließlich Ende Juli 2023 abgeschlossen werden konnte.

Ergebnisse:

- Erstellung des Monitoringkonzepts
- Auswertung der erhobenen Messdaten
- Grundlegende Ermittlung des bauklimatischen Verhaltens
- Dokumentation der Ergebnisse

AP 4:

Pädagogische Integration des Nachhaltigkeitskonzepts (WD/TUM/BA)

Ein Baustein im pädagogischen Konzept der Waldorfschule ist es, dass die Schülerinnen und Schüler ein Verständnis für ihre umgebende Lebenswelt entwickeln. Die TUM entwickelt gemeinsam mit den Pädagogen und den Architekten der Waldorfschule ein Konzept, das den Schülern die Grundprinzipien von Aufenthaltsqualitäten und Ressourcenverbrauch anhand ihres neuen Schulgebäudes näherbringt. Das Funktionsprinzip, dessen Besonderheit das Zusammenspiel von Architektur und reduzierter Gebäudetechnik darstellt, soll den Schülerinnen und Schülern vermittelt werden. Darüber hinaus sollen

direkt erlebbare Erfahrungen für die Schülerinnen und Schüler, wie sie als aktive, informierte Nutzer direkt Einfluss auf das bauklimatische Verhalten, den Gebäudebetrieb und den Energieverbrauch haben in die Überlegungen miteinfließen.

Ergebnisse:

- Erstellung von Themenschwerpunkten zur pädagogischen Integration des architektonischen Konzepts zur Verständnisentwicklung der Schülerinnen und Schüler bzw. Lehrerschaft bezüglich dem Zusammenwirken von Aufenthaltsqualität, Ressourcenverbrauch und Nutzerverhalten
- Formulierung von Leitgedanken hinsichtlich der pädagogischen Integration der Thematik
- Durchführung einer Vor-Ort-Veranstaltung zum technischen Konzept des Gebäudes sowie dessen Nachhaltigkeitsgedankens; Abhaltung einer Präsentation mit Diskussion und Workshop mit Lehrern, Schülerinnen und Schülern

AP 5:

Zusammenfassung der Ergebnisse und Abschlussdokumentation (TUM)

Dokumentation des Planungs- und Umsetzungsprozesses

Ergebnisse:

- Zusammenfassung der Ergebnisse
- Erstellung eines Abschlussberichts zum Projekt

Hinweis: Die Veröffentlichung der Inhalte wird nach Vereinbarung mit der DBU anhand eines Symposiums „Zukunftsfähiger Schulbau“ stattfinden. Die Ergebnisverbreitung erfolgt dabei über die Dokumentation des abgeschlossenen Symposiums über eine zu entwickelnde Website, welche die Inhalte der gehaltenen Präsentationen und Interviews sowie die durch eine Agentur professionell gefilmten und medial aufbereiteten Vorträge zur Verfügung stellt.

3. Mockup

Das Arbeitspaket 1 berichtet über den Aufbau des Mockups. Dieses wurde von Anfang an so gebaut, dass ein gewisser Abschnitt der benachbarten Zonen, in dem Fall Atrium und Klassenzimmer, mit abgebildet wurden. Die Definition der Anforderungen an das aktive Überströmelement aus den Untersuchungen erfolgte als Vorbereitung für die Beschreibung.

Dieser Abschnitt ist ein Auszug aus dem Bericht zum Lüftungsmockup [3].

3.1 Beschreibung des Lüftungs- und Energiekonzeptes Uhlandschule

Dem Bauherrn wird ein Lüftungs- und Energiekonzept vorgeschlagen, das einerseits zu einer hohen Aufenthaltsqualität in Bezug auf die Luftgüte, Tageslichtverfügbarkeit und den thermischen Komfort, andererseits aber gleichzeitig auch zu einem niedrigen Primärenergiebedarf führt.

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 rd. 180 Personen Platz. Außerdem werden innenliegende UG Räume mit Sondernutzungen über eine mechanische Zu- und Abluftanlage gelüftet. WC- und Sanitärräume verfügen über eine mechanische Abluftanlage.

Für die Klassen und Aufenthaltsräume wird eine mechanisch unterstützte natürliche Lüftung vorgeschlagen. Dabei wird eine aktive Luftüberströmung aus dem Foyer und dem Ablüften über die Fassade eingesetzt. Die Luft wird in dem Foyer vorkonditioniert bevor sie in die Nutzungsbereiche der Klassenräume gelangt und der Komfort im Vergleich zu einem klassischen Ansatz optimiert. Eine flächendeckende zentrale mechanische Lüftung wird aufgrund des hohen Raumbedarfs für ein Zentralgerät, für die Lüftungskanäle

und der unflexiblen Steuerungsmöglichkeit nicht näher in Betracht gezogen. 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.

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 für die wichtigsten Bereiche wird in den folgenden Abbildungen beschrieben. 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: n50-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

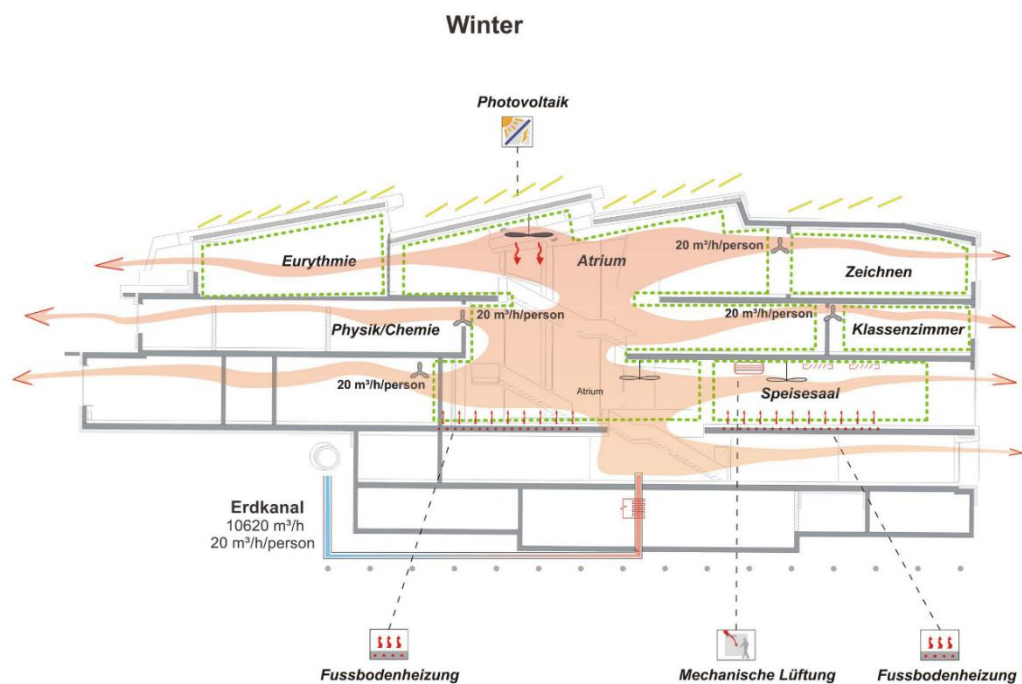
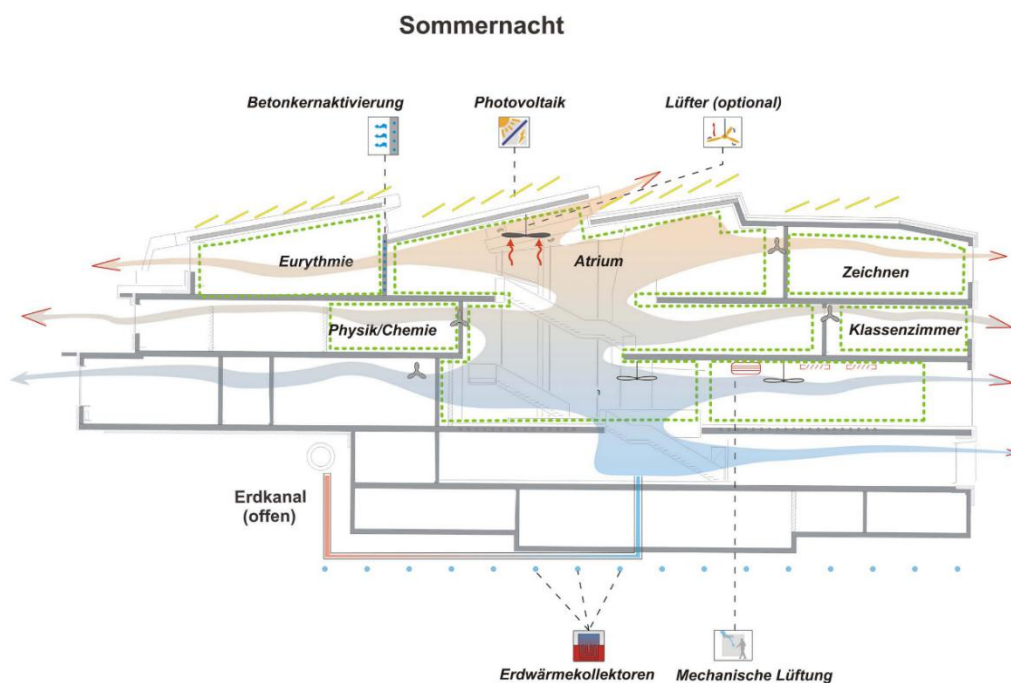
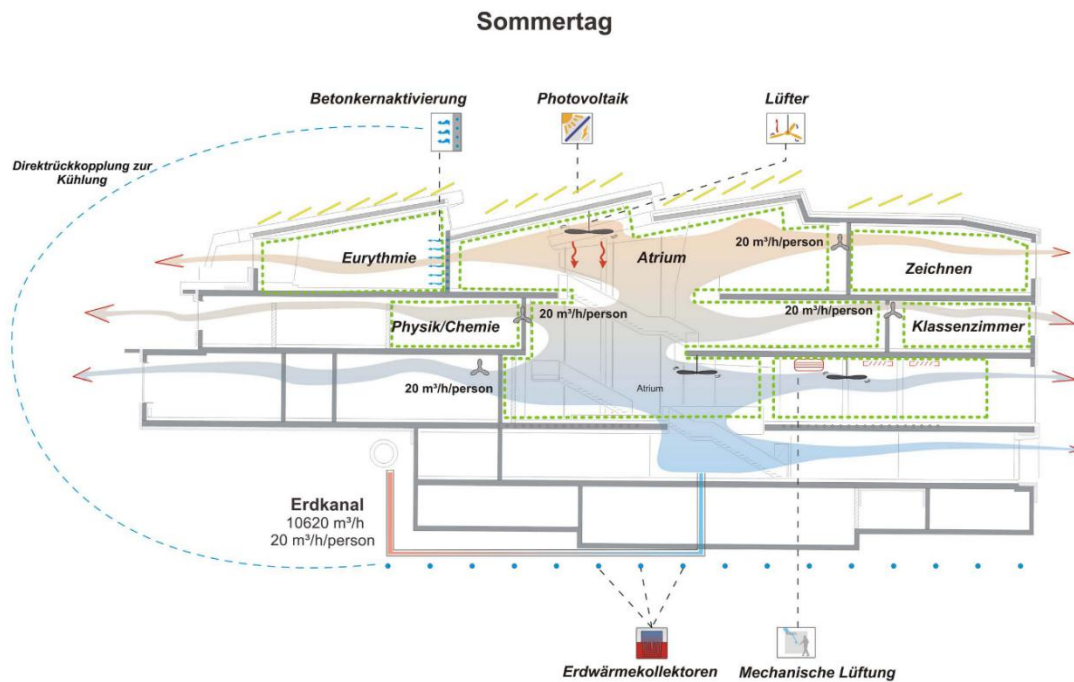


Abbildung 6: Konzept Winter



Im Folgenden ist in den Grundrissen das jeweilige Raumkonzept dargestellt. Durch die Pfeile und Ventilatoren ist ersichtlich welcher Raum natürlich belüftet wird und in welchem Raum sich ein Überströmelement oder eine mechanische Lüftungsanlage befindet. Zudem sind die Räume entsprechend der Nutzungstypen in unterschiedlichen Farben gekennzeichnet.

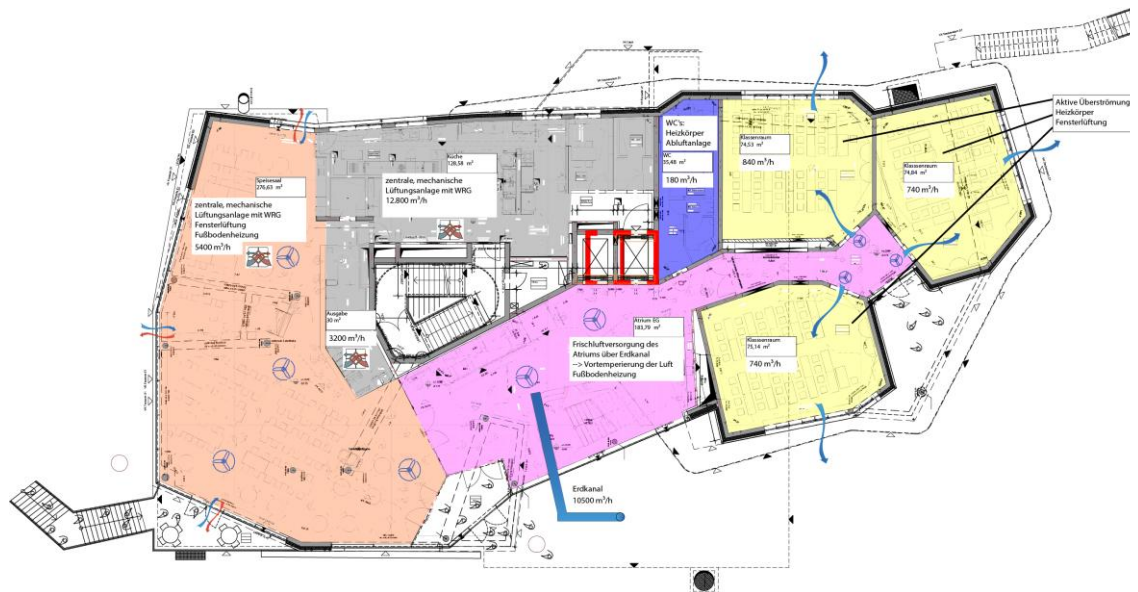


Abbildung 9: Energie- und Lüftungskonzept EG

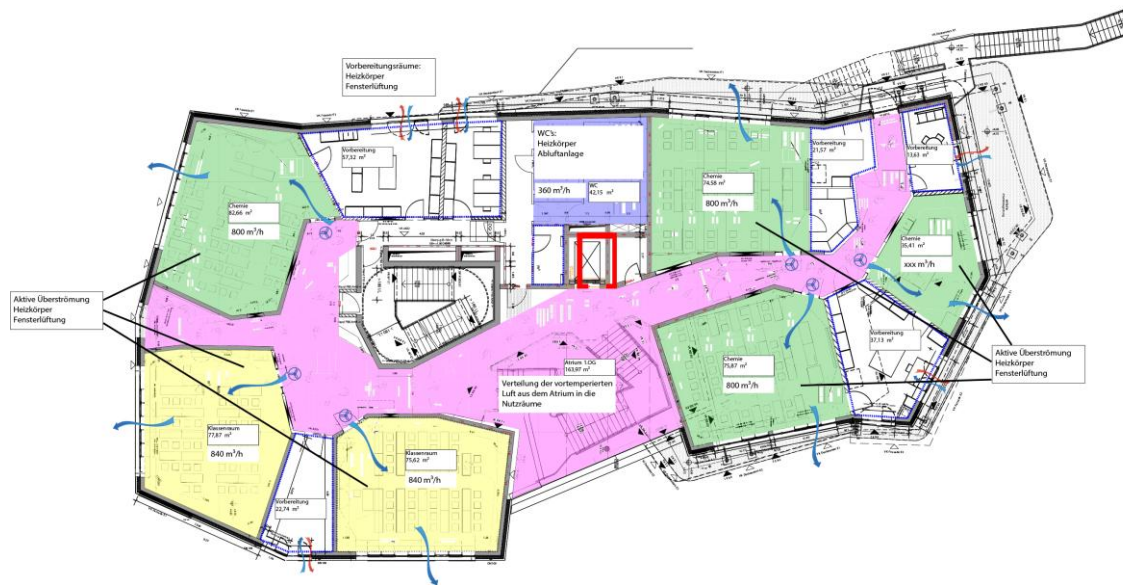


Abbildung 10: Energie- und Lüftungskonzept 1. OG

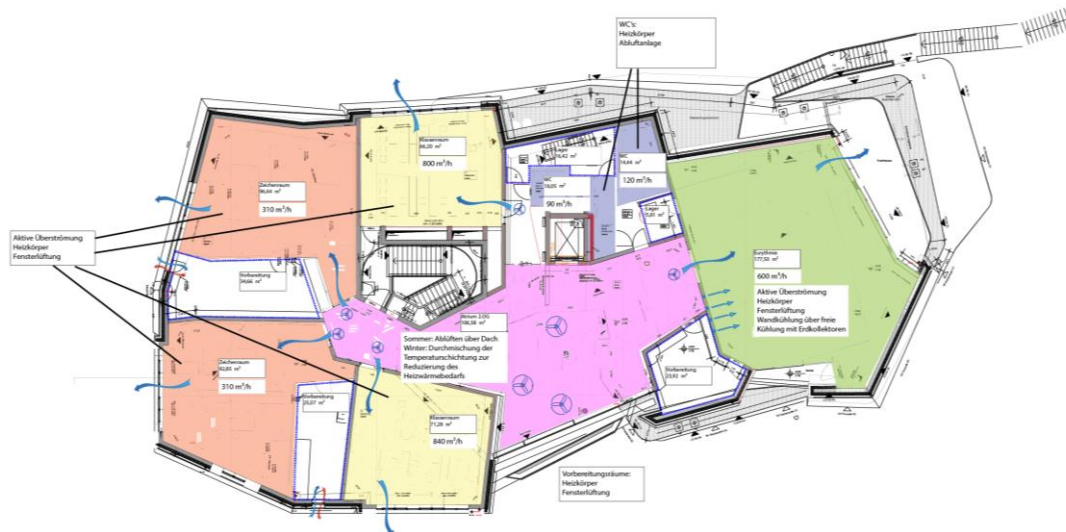


Abbildung 11: Energie- und Lüftungskonzept 2. OG

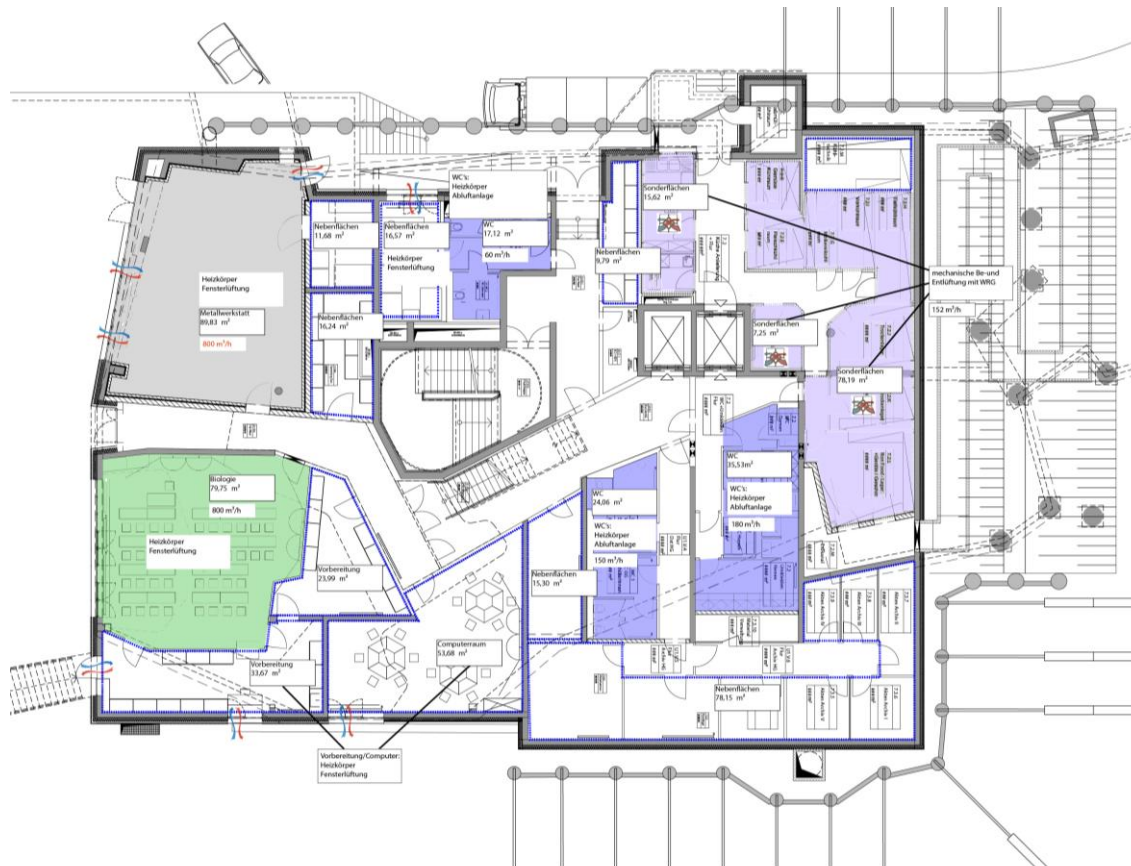


Abbildung 12: Energie- und Lüftungskonzept 1. UG

3.1.1 Lüftung der Klassenräume

Die Klassenräume, sowie die Fachräume haben öffnenbare 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, durch Überströmelemente in den Trennwänden, vorgesehen. 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.

Wie in Abbildung 14 dargestellt, soll die Zuluft im Winter aus dem Atrium über Kleinventilatoren in die Klassenräume transportiert und über die Fenster abgelüftet werden. Dazu werden Abluftfenster mit einem Öffnungssensor ausgestattet. Dem aktiven Überströmelement in der Trennwand zum Korridor wird bei offenem Abluftfenster die Freigabe erteilt. Um den Volumenstrom unabhängig von den Außenkonditionen 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, Öffnungsklappen oberhalb der Türen sind vorgesehen um den Raum über das Atrium abzulüften (siehe Abbildung 15). Geschossdecken werden zur Nutzung der thermischen Speichermasse weitgehend von Abhängungen oder Einbauten freigehalten. Eine Belegung mit akustisch wirksamen Materialien auf etwa 1/3 der Deckenfläche ist jedoch möglich. Für kleinere Büros und Arbeitsräume ist eine einseitige Fensterlüftung vorgesehen.

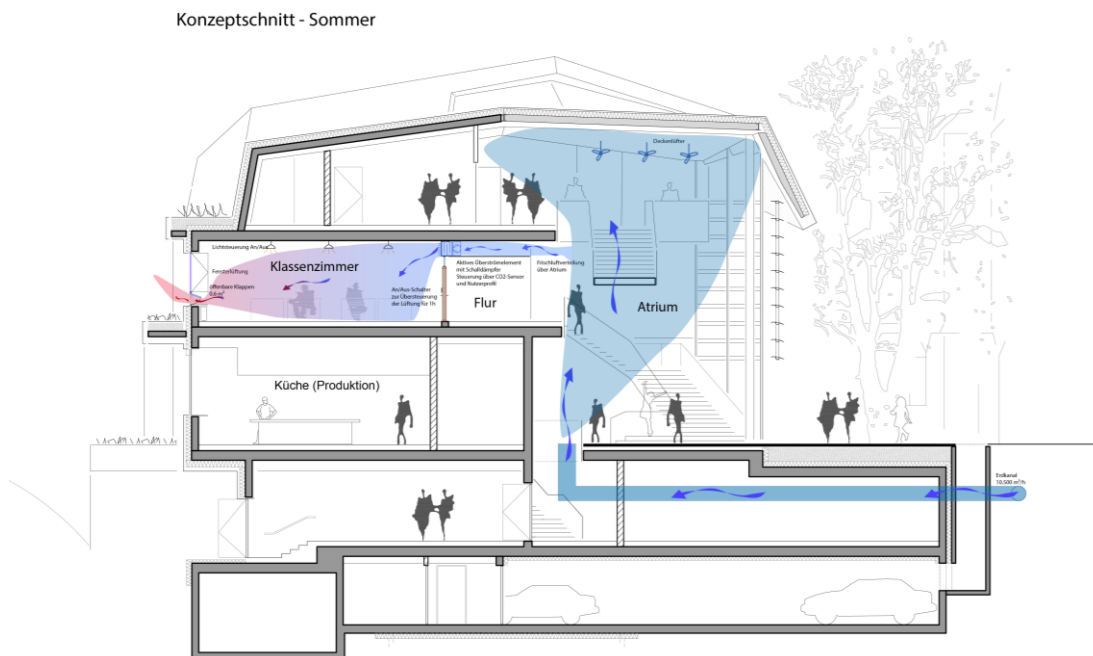


Abbildung 13: Konzeptschnitt Klassenraum - Sommer

Konzeptschnitt - Winter

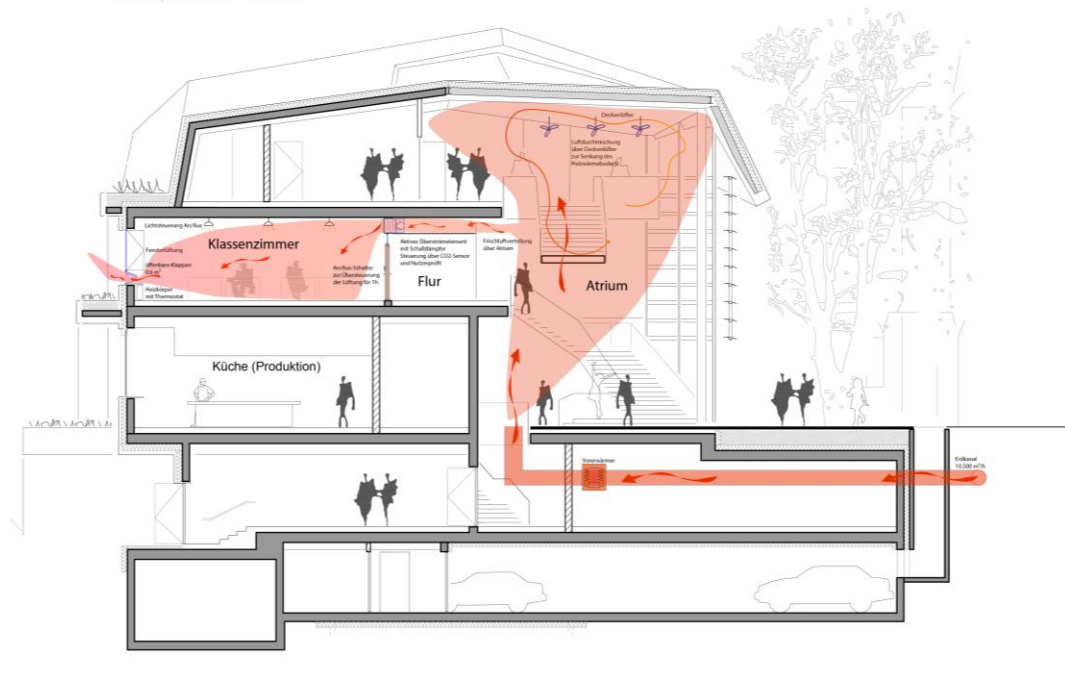


Abbildung 14: Konzeptschnitt Klassenraum - Winter

Konzeptschnitt - Nachtlüftung

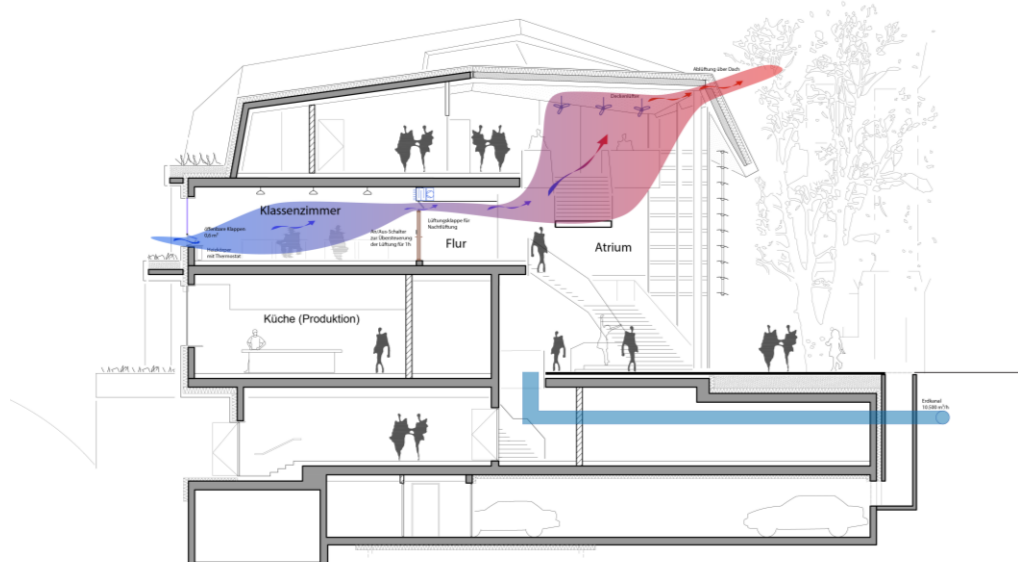


Abbildung 15: Konzeptschnitt Klassenraum - Nacht

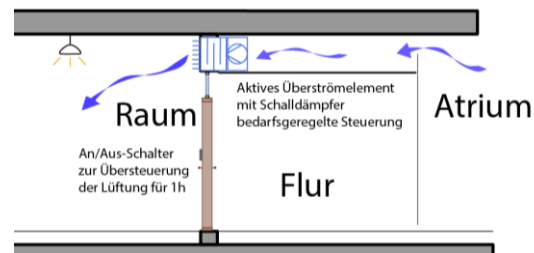


Abbildung 16: Komfortlüftungskonzept in der Trennwand (Frischlufte)

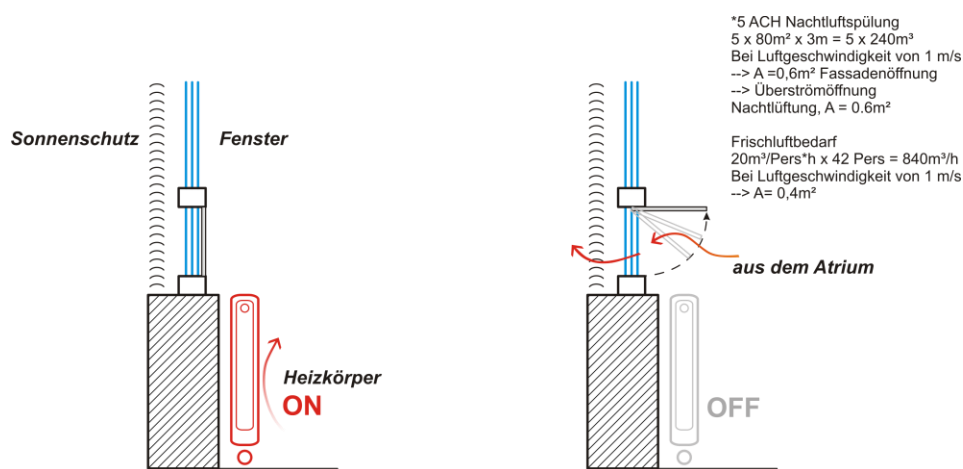


Abbildung 17: Lüftungskonzept in der Fassade

**Anmerkung: Die Berechnung der Öffnungsfläche ist nur ein Beispiel um das benötigte Minimum an freier Öffnungsquerschnitt zu definieren, welches bei einer geringen Luftgeschwindigkeit (1 m/s) eine natürliche Belüftung durch das komplett geöffnete Fenster erlaubt.*

3.1.2 Deckenlüfter im Foyer

Im Foyer wird ein Deckenlüftersystem 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, 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.

3.1.3 Heizung und passive Kühlung

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

3.2 Lüftungsanlage

In diesem Kapitel werden der Aufbau und die Konfigurationen des Mockups erläutert.

3.2.1 Bauweise

3.2.1.1 Funktionsweise

Für das Lüftungssystem sind zwei Funktionsweisen vorgesehen. Zum einen eine Taglüftung, wobei die vorkonditionierte Luft aus dem Atrium in das Klassenzimmer geleitet werden kann. Zum anderen die Nachtlüftung, bei der die kalte Außenluft, mithilfe der gekippten Fenster, durch das Klassenzimmer bis hin zum Atrium geleitet wird und so das gesamte Gebäude nachts gekühlt werden kann. Im Falle des Mockups existiert kein Atrium, dieses wird durch den Büroflur ersetzt, aber das Grundprinzip bleibt bestehen.

3.2.1.2 Konfiguration

Mit dem Mockup werden zwei mögliche Konfigurationen realisiert. Die Erste besteht aus nur einem Ventilator, welcher sowohl im Tag- als auch im Nachtlüftungsmodus gefahren werden kann, obwohl er die Luft nur in eine Richtung bewegen kann. Hierfür sind vier Klappen angebracht, welche jeweils zwei mögliche Strömungsöffnungen verschließen, um die Luft in die vorgesehene Richtung leiten zu können. Abbildung 18 zeigt die Stellung der Klappen und die Luftströmung im Falle der Taglüftung. Die Luft aus dem Flur wird angesaugt und nach dem Ventilator über einen Telephonie-Schalldämpfer in die Auslassbox geführt und weiter in das Büro geleitet.

Für die Zuluft ins Klassenzimmer sind die Schalldämpfer von Nöten um den Einlass akustisch vom Korridor zu entkoppeln und somit später keine Störgeräusche im Klassenzimmer zu verursachen.

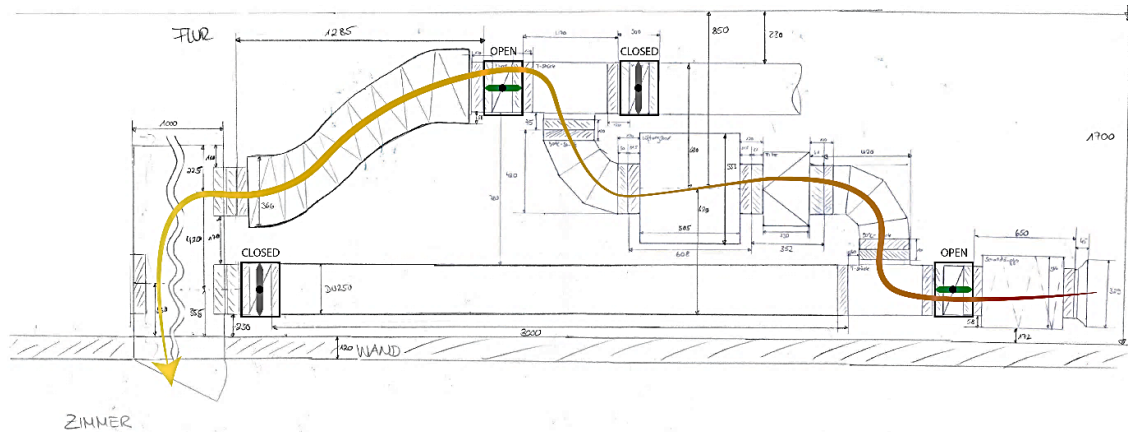


Abbildung 18: Zuluft mit einem Ventilator

Bei der Nachlüftung, siehe Abbildung 19, wird die Luft direkt von der Auslassbox durch die erste Öffnung geleitet, um 180°C, da von der hinteren geschlossenen Klappe gehindert, zum Ventilator geführt und anschließend in den Flur ausgeblasen.

Hierbei sind keine Schalldämpfer vorgesehen, da zum Einsatzzeitpunkt der Lüftung keine Anwesenheit besteht.

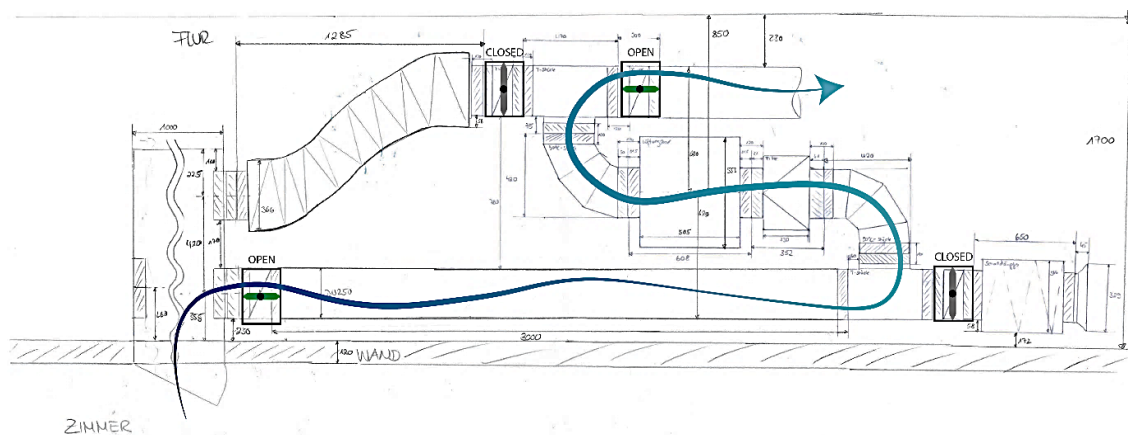


Abbildung 19: Abluft mit einem Ventilator

Variante mit zwei Ventilatoren

Die zweite zu realisierende Variante beinhaltet zwei Ventilatoren. Einen für die Taglüftung und einen für die Nachtlüftung. Für diese Variante sind nur zwei Klappen von Nöten und die Verzweigungen aus der Ersten Konfigurationen entfallen. Der Aufbau insgesamt ist deutlich schlanker, da nicht nur auf die Verzweigung verzichtet werden kann, sondern auch die Länge der Auslassbox halbiert wird. Auch hier wird die Luft aus dem Flur im Falle der Taglüftung angesaugt und über den Schalldämpfer in die Auslassbox geführt, siehe Abbildung 20.

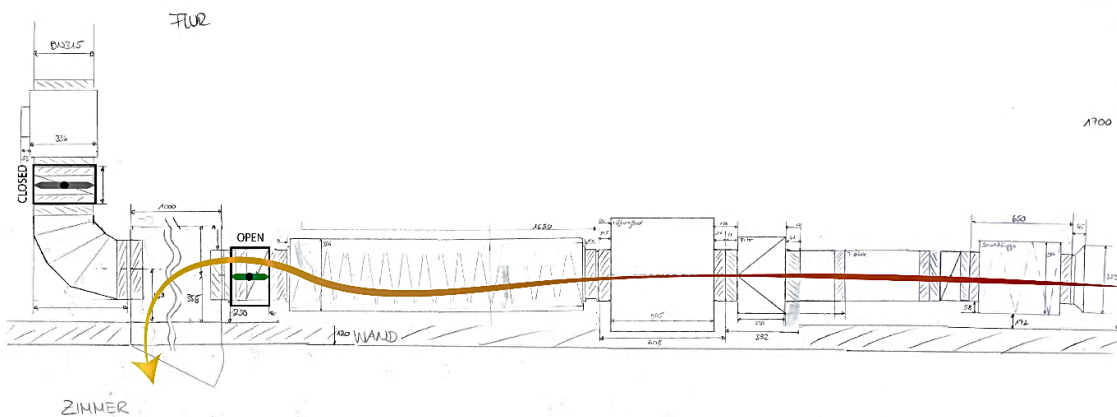


Abbildung 20: Zuluft mit zwei Ventilatoren

Im Modus Nachtlüftung wird die Luft über den zweiten Rohrventilator angesaugt, wobei die Klappe zum ersten Ventilator geschlossen bleibt.

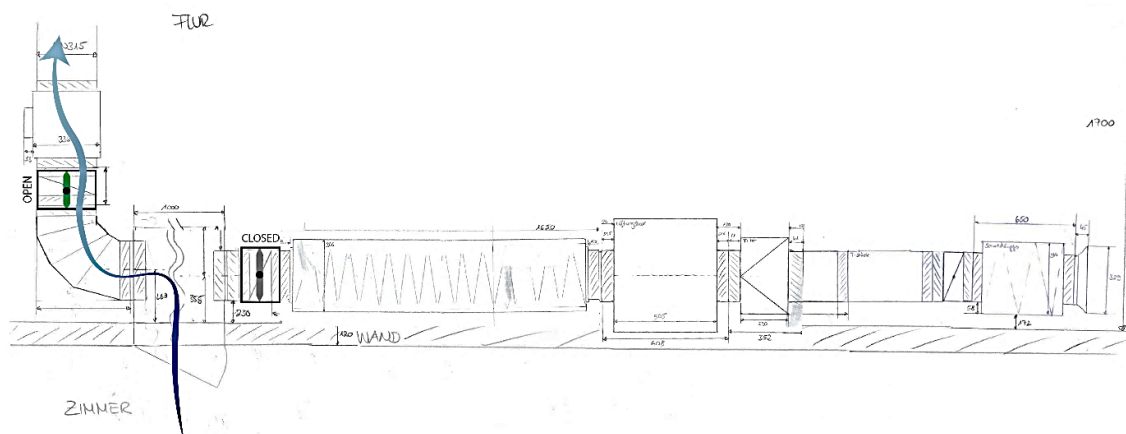


Abbildung 21: Abluft mit zwei Ventilatoren

Beide Varianten werden bezüglich Kosten, erreichten Strömungsgeschwindigkeiten, Energieeffizienz, sowie Schallemissionen verglichen.

3.2.1.3 Sinn und Zweck

Aufgabe dieses Versuches ist es, Möglichkeiten einer dezentralen Lüftungsanlage für Klassenräume zu prüfen. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Fragestellung ob es möglich ist, dass zu versorgenden Zimmer mit nur einem Ventilator zu be- und entlüften und ob dies eine sinnvolle Maßnahme ist, verglichen mit einer Variante mit zwei Ventilatoren.

3.2.2 Aufbau

3.2.2.1 Bauteilliste

Nachfolgend sind alle verwendeten Bauteile zur Realisierung des Lüftungsmockups aufgelistet.

Tabelle 1: Bauteilliste

Art	Beschreibung	Anzahl
Auslass	S&P Ansaugdüse TAD-250/435 - 8070402301	1
Auslass	S&P Gegenflansch FL-250/435-8070402220	1
Elektrik	Aderendhülsen 1,5	2
Elektrik	NYM-J 3G1,5 Grau	1
Elektrik	NYM-J 5G1,5 Grau	1
Elektrik	NYM-J 4G1,5 Grau	1
Elektrik	NYM-J 7G1,5	1
Elektrik	Schuko-Stecker	1
Elektrik	Wago Steckklemme 273-158	1
Elektrik	Wago-Klemme Kompakt	1
Elektrik	Kubiko Schalter WE	2
Elektrik	Kubiko Parallelschalter SE	1
Elektrik	Abzweigdose	4
Filter	Filterkasten MFL-250 G4	1
Luftleitung	Spiralfalzrohr SREN NW 250mm, L=3m, S=0,5mm	6
Luftleitung	T-Stück UT 90° mit Lippendichtung (symmetrisch) NW 250x250mm	2
Luftleitung	Bogen UB 90° mit Lippendichtung NW 250mm	2
Luftleitung	Muffe MF NW 250mm	10
Luftleitung	Drosselklappe manuell DN 250	4
Luftleitung	Absperrklappe mit Motoraufnahme DN 250	4
Luftleitung	S&P Verbindungs-Manschette VBM-250 - 8070402184	2
Luftleitung	Absperrklappe mit Motoraufnahme DN 315	1
Luftleitung	Nippel UNP mit Lippendichtung NW 250mm	2
Luftleitung	Nippel UNP mit Lippendichtung NW 315mm	1
Luftleitung	Muffe MF NW 315mm	3
Luftleitung	HTH Telefonieschalldämpfer SD50 NW 250mm, L=0,5m	1
Luftleitung	Bogen UB 90° mit Lippendichtung NW 315mm	1
Montage	Lüftungsschelle LGS 250, M8/M10, verz. Rohrdurchm. NW 250	30
Montage	Montageschiene, MM-C-30 (Art. 418749)	32
Montage	Schraubanker, HUS-P 6x60/5/25 (Art. 416746)	100
Montage	Gewindestange, AM8x2000 4.8 Verz. (Art. 339793)	20
Montage	Schnellanbindung, MM-S M8	50
Montage	Schieneneschalldämmprofil, MM-RI 10cm	100
Montage	Sechskantmutter, Profi Depot Sechskantmutter M8, Schlüsselweite 13	100
Montage	Unterlegscheibe, Profi Depot Bauscheibe 8,4mm	100
Montage	Lüftungsanbindung, Lüftungsschelle LGS 315, M8	2
Montage	Verbindung, Aluminium Klebeband (TA-Serie)	1

Montage	Verbindung, Selbstschneidende Blechschraube	120
Regelung	Belimo Klappenstellantrieb ohne Federrückzug LM230A	4
Regelung	S&P Externer Sollwertsteller REB-ECOWATT - 5401304000	1
Regelung	HomeMatic Zentrale CCU2	1
Regelung	HomeMatic Zentrale Funk-Schaltaktor mit Messfunktion, Zwischenstecker	1
Regelung	HomeMatic IR-Tür-/Fensterkontakt	2
Regelung	ELV Homematic Differenz-Temperatur-Sensor HM-WDS30-OT2-SM-2, für Smart Home / Hausautomation	1
Regelung	SanDisc microSDHC UHS-I Card with Adapter 16GB 98MB/s	1
Regelung	8602156 Wolf Verschlussstopfen für Messöffnung 5 Stück	1
Schall-dämpfer	Trox Flex. Rohrschalldämpfer CF050/250x1500/VD2	1
Schall-dämpfer	Trox Flex. Rohrschalldämpfer CF050/250x500/VD2	1
Ventilator	S&P Schallgedämmte Lüftungsbox CAB-250 ECOWATT - 5113863200	1
Ventilator	S&P Halbradiale Rohrventilatoren TD-2000/315 - 5211309900	1

3.2.2.2 Auslegen

Zunächst wurde das gesamte Lüftungssystem auf dem Boden ausgelegt und in einander gesteckt, um überprüfen zu können, dass alle Teile passen und die Zeichnung richtig angefertigt wurde. Das Zusammenstecken der einzelnen Bauteile erfolgte entweder direkt, falls z.B. ein Rohr und ein Verbindungsstück mit Lippendichtung zusammengesetzt werden sollten, oder indirekt über sogenannte Muffen oder Nippel (etwas kleinere Rohrdurchmesser mit Lippendichtung), die zwei gleichgroßen Rohre mit einander verbinden können. Anschließend wurden die Ventilatoren und die motorisierten Klappen auf ihre Funktionstüchtigkeit getestet. Hierfür wurde z.B. der Ventilator mit einem Stromkabel mittels Klemmen verbunden, eingeschaltet und die Stufen abgefahren.

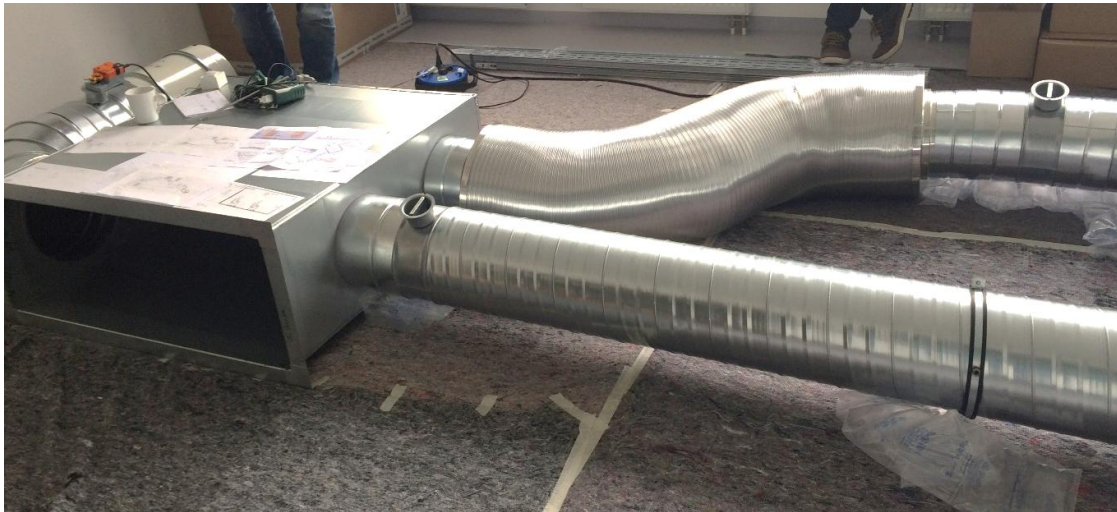


Abbildung 22: Auslegen des Mockups vorderer Teil



Abbildung 23: Auslegen des Mockups hinterer Teil

3.2.2.3 Aufhängung

Nach dem Auslegen konnte die Art der Aufhängung, sowie die Abmaße dieser, ausgewählt werden. Grundsätzlich gab es in unserem Fall zwei Möglichkeiten: die Aufhängung erfolgt direkt an der Decke oder indirekt durch Schienen, welche an der Decke angebracht und die Aufhängung für das System auf die Schienen montiert werden. Letzteres

empfiehlt sich durch ein hohes Maß an Flexibilität bezüglich nachträglichen Veränderungen am Mockup. Die Schienen werden mit Hilfe von Schraubankern an der Betondecke befestigt und die einzelnen Bauteile der Anlage können dann mithilfe von sogenannten Schnellanbindungen und Gewindestangen zur Höheneinstellung mittels Schellen befestigt werden, siehe Abbildung 24.

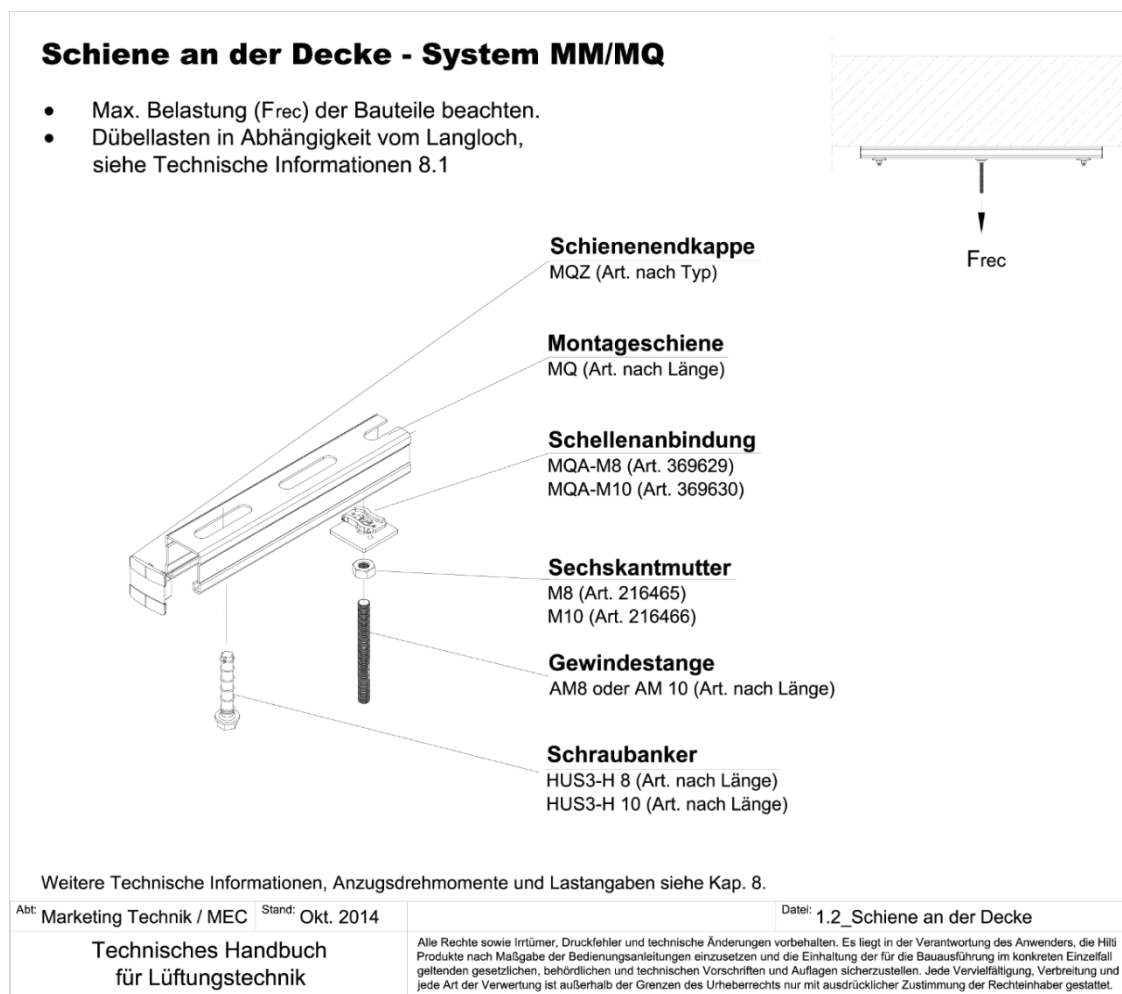


Abbildung 24: Schienen Deckenaufhängung (Quelle HILTI)

3.2.2.4 Wanddurchbruch

Um einen Auslass für das zu belüftende Büro zu schaffen, musste als Erstes ein Durchbruch durchgeführt werden. Da die zu bearbeitende Wand nachträglich eingezogen wurde, gab es keine Probleme bezüglich der Tragfähigkeit der Wand. Mithilfe einer

Handfräse und der vorherig angezeichneten Abmaße des Loches konnte die Rigips-Wand bearbeitet werden. Die Wand bestand aus zwei aufeinanderfolgenden Rigips-Wänden, einem freien Zwischenraum gefüllt mit Glaswolle welcher wieder durch zwei Rigips-Wände abgeschlossen wurde. Nachdem das Loch ausgeschnitten war, musste es mit Holz ringsherum verkleidet werden, damit die Luft später nicht in die Wand, sondern durch die Wand geführt werden kann. Nun folgte die Auslassbox, welche vor dem Loch angebracht werden musste. Zunächst wurden die benötigten Schienen an der Decke befestigt. Da die Box selbst keine Befestigungsausbuchtungen besitzt, wurde sie mit einem „Stangensystem“ aufgehängt, d.h. An den beiden Schienen an der Decke wurden jeweils zwei Gewindestangen befestigt, welche über die ganze Länge der Box entlanglaufen, bis sie unten wieder mit zwei Schienen verbunden werden. Die Auslassbox kann nun auf den unteren beiden Schienen abgelegt und mithilfe der Gewindestangen noch feinjustiert werden. Damit die Box bezüglich des Schalls entkoppelt von der Aufhängung ist, wurde jegliche Berührfläche zwischen den beiden Systemen mit Schaumstoff ummantelt, siehe Abbildung 25.

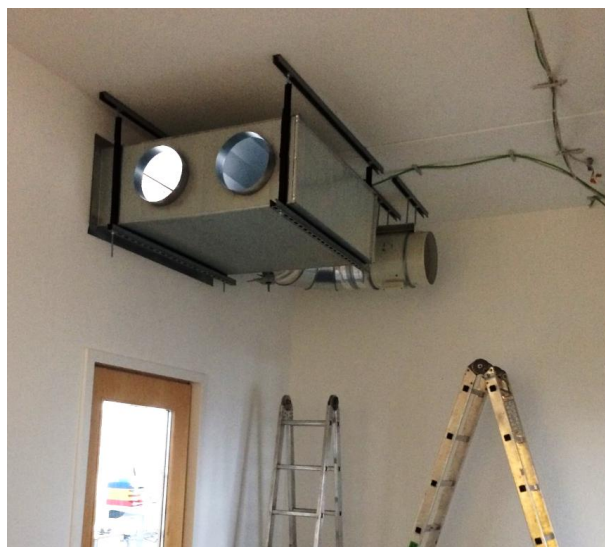


Abbildung 25: befestigte Auslassbox

In einem nächsten Schritt wurde das restliche System in drei Baugruppen unterteilt und jeweils eine Baugruppe fertig in einander gesteckt, mit selbstschneidenden Lüftungsschrauben miteinander verbunden und alle Verbindungen mit Aluminiumklebeband fi-

xiert und somit abgedichtet. Anschließend konnten die passenden Schienen an der Decke angebracht und die Schellen, welche später die Rohre halten, positioniert werden. Zunächst wurde der Rohrventilator hinter der Auslassbox befestigt und die erste Baugruppe, welche den Rohrventilator mit der Auslassbox verbindet montiert. Nun folgte die große Lüfterbox. Zuletzt wurden die beiden noch verbleibenden Baugruppen montiert, siehe Abbildung 26. Dabei war stets darauf zu achten, dass die Verbindungsstücke komplett in einander geschoben wurden, um eine spätere Undichtheit und daraus resultierendes Pfeifen zu verhindern. Zum Schluss sind die noch nicht fixierten Verbindungen zwischen den Baugruppen und der Ventilatoren verschraubt und verklebt worden, siehe Abbildung 27.

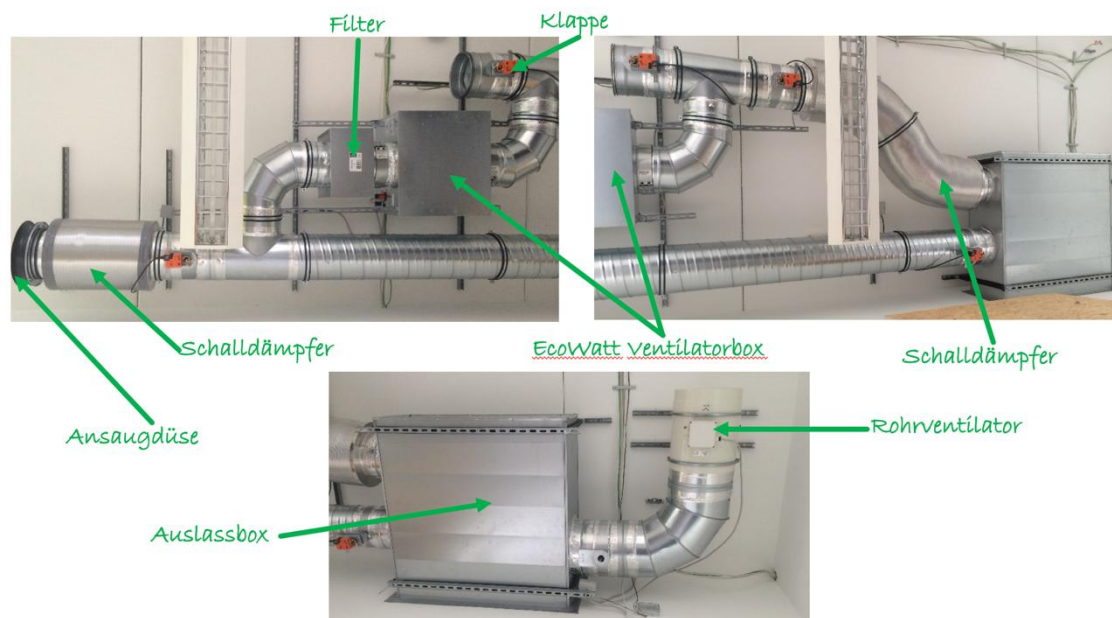


Abbildung 26: zweite Baugruppe befestigt



Abbildung 27: Mockup befestigt

Das gesamte fertige Mockup, sowie eine Skizze des Aufbaus sind in Abbildung 28 dargestellt.



Seite 61

3.2.2.5 Elektrik

Nachdem das Lüftungssystem aufgehängt war, konnte die Elektrik in Angriff genommen werden. Zunächst musste ein Schaltplan erstellt werden, um die richtigen Kabel besorgen zu können, siehe Abbildung 31. Drei Schalter wurden ausgewählt, zwei Wechselschalter (An/Aus), einmal für den Rohrventilator und einmal für die große Lüfterbox und einen Parallelschalter für die Klappenmotoren (Rechts/Aus/Links). Für die Lüftungsbox wird zusätzlich ein Sollwertsteller angebracht, welcher die Intensität des Ventilators regelt, indem die Spannung zwischen 0 und 10V manuell reguliert werden kann. Für das Mockup wurden Feuchtraumkabel mit einer Kabeldicke von $1,5\text{mm}^2$ (NYM-J xG1,5) verlegt. Zudem wurden alle metallenen Teile zusätzlich von außen geerdet.

Daraufhin musste das gesamte Mockup nochmals überprüft werden und konnte schließlich von einem Elektriker abgenommen werden.



Abbildung 29: Verkabelung überprüfen



Abbildung 30: Verkabelung des Mockups

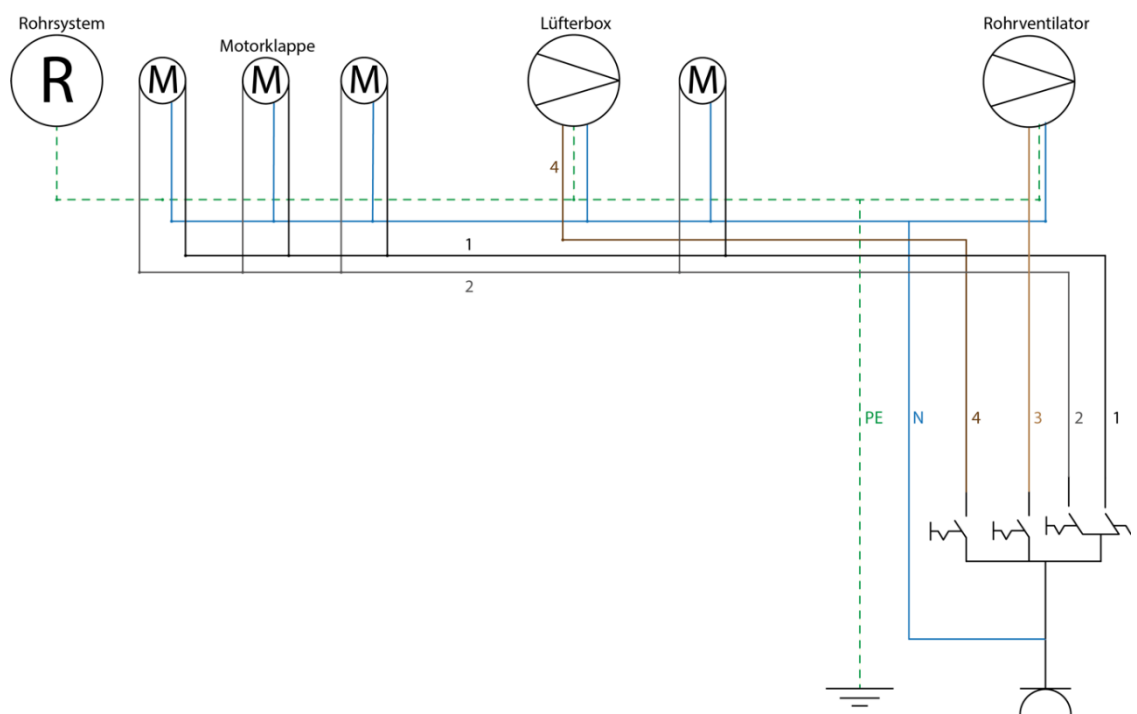


Abbildung 31: Schaltplan Mockup

3.3 Steuerungssystem

Zur Steuerungstechnik wurden Geräte der Firma HomeMatic verwendet. Ziel ist es die Lüftungsanlage nur in Betrieb nehmen zu können, wenn mindestens zwei Fenster gekippt sind. Somit soll verhindert werden, dass im zu lüftenden Raum kein Unter- bzw. Überdruck entsteht. Zunächst wurden hierfür an den Fenstern sogenannte Fensterkontakte angebracht, erkennen ob ein Fenster geschlossen oder geöffnet ist. Dieses Signal wird an die Zentrale des Systems weitergeleitet. Diese kann das gesendete Signal verarbeiten. Damit der Stromfluss gegebenenfalls unterbrochen werden kann, ist die Hauptleitung des Lüftungssystems mit einem Schaltaktor verbunden. Dieser kann über die Steuerungszentrale angewählt und ggf. die Stromzufuhr für das Lüftungssystem unterbrechen.

Die Steuerungszentrale kann über ihre IP-Adresse am PC eingesehen werden und programmiert werden. Mit der nachfolgenden Funktion wird sichergestellt, dass nur bei zwei geöffneten Fenstern die Lüftungsanlage in Betrieb genommen werden kann.

Wenn Fensterkontakt_links offen;

Und Fensterkontakt_rechts offen;

Dann Schaltaktor sofort ein;

Sonst Schaltaktor sofort aus;

Die verwendeten Geräte, sowie die Benutzeroberfläche des HomeMatic Programms sind in Abbildung 32 dargestellt.

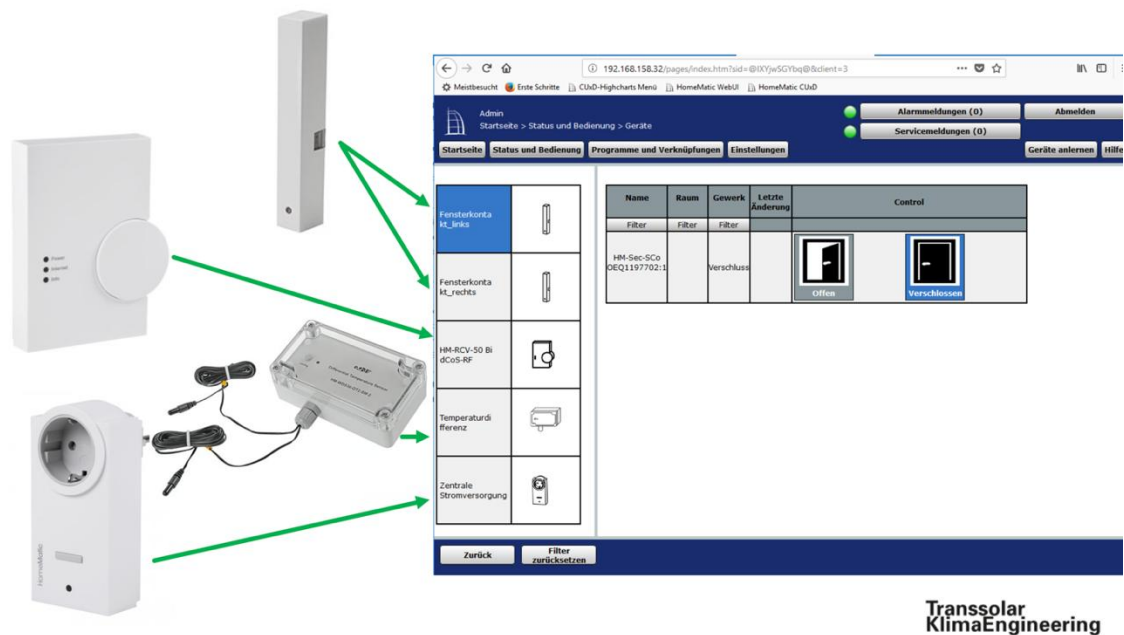


Abbildung 32: Mess- und Steuerungselemente

3.4 Messungen

In diesem Kapitel werden alle relevanten, durchgeführten Messungen aufgelistet und ausgewertet.

3.4.1 Messgeräte

In Kapitel 3.3 wurden bereits Teile des verwendeten HomeMatic Systems erläutert. Der bereits erwähnte Schaltaktor wird hierbei nicht nur für das Zulassen des Stromflusses eingesetzt, sondern verfügt ebenfalls über einen Leistungsmesser, dessen Messungen ebenfalls durch die oben vorgestellte Nutzeroberfläche eingesehen werden können. Ebenfalls von der Firma HomeMatic kommt ein Temperaturdifferenzmesser, siehe Abbildung 32, zum Einsatz, welcher die Temperaturen im Flur, sowie im zu lüftenden Raum aufzeichnet.

Für die Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Rohr wird ein Anemometer der Firma Testo verwendet. Das Modell 435 kann die Temperatur im Rohr, sowie die Strömungsgeschwindigkeit über ein Display ausgeben. Die Messung erfolgt mithilfe einer Hitzedrahtsonde, welche an einem Teleskopstab angebracht ist und über zuvor gebohrte Messöffnungen in das Rohrsystem eingeführt werden kann, siehe Abbildung 33.



Abbildung 33: links: Strömungsmessgerät, rechts: Messöffnung mit Verschlussstopfen

3.4.2 Bauakustik Prüfung nach DIN EN ISO 16283-1

Am 05.09.2018 und 06.09.2018 wurde mit bauakustischen Prüfung nach DIN EN ISO 16283-1 die vorhandene Luftschalldämmung des Trennbauteils festgestellt.

Zunächst wurde der vorhandene Lüftungsschacht wieder verschlossen, sowie die Tür mit einer speziellen Konstruktion verschlossen.

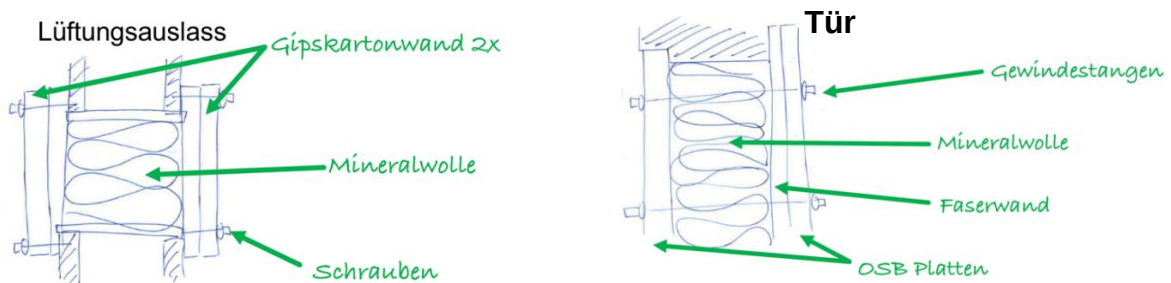


Abbildung 34: Aufbau der Abdichtung



Abbildung 35: links abgedichteter Aufbau, rechts offen

Tabelle 2: Ergebnis Akustikmessung

Messung	Messräume	Messergebnisse
Ohne Lüftungsanlage	Senderraum: Flur Empfangsraum: Büro	Rw = 42 dB
Mit Lüftungsanlage	Senderraum: Flur Empfangsraum: Büro	Rw = 39 dB

Die Minderung durch die Lüftungsanlage beträgt 3 dB. Das Schalldämmmaß der Anlage beträgt hierbei $R_w = 25$ dB. Der ausführliche Bericht befindet sich im Anhang B1 - Bericht Akustikmessung. Diese Werte sind Ausgangspunkt für weitere Maßnahmen, um die Mindestanforderungen an Klassenräume, siehe Tabelle 3, zu erfüllen.

Tabelle 3: Mindestanforderung für Klassenräume

Innenraumwände	$R_w \geq 47$ dB
Türen	$R_w \geq 32$ dB

Durch Messungen mit aktiver Lüftungsanlage wurde festgestellt, dass die Lüftergeräusche zu vernachlässigen sind, dank der Telefonieschalldämpfer.

3.4.3 Strömungsmessung

Die Strömungsmessung wurde mittels DIN EN 12599 durchgeführt. Hierzu wurden zunächst mögliche Messstellen ermittelt. Es gilt darauf zu achten, dass genügend Abstand zur Störstelle, einer Abzweigung oder Öffnung, vorhanden ist, um gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeiten ohne übermäßig viele Messpunkte zu erhalten, siehe Abbildung 33.

$$\text{Relativer Abstand} = \frac{a}{D_h} \quad (3-1)$$

Mit:

a Abstand zur Störstelle

D_h Rohrdurchmesser

Mit der Formel (3-1), einem Rohrdurchmesser von 250mm und ein Abstand von 1500mm lässt sich nun der relative Abstand ermitteln zu:

$$\text{Relativer Abstand} = \frac{a}{D_h} = \frac{1500}{250} = 6$$

Damit ergeben sich mit der Unsicherheit 15/5 laut der Tabelle in Abbildung 36 vier zu messende Durchmesser.

Tabelle D.1 — Erforderliche Anzahl der Messpunkte als Funktion des relativen Abstands a/D_h von einer Störstelle und der relativen Messunsicherheit

Relativer Abstand a/D_h	Erforderliche Anzahl der Messpunkte		
	Gesamte Unsicherheit/Unsicherheit des Messgeräts %		
	10/5	15/5	15/10
1,6		30	44
2,0	50	21	30
2,5	34	16	24
3,0	25	12	18
4,0	16	8	12
5,0	12	6	9
6,0	9	4	6

Abbildung 36: Anzahl der Messpunkte aus DIN EN 12599

Die genaue Lage der Messpunkte wird durch die Formel (3-2) aus der Norm DIN EN 12599 ermittelt.

$$y_i = \frac{1}{2} \cdot D_h \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2i - 1}{2n}} \right) \quad (3-2)$$

Mit:

- y_i Abstand zum Rohrrand
- i Nummer der Messstelle
- n Anzahl der Messdurchmesser

Die ermittelten Messpunkte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: ermittelte Messstellen

Messstelle	Höhe in cm	
y_1	6,62	
y_2	7,45	
y_3	8,45	
y_4	9,79	
y_5	15,21	
y_6	16,55	
y_7	17,55	
y_8	18,38	

Nachdem die Messpunkte gegeben waren konnte die Messsonde in die zuvor gebohrten Messöffnungen auf die ermittelten Messpunkte eingeführt werden. Dies wurde mit den unterschiedlichen Einstellungen der Lüftung (10V, 8V, 6V, 4V) wiederholt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Anhang B2 - Strömungsgeschwindigkeitsmessergebnisse für den Tag- und Nachtlütfungsfall mit dem EcoWatt Lüfter zu sehen.

Die Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 37: Zusammengefasste Ergebnisse Strömungsmessung für alle Stellungen zusammengefasst dargestellt. Der Volumenstrom beider Lüftungsrichtungen steigt mit zunehmender Voltzahl linear an und kann somit mit einer Gleichung (siehe (3-3) und (3-4)) bei jeder Reglerstellung bestimmt werden.

$$\dot{V}_{Tag} = 102,27x - 62,07 \quad (3-3)$$

$$\dot{V}_{Nacht} = 106,64x - 44,29 \quad (3-4)$$

Mit:

$\dot{V}_i$ Volumenstrom in m³/h

x Reglerstellung in V

Der leichte Versatz der Taglüftungskurve zur Nachtlüftungskurve resultiert aus den unterschiedlichen Lagen der Messpunkte. Bei der Taglüftung ist der Messpunkt weiter entfernt von der Lüfterbox und ist somit etwas abgeschwächt.

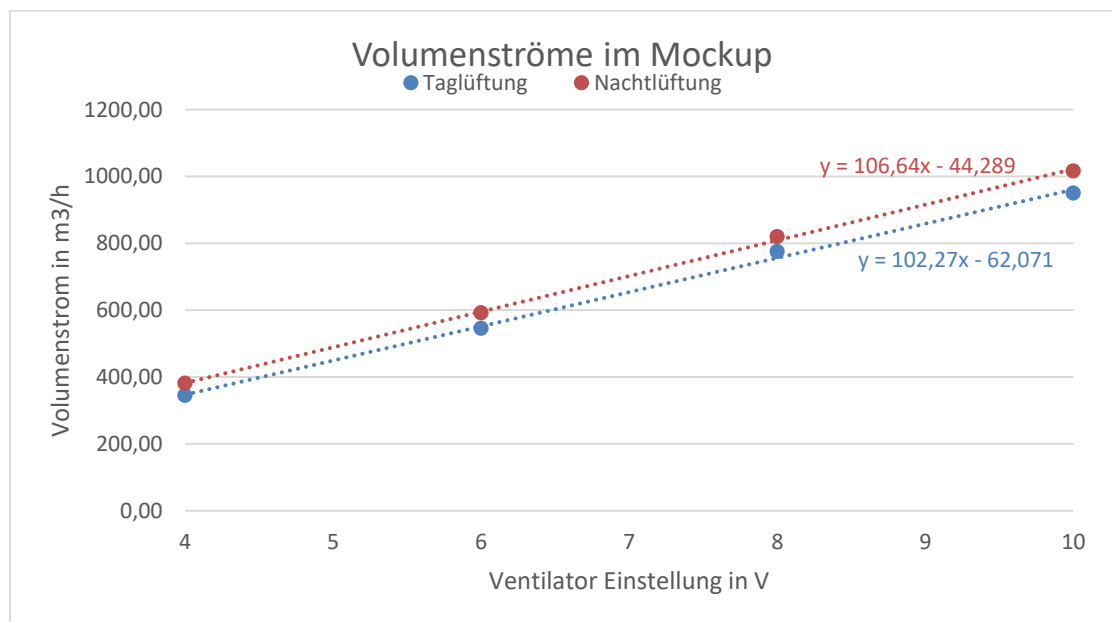


Abbildung 37: Zusammengefasste Ergebnisse Strömungsmessung

3.4.4 Leistungsmessungen

Mithilfe des zuvor erwähnten Schaltaktors konnten die aufgebrachte Leistung des Lüftungssystems zu jeder Zeit aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Zunächst wird das Verstellen der Klappen untersucht, siehe Abbildung 38: Leistungsmessung der Klappen. Zu Beginn und Ende des Vorgangs ist eine kurze Leistungsspitze

zu sehen. Diese resultieren aus dem luftdichten Abschießen der Klappen. Der Widerstand der Klappe ist wegen der Gummidichtungen kurz vor dem endgültigen schließen oder am Anfang des Vorgangs am höchsten, somit muss auch mehr Energie zu dieser Zeit aufgebracht werden.

Nach Abschluss des Vorgangs bleibt die Leistung konstant auf 1,43 W, daraus folgt ein konstanter Energieverbrauch der Klappen, welcher durch das Abschalten der Klappen nach dem Verstellen dieser verhindert werden kann.

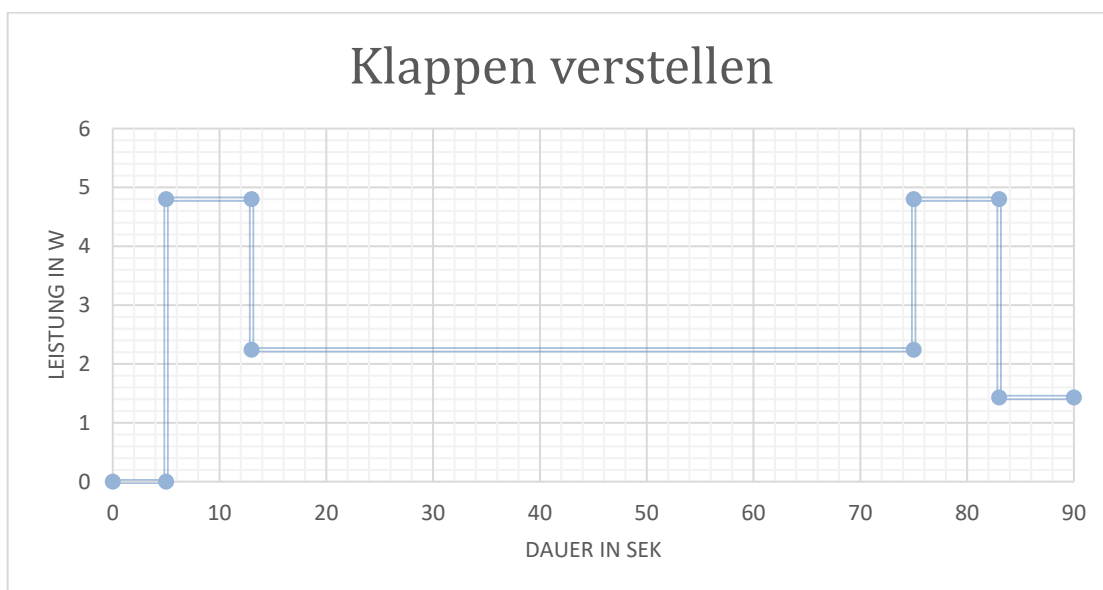


Abbildung 38: Leistungsmessung der Klappen

Der gesamte Verstellvorgang erfolgt innerhalb von 78 Sekunden und verbraucht dabei 0,06Wh Strom.

Als nächstes wird die Leistungskurve des EcoWatt Lüfters betrachtet. Da dieser mit unterschiedlichen Stufen gefahren werden kann, werden die zwei Stellungen gewählt, welche später für den Betrieb der Anlage relevant sind. In Abbildung 39: Leistungsmessung EcoWatt Lüfter Stufe mit 10V ist die Leistungskurve unter Volllast (10V) abgebildet.

Bis zum Erreichen der vollen Leistung braucht der Lüfter etwa 56 Sekunden und hat unter Volllast einen Strombedarf von 195 W.

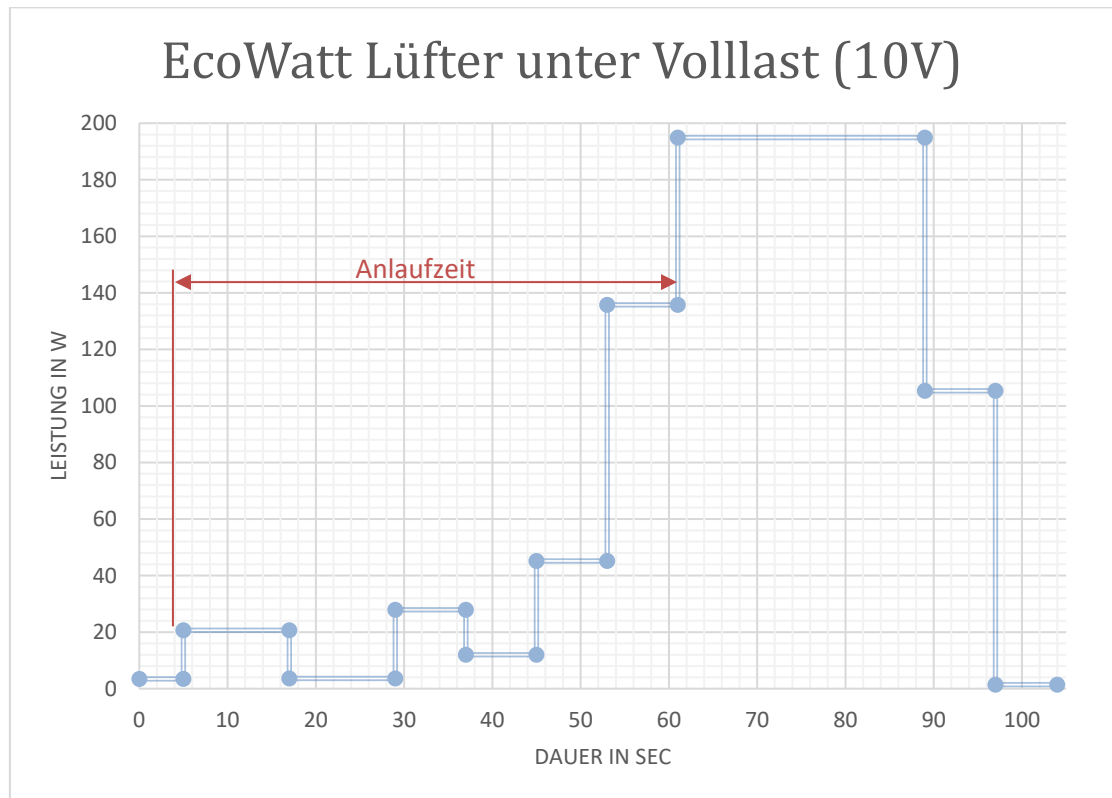


Abbildung 39: Leistungsmessung EcoWatt Lüfter Stufe mit 10V

Dieser Betriebsmodus wird allerdings nur für die Nachtlüftung eingesetzt. Für die Taglüftung während der Betriebszeiten wird der Lüfter auf der Stufe 6V gefahren, siehe Abbildung 40: Leistungsmessung EcoWatt Lüfter Stufe mit 6V.

Die Anlaufzeit für diese Stufe beträgt ebenfalls etwa eine Minute, allerdings ist der Strombedarf erheblich gesunken auf 46W. Dies beträgt etwa nur noch 24% des Strombedarfs im Vergleich zur Volllast, wobei der Volumenstrom immer noch 60% im Vergleich zur Volllast aufweist.

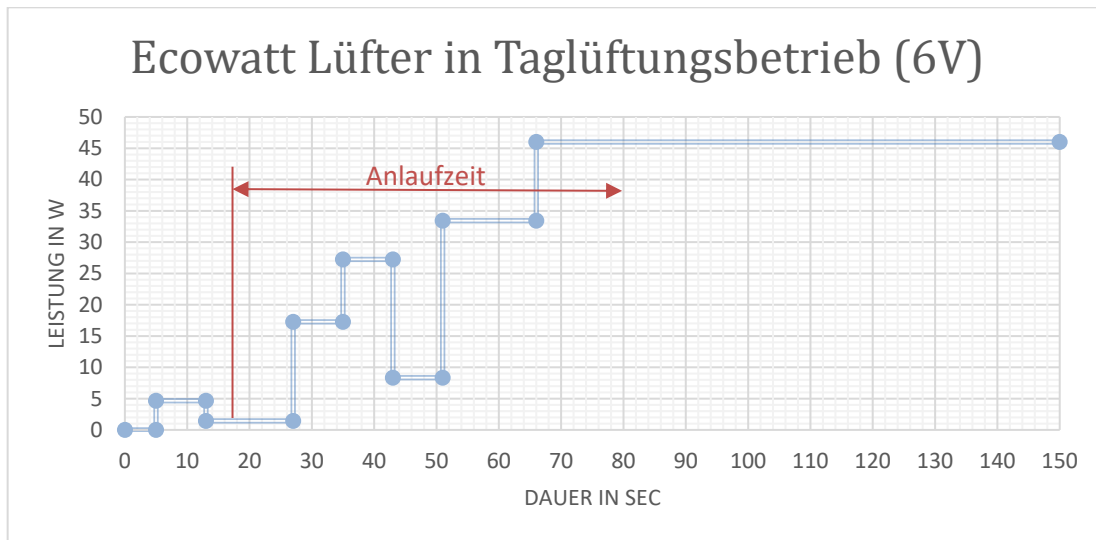


Abbildung 40: Leistungsmessung EcoWatt Lüfter Stufe mit 6V

Mit Konfiguration 2, wird für die Nachtlüftung der Rohrventilator eingesetzt, dessen Leistungskurve in Abbildung 41: Leistungsmessung Rohrventilator zu sehen ist. Bei diesem Ventilator beträgt die Anlaufzeit nur 8 Sekunden. Allerdings beträgt der Strombedarf auch 254W und liegt somit deutlich über dem EcoWatt-Lüfter.

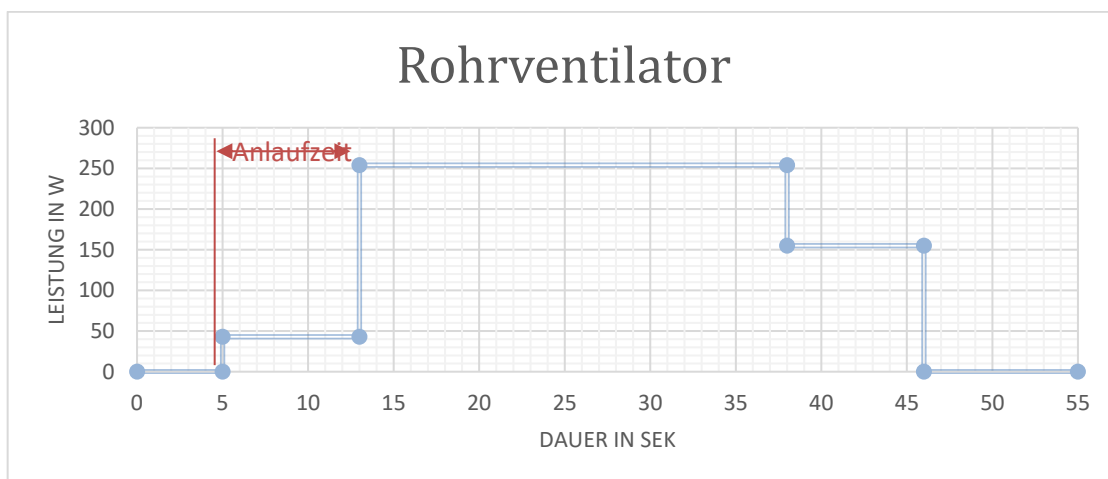


Abbildung 41: Leistungsmessung Rohrventilator

Die lange Anlaufzeit des EcoWatt Lüfters im Vergleich zum Rohrventilator lässt sich durch die energiesparende und möglichst lärmarme Fahrweise des Lüfters erklären.

Die gemessenen Werte können mit der Kurve des Herstellers, Abbildung 42, verglichen werden. Es zeigt sich, dass bei beiden betrachteten Szenarien die realen Werte unter den Werten des Herstellers liegen.

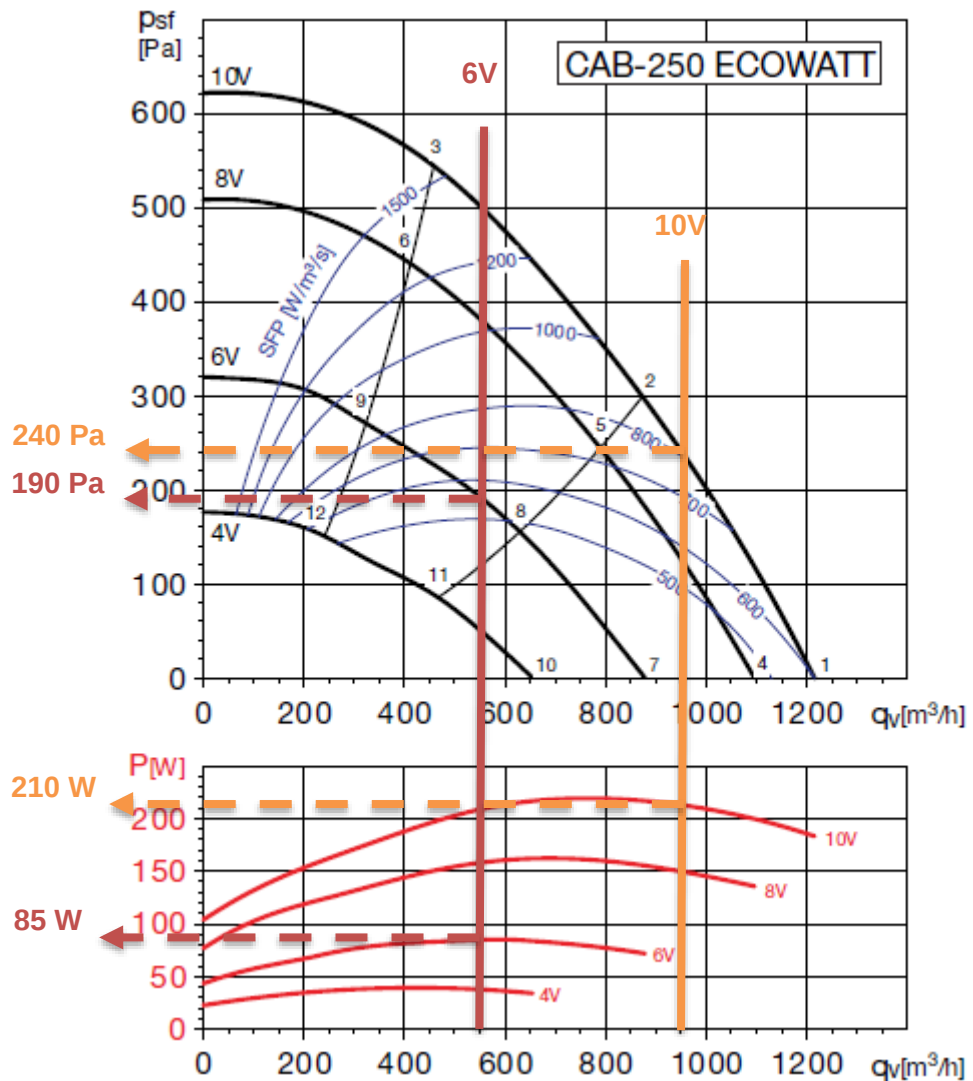


Abbildung 42: Leistungsdiagramm EcoWatt CAB-250

Aus den gegebenen Leistungskurven und dem Nutzungsprofil eines Klassenzimmers der Norm SIA2024, siehe Tabelle 5, kann nun der Energiebedarf der beiden Lüftungskonfigurationen errechnet werden.

Tabelle 5: Nutzungsprofil Klassenzimmer

Nutzungsprofil SIA2024:

Volllaststunden pro Tag	7,6	h
Fläche Klassenzimmer	60	m ²
Tage die Woche	5	d
Volllaststunden pro Jahr	1390	h/a
Sommer	74	d
Winter	106	d
Nutzungstage pro Jahr	180	d
Kühlstunden	10	h

Zunächst wird die Variante 1 mit dem EcoWatt Lüfter betrachtet, hier wird die Lüftung im Winter während der Betriebszeiten unter Vollast gefahren. Im Winter wird der EcoWatt Ventilator mit Vollast (10V) außerhalb der Betriebszeiten eingesetzt um eine Nachtlüftung zu erreichen. Die Verstellklappen werden am Anfang und Ende des Sommers je einmal betätigt.

Tabelle 6: Jahresenergiebedarf Variante 1

Variante 1 EcoWatt Lüfter

Sommer	144.643,45	Wh/a
Klappe	0,06	Wh/a
Winter	156.603,92	Wh/a
Klappe	0,06	Wh/a
Gesamt	301.247,48	Wh/a
	301,25	kWh/a
pro m ²	5,02	kWh/m²a

Für die zweite Variante wird der Rohrventilator zur Nachtlüftung im Sommer verwendet und im Winter der EcoWatt Lüfter mit Vollast (10V) gefahren.

Tabelle 7: Jahresenergiebedarf Variante 2

Variante 2 mit EcoWatt Lüfter und Rohrventilator

Sommer	188.475,09	Wh/a
Klappe	0,06	Wh/a
Winter	156.603,92	Wh/a
Klappe	0,06	Wh/a
Gesamt	345.079,13	Wh/a
	345,08	kWh/a
pro m ²	5,75	kWh/m²a

Zum Vergleich wird eine standardisierte mechanische Lüftung berechnet mit den Werten aus Tabelle 8 und Formel (3-5). Alle berechneten Werte sind in Abbildung 43 zusammengefasst dargestellt. Zudem ist in der Abbildung auch der standardisierte Wert für die Lüftung nach SIA 2024 von 8,8 kWh/m²a (wegen Dichte der Schüler im Klassenzimmer Ursprungswert SIA verdoppelt) abgebildet.

Tabelle 8: mechanische Lüftung

mechanische Lüftung:

Vollaststunden pro Jahr	2000	h/a
Schüleranzahl	45	Personen
Volumenstrom pro Person	20	m ³ /(h Pers.)
Stromverbrauch	0,5	Wh/m ³

$$E_{\text{mech.Lüftung}} = \frac{n_{\text{Vollast}} \cdot n_{\text{Schüler}} \cdot \dot{V}_{\text{Person}} \cdot P_{\text{el}}}{A_{\text{Klassenzimmer}}} \quad (3-5)$$

Mit:

$E_{\text{mech.Lüftung}}$ Energiebedarf der mechanischen Lüftung in W/m²a

n_{Vollast} Vollaststunden in h/a

$n_{Schüler}$ Personen pro Klassenzimmer

$\dot{V}_{Person}$ Volumenstrom pro Person

P_{el} Elektrische Leistung in Wh/m³

Daraus ergibt sich für den Energiebedarf der mechanischen Lüftung:

$$E_{mech.Lüftung} = \frac{2000 \text{ h/a} \cdot 45 \cdot 20 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,5 \text{ Wh/m}^3}{60 \text{ m}^2} = 15.000 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{a}} = 15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

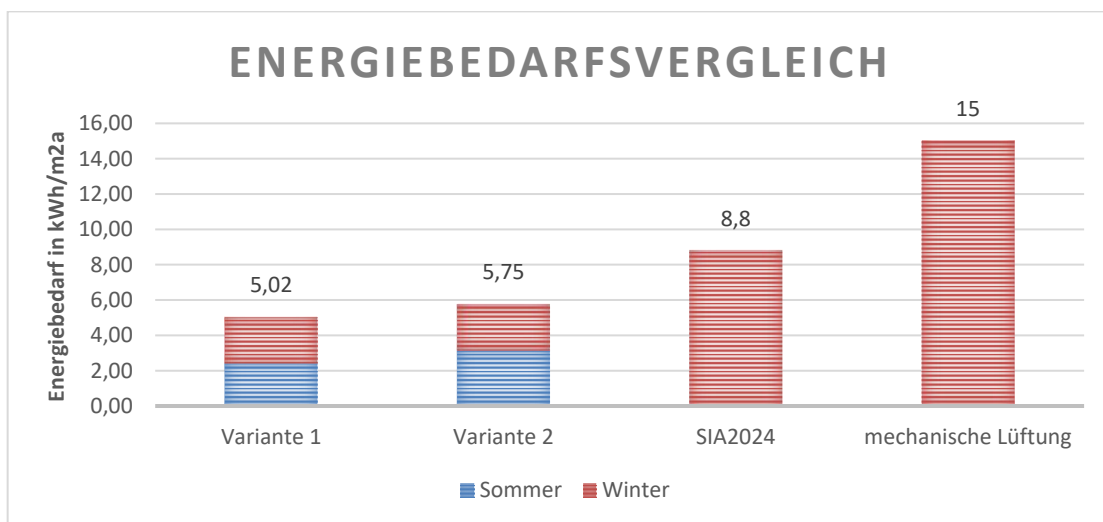


Abbildung 43: Energiebedarfsvergleich

Mit beiden Varianten liegt das Lüftungssystem sowohl unter dem angenommenen Wert der SIA2024, als auch deutlich unter der mechanischen zentralen Lüftungsanlage. Der große Vorteil unseres Systems ist die individuelle Regelbarkeit des Systems. Hierbei wird ein weiterer Vorteil des Systems noch außer Acht gelassen. Mithilfe der Nachtlüftung im Sommer kann auf eine maschinelle Kühlung verzichtet werden, welche bei einer zentralen Lüftungsanlage nochmals mit 16,9 kWh/m²a zu Buche schlägt.

3.4.5 Strömungsvisualisierung

Unter Zuhilfenahme einer Nebelmaschine wurden Luftströmungen im Raum visualisiert. Dazu wurden die Wände mit dunkler Folie abgeklebt und eine Kamera mit Stativ aufgestellt. Anschließend wurde die Nebelmaschine am Einlass der Lüftungsanlage platziert und bei den unterschiedlichen Szenarien jeweils 10 Sekunden lang angeschaltet.

Betrachtet wurden zwei unterschiedliche Fensteröffnungen:

1. Die Fensteröffnung befindet sich gegenüber des Lüftungseinlasses, siehe Abbildung 44
2. Die Fensteröffnung befindet sich ca. auf gleicher Höhe wie der Einlass, siehe Abbildung 45

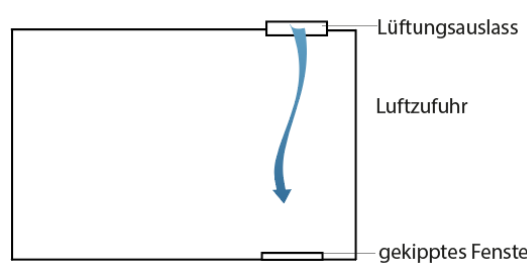


Abbildung 44: Fensteröffnung 1

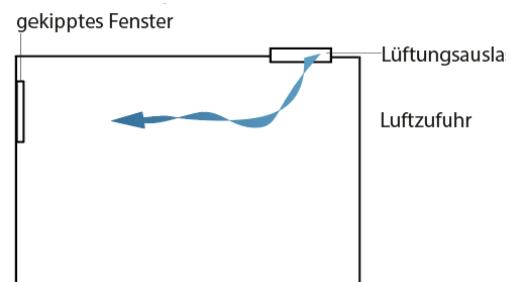


Abbildung 45: Fensteröffnung 2

Sowie vier Szenarien:

- Kältere Luft wird eingeblasen
- Wärmere Luft wird eingeblasen
- 1,5 m/s am Lüftungsauslass
- 3 m/s am Lüftungsauslass

Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

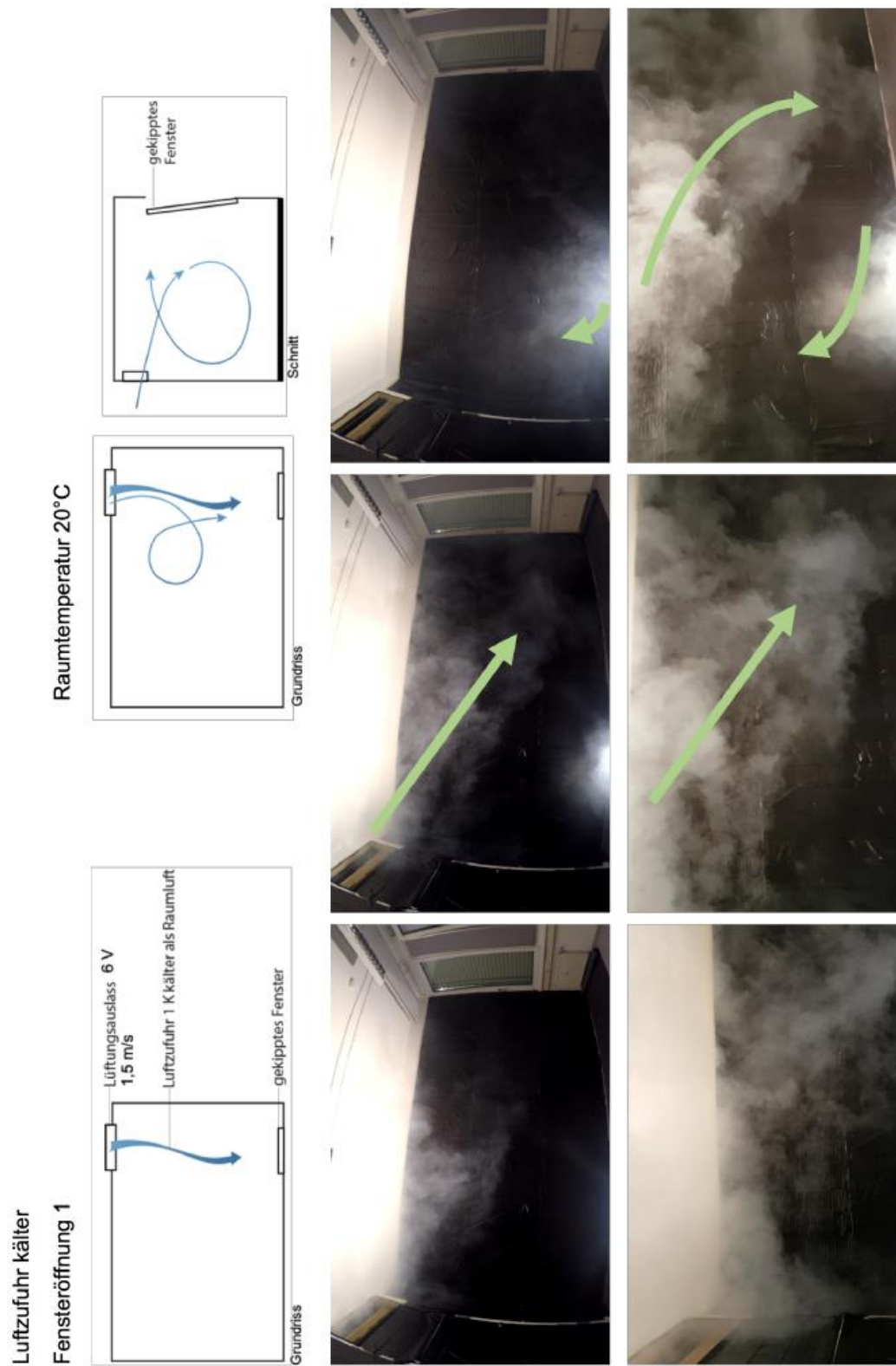


Abbildung 46: Fensteröffnung 1, kältere Luft

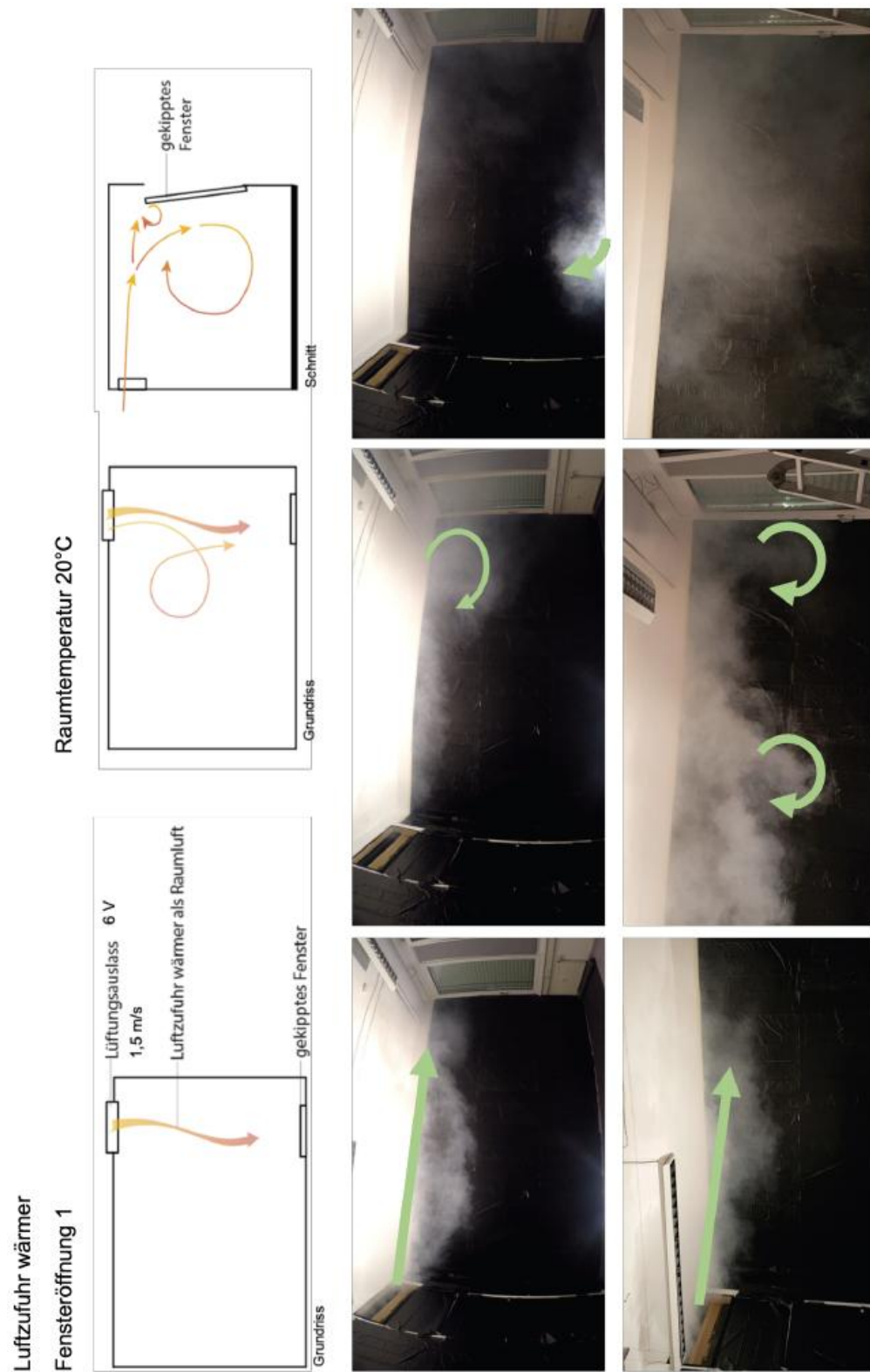


Abbildung 47: Fensteröffnung 1, wärmere Luft



Abbildung 48: Fensteröffnung 1, hohe Geschwindigkeit



Abbildung 49: Fensteröffnung 2, wärmere Luft



Abbildung 50: Fensteröffnung 2, hohe Geschwindigkeit

Eine wichtige Erkenntnis aus den Rauchversuchen ergibt sich beim Anblick der Abbildung 48. Bei schnellen Einströmgeschwindigkeiten und einem geöffneten Fenster direkt gegenüber der Öffnung ist die Durchmischung der Luft im Raum nicht vollständig gegeben, siehe Abbildung 51.



Abbildung 51: Durchmischung im Raum wie Abbildung 48

Eine Empfehlung eine bessere Durchmischung im Raum zu erreichen wäre das Öffnen von Fenstern, welche sich möglichst weit entfernt von der Lüftungsöffnung befinden. Somit ist garantiert, dass die Luft den ganzen Raum durchquert, siehe Abbildung 49.

Des Weiteren ist eine bessere Durchmischung durch eine geringere Strömungsgeschwindigkeit gegeben. Dies zeigen die Versuche in Abbildung 47 und Abbildung 48. Die eingeblasene Luft hat bei geringen Geschwindigkeiten mehr Zeit abzusinken und verdrängt mehr „alte“ Luft, wohingegen die Luft mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten kaum absinkt und schnell das geöffnete Fenster erreicht.

Durch das Verlagern der Öffnungsklappen in den Klassenräumen, in den Testräumen nahe der Decke, kann zudem ein etwas verändertes Strömungsbild erwartet werden. Es ist davon auszugehen, dass die Luft auf dem Weg zum Lüftungsschlitz weiter absinkt und eine bessere Durchmischung erreicht wird.

3.5 Kosten

Um die Sinnhaftigkeit der beiden Varianten zu überprüfen und eine Wahl zwischen den zwei Varianten zu treffen wird auch die Wirtschaftlichkeit der beiden Anlagen überprüft. Zunächst sind in Tabelle 9 die benötigten Materialien für die Variante 1 mit einem Lüfter abgebildet.

Tabelle 9: Kosten der Variante mit einem Ventilator

Anzahl	Art	Kosten
1	Schalldämpfer 1500	145,00 €
1	Schalldämpfer 500	100,00 €
4	Klappe	176,00 €
2	T-Stücke	62,00 €
2	90° Bogen	56,00 €
2	3m Rohr	94,26 €
1	EcoWatt Lüfterbox	956,55 €
1	Filter	52,00 €
1	Ansaugdüse	139,53 €
10	Muffen	30,00 €
1	Gegenflansch	29,69 €
1	Auslassbox	236,00 €
1	Sollwertsteller	36,76 €
4	Klappenmotoren	288,00 €
2	Manschette	27,72 €
	Summe	2.429,51 €

In Tabelle 10 zeigt die Materialien für das Lüftungskonzept mit zwei Ventilatoren.

Tabelle 10: Kosten der Variante mit zwei Ventilatoren

Anzahl	Art	Kosten
1	Schalldämpfer 1500	145,00 €
1	Schalldämpfer 500	100,00 €
1	Klappe 250	44,00 €
1	3m Rohr	47,13 €
1	EcoWatt Lüfterbox	956,56 €
1	Filter	51,90 €
1	Rohrventilator	364,75 €
1	Ansaugdüse	139,53 €
2	Muffe 250	6,00 €
1	Gegenflansch	29,69 €
1	Auslassbox	236,00 €
1	Sollwertsteller	36,76 €
2	Klappenmotoren	144,00 €
1	Klappe 315	34,09 €
3	Muffe 315	11,31 €
2	Manschette	27,72 €
	Summe	2.346,72 €

Kabel, Aufhängung und Steuerungssysteme wurden bei beiden Varianten nicht berücksichtigt.

Auffällig ist, dass sich die beiden Varianten im Preis kaum unterscheiden. Die Variante mit zwei Lüftern ist, trotz der hohen Kosten für Ventilatoren die günstigere Alternative, da hier auf den Aufwand durch die verwundenen Leitungen verzichtet werden kann, sowie die Klappenanzahl reduziert werden kann.

3.6 Ausblick

Bei gewünschter schmaler Abhangdecke könnte Platz durch einen alternativen Ventilator, sowie kleinere Rohrschalldämpfer gewonnen werden.

Eine weitere Transformation wäre eine Variante des Systems mit zwei Ventilatoren und nur einer Motorklappe. Diese befände sich am Auslass der Nachtlüftung und wäre tagsüber geschlossen. Hiermit könnten Kosten bezüglich Regelung und Material gespart werden.

Zusätzliche Einsparungen können erreicht werden, indem gänzlich auf Lüftungsklappen verzichtet wird und hingegen mit einer Prallklappe in der Mitte der Auslassbox zu arbeiten, siehe Abbildung 52. Durch diese Variante ist der Zu- und Abluftstrom deutlich voneinander getrennt und die Luft wird direkt in den Raum geleitet ohne eine hohe Verwirbelung innerhalb der Box zu erfahren.

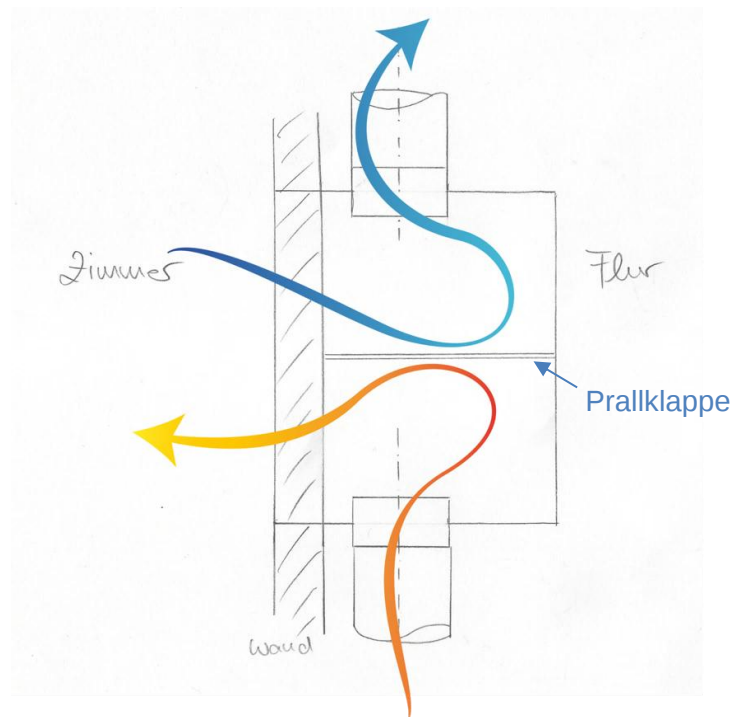


Abbildung 52: Strömungen in Auslassbox mit Prallklappe

Um einen gleichmäßigeren Strömungsverlauf zu erreichen kann die einzuleitende Luft, statt direkt in den Raum in eine Abhangdecke geleitet werden und durch Lüftungsschlitze in den Raum geleitet werden, siehe Abbildung 53 und Abbildung 54.

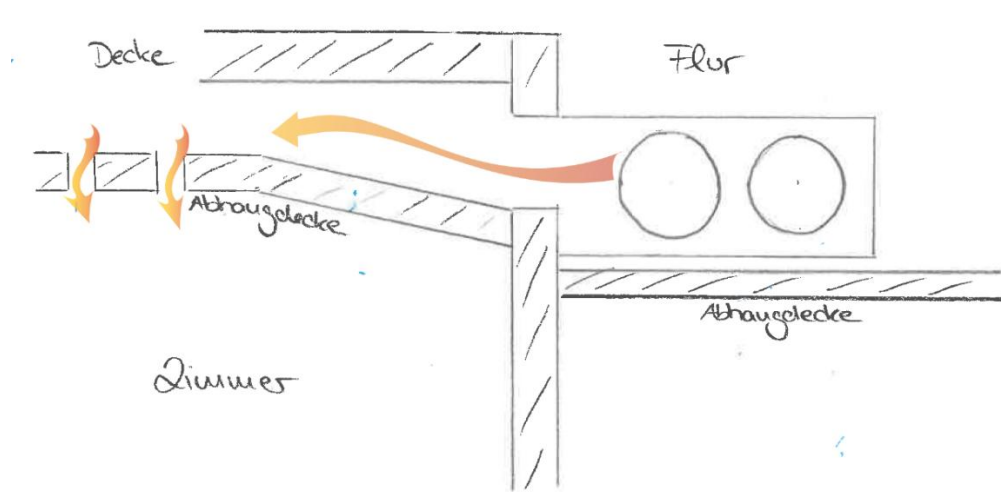


Abbildung 53: Schnitt: Abhangdecke mit Lüftungsschlitzen

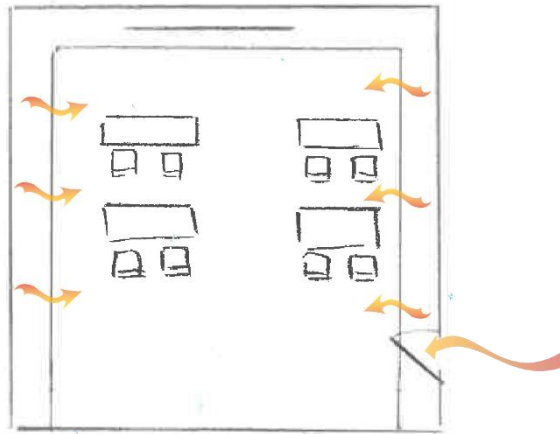


Abbildung 54: Grundriss: Abhangdecke mit Lüftungsschlitzen

Eine letzte Einsparmethode die sich aus der Variante mit Abhangdecke ergibt ist auf die Auslassbox zu verzichten, welche einen erheblichen Anteil an den Kosten trägt. Durch die Lüftungsschlitze der Abhangdecke wird der Luftstrom bereits vermischt und die Strömungsgeschwindigkeit abgeschwächt und muss somit nicht zusätzlich vor dem Klassenraum in eine Auslassbox geleitet werden, siehe Abbildung 55.

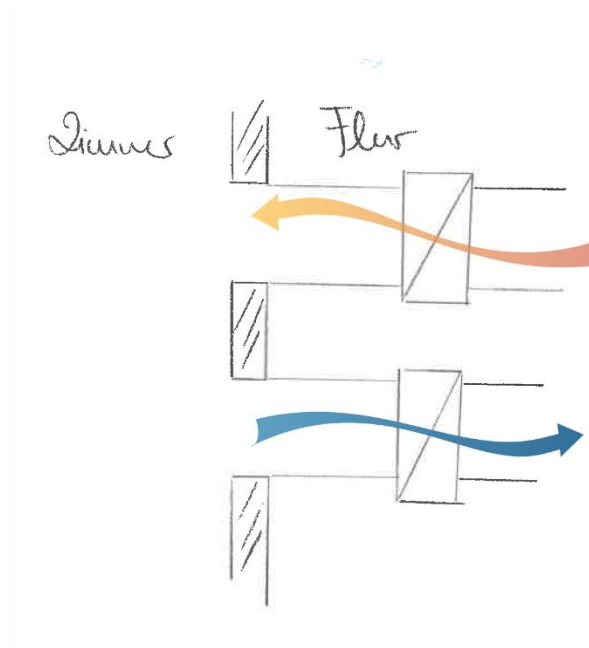


Abbildung 55: Variante ohne Auslassbox

3.6.1 Fazit

Eine dezentrale Lüftung kann für Klassenzimmer eine effiziente, platzsparende und geräuscharme Lösung darstellen die Schulräume ausreichend zu belüften und im Sommer zusätzlich zur Kühlung der Räume beitragen.

4. Untersuchungen zur Materialität

Das Arbeitspaket 2 berichtet über die Untersuchungen zur Materialität. Hierbei wird speziell auf Emissionen (VOCs), Schadstoffe etc. eingegangen. Weiterhin wurden Messungen zur Raumakustik durchgeführt und entsprechend bewertet. Schließlich wurden die Lebenszykluskosten analysiert sowie grundlegende Aussagen zur Ökobilanz getroffen.

4.1 Emissionen (VOCs), Schadstoffe

Im Folgenden werden hinsichtlich der Fragestellung „Untersuchung der Raumluftqualität“ die Ergebnisse zu Emissionen (VOCs), Schadstoffen etc. aufgeführt und entsprechend erläutert. Der Termin der Messung in der Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart fand am 24.09.2021 statt. Die Räumlichkeiten in der die Messungen vor Ort durchgeführt wurden, sind im Anhang P2 - Messdatenerfassung dargestellt.

Der Abschnitt 4.1 ist ein Auszug aus dem Prüfbericht zur Innenraumluftqualität [4].

4.1.1 Zielsetzung / Vorgehensweise

Ziel der Raumluftmessung ist die Prüfung der Raumluftkonzentrationen gemäß BB-ZTV¹ von

- TVOC
- Einzel-VOC
- Aldehyde
- Formaldehyd

¹ Weitere Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (BB-ZTV) für Messung der Innenraumluft

Die vorgegebenen Räume wurden durch den Messtechniker Dipl.-Ing. (FH) Waldemar Bothe gemäß dem Angebot AG0151 am 23.09.2021 vorgereinigt:

- Mikroentstaubung auf Oberflächen
- Filtereinsatz zur Entfernung von Altimmissionen in der Raumluft
- Überprüfung der vorher/nachher Feinstaubkonzentration bis zu PM 0,3
- Messraumbelüftung
- Raumklimakontrolle
- Raumverschluss gemäß Messziel

Die Raumluftmessung wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 16000ff durch den Messtechniker Dipl.-Ing. (FH) Waldemar Bothe durchgeführt. Die Lüftungsanlage lief nach Einstellung des Lüftungstechnikers im Maximalbetrieb (Tagbetrieb) vor und während der Messung und konnte nicht verändert werden. Im Raum Nr. 3.01 wurde die Lüftungsanlage gemäß Vorgabe nach Abschluss der Reinigung ausgeschaltet. Nach Abschluss der ersten Worst-Case Messung wurde der Raum für 10 Minuten gelüftet und anschließend die Messung zum Ende von 1,5 Std. durchgeführt - ebenso mit ausgeschalteter Lüftungsanlage. Dies simuliert die manuelle Lüftung bei Ausfall bzw. ohne die Lüftungsanlage.

4.1.2 Zusammenfassung

Die VOC-Einzelrichtwerte I + II (ERW) inkl. Formaldehyd und Aldehyde des Umweltbundesamtes / AIR / IRK wurden in allen Räumen eingehalten. Der TVOC-Summenwert lag nach 8 Std. Verschlusszeit in der Stufe 1 (höchste Stufe = maximal erreichbar im positiven Sinn) in den Räumen 1.11, 2.12, 3.01 (1,5 Std.). In dem Raum 3.01 bei 8 Std. Raumverschluss und ohne Lüftungsanlage (Worst- Case) wurde die Stufe 2 erreicht. Die Messergebnisse sind im Neubau als vorbildlich zu betrachten.

4.1.2.1 Laborergebnisse

Raum 1.11, 2.12

Tabelle 11: Raum 1.11, 2.12

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 1.11 µg/m³	24.09.21 2.12 µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Hexan	110 - 54 - 3	a	1	<	<	0	0
Heptan	142 - 82 - 5	a	1	<	1	0	0
Oktan	111 - 65 - 9	a	1	<	1,3	0	0
Nonan	111 - 84 - 2	a	1	2,4	2	0	0
Dekan	124 - 18 - 5	a	1	15	14	0	0
Undekan	1120 - 21 - 4	a	1	13	14	0	0
Dodekan	112 - 40 - 3	a	1	3,4	4,3	0	0
Tridekan	629 - 50 - 5	a	1	3,3	4,2	0	0
Tetradekan	629 - 59 - 4	a	1	1,4	2	0	0
Pentadekan	629 - 62 - 9	a	1	<	<	0	0
Hexadekan	544 - 76 - 3	a	1	1	<	0	0
Heptadekan	629 - 78 - 7		1	<	<	0	0
Oktadekan	593 - 45 - 3		1	<	<	0	0
Nonadekan	629 - 92 - 5		1	<	<	0	0
2-Methylpentan	107 - 83 - 5		1	<	<	0	0
3-Methylpentan	96 - 14 - 0		1	<	<	0	0
2-Methylhexan	591 - 76 - 4	a	1	<	<	0	0
3-Methylhexan	589 - 34 - 4	a	1	<	<	0	0
2,3-Dimethylpentan	565 - 59 - 3	a	1	<	<	0	0
2,2,4-Trimethylpentan	540 - 84 - 1	a	1	<	<	0	0
2,3-Dimethylheptan	3074 - 71 - 3	a	1	<	<	0	0
Pentamethylheptan	13475 - 82 - 6	a	1	<	1	0	0
Heptamethylnonan	4390 - 04 - 9	a	1	<	<	0	0
Methylcyclopentan	96 - 37 - 7	a	1	<	<	0	0
Cyclohexan	110 - 82 - 7	a	1	3,8	<	0	0
Methylcyclohexan	108 - 87 - 2	a	1	<	<	0	0
Alkane Nonan-Tetradekan			30	<	<	2000	200
Summe Aliphaten				43,3	43,8	0	0
1-Hepten	592 - 76 - 7	a	1	<	<	0	0
1-Okten	111 - 66 - 0	a	1	<	<	0	0
1-Nonen	124 - 11 - 8	a	1	<	<	0	0
1-Deken	872 - 05 - 9	a	1	<	<	0	0
1-Undeken	821 - 95 - 4	a	1	<	<	0	0
1-Dodeken	112 - 41 - 4	a	1	<	<	0	0
1-Trideken	2437 - 56 - 1	a	1	<	<	0	0
trimeres Isobuten	7756 - 94 - 7	a	1	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 11

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 1.11 µg/m³	24.09.21 2.12 µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Vinylcyclohexen	100 - 40 - 3	a	1	<	<	0	0
Isododekene		a	20	<	<	0	0
Summe Alkene				<	<	2000	200
Benzol	71 - 43 - 2	a	1	<	<	0	0
Toluol	108 - 88 - 3	a	1	1,2	1,4	3000	300
Ethylbenzol	100 - 41 - 4	a	1	<	1,6	2000	200
m/p-Xylol	108 - 38 - 3 # 106 - 42 - 3		1	2,1	4,7	0	0
o-Xylol	95 - 47 - 6	a	1	1	2,1	0	0
Xylole				3,1	6,8	800	100
n-Propylbenzol	103 - 65 - 1	a	1	<	<	0	0
iso-Propylbenzol	98 - 82 - 8	a	1	<	<	0	0
1,2,3-Trimethylbenzol	526 - 73 - 8	a	1	2,1	2,1	0	0
1,2,4-Trimethylbenzol	95 - 63 - 6	a	1	5,9	5,8	0	0
1,3,5-Trimethylbenzol	108 - 67 - 8	a	1	1,4	1,3	0	0
o-Ethyltoluol	611 - 14 - 3	a	1	1,2	1,2	0	0
m-Ethyltoluol	620 - 14 - 4	a	1	1,8	1,7	0	0
p-Ethyltoluol	622 - 96 - 8	a	1	1	1	0	0
p-Cymol	99 - 87 - 6	a	1	<	<	0	0
1,2,4,5-Tetramethylbenzol	95 - 93 - 2	a	1	<	<	0	0
1,4-Diethylbenzol	105 - 05 - 5	a	1	<	1	0	0
n-Butylbenzol	104 - 51 - 8	a	1	<	<	0	0
1,4-Diisopropylbenzol	100 - 18 - 5	a	1	<	<	0	0
Styrol	100 - 42 - 5	a	1	1,1	1,3	300	30
a-Methylstyrol	98 - 83 - 9	a	1	<	<	0	0
4-Phenylcyclohexen	4994 - 16 - 5	a	1	<	<	0	0
Indan	496 - 11 - 7	a	1	<	<	0	0
Inden	95 - 13 - 6	a	1	<	<	0	0
1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	119 - 64 - 2	a	1	<	<	0	0
Naphthalin	91 - 20 - 3	a	1	<	<	0	0
1-Methylnaphthalin	90 - 12 - 0	a	0,5	<	<	0	0
2-Methylnaphthalin	91 - 57 - 6	a	0,5	<	<	0	0
Dimethylnaphthaline		a	0,5	<	<	0	0
Acenaphthen	208 - 96 - 8	a	0,2	<	<	0	0
Acenaphthylen	83 - 32 - 9	a	0,2	<	<	0	0
Fluoren	86 - 73 - 7		0,2	<	<	0	0
Phenanthren	85 - 01 - 8		0,2	<	<	0	0
Anthracen	102 - 12 - 7		0,2	<	<	0	0
Diisopropylnaphthaline	38640 - 62 - 9		2	<	<	0	0
Naphthalin UBA				<	<	30	10

Fortsetzung Tabelle 11

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 1.11 µg/m³	24.09.21 2.12 µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Summe C9-C15-Alkylbenzole				13,4	14,1	1000	100
Summe Aromaten				18,8	25,2	0	0
Methylacetat	79 - 20 - 9		2	6,6	6,8	0	0
Ethylacetat	141 - 78 - 6		1	7,8	7,5	6000	600
Propylacetat	109 - 60 - 4	a	1	<	<	0	0
Isopropylacetat	108 - 21 - 4	a	1	<	<	0	0
n-Butylacetat	123 - 86 - 4	a	1	2,7	10	0	0
iso-Butylacetat	110 - 19 - 0	a	1	<	<	0	0
2-Ethylhexylacetat	103 - 09 - 3	a	1	<	<	0	0
n-Butylformiat	592 - 84 - 7	a	1	<	<	0	0
Methylacrylat	96 - 33 - 3	a	1	<	<	0	0
n-Butylacrylat	141 - 32 - 5	a	1	<	<	0	0
2-Ethylhexylacrylat	103 - 11 - 7	a	1	<	<	0	0
Methylmethacrylat	80 - 62 - 6	a	1	<	<	2100	1100
Methylbenzoat	93 - 58 - 3	a	1	<	<	0	0
Bernsteinsäuredimethylester	106 - 65 - 0	a	1	<	<	0	0
Glutarsäuredimethylester	1119 - 40 - 0	a	1	<	<	0	0
Adipinsäuredimethylester	627 - 93 - 0		1	<	<	0	0
Bernsteinsäurediisobutylester	925 - 06 - 4	a	1	<	<	0	0
Glutarsäurediisobutylester	71195 - 64 - 7	a	1	<	<	0	0
Adipinsäurediisobutylester	141 - 04 - 8		1	9,8	<	0	0
Maleinsäuredibutylester	105 - 76 - 0	a	1	<	<	0	0
Dimethylphthalat	131 - 11 - 3	a	1	<	<	0	0
Diethylphthalat	84 - 66 - 2		1	1	<	0	0
Dibutylphthalat	84 - 74 - 2		1	<	<	0	0
Diisobutylphthalat	84 - 69 - 5		1	1,4	<	0	0
Summe Ester				29,3	24,3	0	0
Aceton	67 - 64 - 1		2	66	99	16000 0	53000
Methylethylketon	78 - 93 - 3	a	1	1	3,8	0	0
2-Pentanon	107 - 87 - 9	a	1	4,4	12	0	0
Methylbutylketon	591 - 78 - 6	a	1	<	<	0	0
Methylisobutylketon	108 - 10 - 1	a	1	<	<	1000	100
2-Heptanon	110 - 43 - 0	a	1	<	<	0	0
3-Heptanon	106 - 35 - 4	a	1	<	<	0	0
2-Oktanon	111 - 13 - 7	a	1	<	<	0	0
Cyclohexanon	108 - 94 - 1	a	1	<	<	0	0
Acetophenon	98 - 86 - 2	a	1	<	<	0	0
Summe Ketone				71,4	114,8	0	0
1-Propanol	71 - 23 - 8		2	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 11

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 1.11 µg/m³	24.09.21 2.12 µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
2-Propanol	67 - 63 - 0		2	3,2	9,4		
1-Butanol	71 - 36 - 3	a	1	4,8	13	2000	700
iso-Butanol	78 - 83 - 1	a	1	6,9	9,9		
1-Pentanol	71 - 41 - 0	a	1	1	2,3	0	0
1-Hexanol	111 - 27 - 3	a	1	<	<	0	0
2-Ethylhexanol	104 - 76 - 7	a	1	1,1	2,4	1000	100
1-Nonanol	143 - 08 - 8	a	2	<	<		
1-Dekanol	112 - 30 - 1	a	2	<	<		
Benzylalkohol	100 - 51 - 6	a	1	10	14	4000	400
Phenol	108 - 95 - 2	a	1	<	<	200	20
o-Kresol	95 - 48 - 7	a	1	<	<	0	0
m/p-Kresol	108 - 39 - 4 # 106 - 44 - 5	a	1	<	<	0	0
Kresole				<	<	50	5
2,6-Di-tert.-butyl-4-methylphenol	128 - 37 - 0	a	1	<	<	0	0
Summe Alkohole				27	51	0	0
Ethylenglykol	107 - 21 - 1	a	10	<	<	0	0
2-Methoxyethanol	109 - 86 - 4	a	2	<	<	200	20
2-Ethoxyethanol	110 - 80 - 5	a	2	<	<	1000	100
2-Butoxyethanol	111 - 76 - 2	a	2	2	2,6	1000	100
2-Hexoxyethanol	112 - 25 - 4	a	2	<	<	0	0
2-Phenoxyethanol	122 - 99 - 6	a	2	<	<	100	30
2-Methoxyethylacetat	110 - 49 - 6	a	1	<	<	0	0
2-Ethoxyethylacetat	111 - 15 - 9	a	1	<	<	2000	200
2-Butoxyethylacetat	112 - 07 - 2	a	1	<	<	2000	200
Diethylenglykol	111 - 46 - 6	a	10	<	<	0	0
2-Methoxyethoxyethanol	111 - 77 - 3	a	3	<	<	6000	2000
2-Ethoxyethoxyethanol	111 - 90 - 0	a	3	<	<	2000	700
2-Butoxyethoxyethanol	112 - 34 - 5	a	3	<	<	1000	400
Diethylenglykoldimethylether	111 - 96 - 6	a	1	<	<	6000	2000
Ethyldiglykolacetat	112 - 15 - 2	a	1	<	<	0	0
Butyldiglykolacetat	124 - 17 - 4	a	1	<	<	0	0
Triethylenglykolbutylether	143 - 22 - 6	a	3	<	<	0	0
Triethylenglykoldimethylether	112 - 49 - 2	a	2	<	<	0	0
Propylenglykol (Propan-1,2-diol)	57 - 55 - 6	a	10	<	<	600	60
1-Methoxy-2-propanol	107 - 98 - 2	a	2	<	<	10000	1000
1-Ethoxy-2-propanol	1569 - 02 - 4	a	2	<	<	3000	300
1-Butoxy-2-propanol	5131 - 66 - 8	a	2	<	<	0	0
1-Tert.-Butoxy-2-propanol	57018 - 52 - 7	a	2	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 11

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 1.11 µg/m³	24.09.21 2.12 µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
1-Phenoxypropanol	770 - 35 - 4	a	2	<	<	0	0
1-Methoxy-2-propylacetat	108 - 65 - 6	a	1	<	1	0	0
Dipropylenglykol	25265 - 71 - 8	a	10	<	<	0	0
Dipropylenglykolmonomethylether	34590 - 94 - 8	a	3	3,5	<	7000	2000
Dipropylenglykolmono-n-butylether	29911 - 28 - 2	a	3	<	<	0	0
Tripropylenglykol	24800 - 44 - 0	a	10	<	<	0	0
Tripropylenglykolmonobutylether	55934 - 93 - 5	a	3	<	<	0	0
3-Methoxybutanol-1	2517 - 43 - 3	a	2	<	<	0	0
3-Methoxybutylacetat	4435 - 53 - 4	a	1	<	<	0	0
Texanol	25265 - 77 - 4	a	2	<	<	0	0
TXIB	6846 - 50 - 0	a	1	<	<	0	0
Summe Glykol-Verbindungen				5,5	3,6	0	0
Trichlormethan	67 - 66 - 3	a	1	<	<	0	0
Tetrachlormethan	56 - 23 - 5	a	1	<	<	0	0
1,2-Dichlorethan	107 - 06 - 2	a	1	<	<	0	0
1,1,1-Trichlorethan	71 - 55 - 6	a	1	<	<	0	0
Trichlorethen	79 - 01 - 6	a	1	<	<	0	0
Tetrachlorethen	127 - 18 - 4	a	1	<	<	1000	100
Chlorbenzol	108 - 90 - 7	a	1	<	<	0	0
1,2-Dichlorbenzol	95 - 50 - 1	a	1	<	<	0	0
1,3-Dichlorbenzol	541 - 73 - 1	a	1	<	<	0	0
1,4-Dichlorbenzol	106 - 46 - 7	a	1	<	<	0	0
1-Chloraphthalin	90 - 13 - 1	a	1	<	<	0	0
Summe Halogen-KW				<	<	0	0
Limonen	138 - 86 - 3	a	1	<	<	0	0
Menthol	89 - 78 - 1	a	1	<	<	0	0
a-Terpinen	99 - 86 - 5	a	1	<	<	0	0
g-Terpinen	99 - 85 - 4	a	1	<	<	0	0
a-Terpineol	98 - 55 - 5	a	1	<	<	0	0
Terpinolen	586 - 62 - 9	a	1	<	<	0	0
Borneol	507 - 70 - 0	a	1	<	<	0	0
Bornylacetat	5655 - 61 - 8	a	1	<	<	0	0
Camphen	79 - 92 - 5	a	1	<	<	0	0
Campher	76 - 22 - 2	a	1	<	<	0	0
3-Caren	13466 - 78 - 9	a	1	<	<	0	0
Eukalyptol	470 - 82 - 6	a	1	<	<	0	0
a-Pinen	80 - 56 - 8	a	1	<	2,4	0	0
b-Pinen	127 - 91 - 3	a	1	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 11

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 1.11 µg/m³	24.09.21 2.12 µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
b-Caryophyllen	87 - 44 - 5	a	1	<	<	0	0
Longifolen	475 - 20 - 7	a	1	<	<	0	0
b-Linalool	78 - 70 - 6	a	1	<	<	0	0
Linalylacetat	115 - 95 - 7	a	1	<	<	0	0
b-Myrcen	123 - 35 - 3	a	1	<	<	0	0
Summe monocyclische Terpene				<	<	10000	1000
Summe bicyclische Terpene				<	2,4	2000	200
Summe Terpene				<	2,4	0	0
Hexamethylcyclotrisiloxan	541 - 05 - 9	a	2	<	<	0	0
Oktamethylcyclotetrasiloxan	556 - 67 - 2	a	2	<	<	0	0
Dekamethylcyclopentasiloxan	541 - 02 - 6	a	2	<	<	0	0
Dodekamethylcyclohexasiloxan	540 - 97 - 6	a	2	<	<	0	0
Summe Siloxane				<	<	4000	400
Acetaldehyd	75 - 07 - 0	a	2	14	22	1000	100
Propanal	123 - 38 - 6	a	2	<	3,3	0	0
Butanal	123 - 72 - 8		1	<	2	0	0
Pentanal	110 - 62 - 3	a	1	1,8	3,3	0	0
Hexanal	66 - 25 - 1	a	1	8	11	0	0
Heptanal	111 - 71 - 7	a	1	1	1,1	0	0
Oktanal	124 - 13 - 0	a	1	1,5	1,5	0	0
Nonanal	124 - 19 - 6	a	1	4,2	2,9	0	0
Dekanal	112 - 31 - 2	a	1	1,1	1,4	0	0
Undekanal	112 - 44 - 7	a	1	<	<	0	0
Methylpropanal	78 - 84 - 2		1	<	<	0	0
3-Methylbutanal	590 - 86 - 3	a	1	2,6	2,3	0	0
2-Ethylhexanal	123 - 05 - 7	a	1	<	<	0	0
Benzaldehyd	100 - 52 - 7	a	1	5,8	9,6	200	20
Acrolein	107 - 02 - 8		1	<	<	0	0
Crotonaldehyd	4170 - 30 - 3	a	1	<	<	0	0
Methacrolein	78 - 85 - 3		1	<	<	0	0
2-Hexenal	6728 - 26 - 3	a	1	<	<	0	0
2-Heptenal	2463 - 63 - 0	a	1	<	<	0	0
2-Oktenal	2548 - 87 - 0	a	1	<	<	0	0
2-Nonenal	18829 - 56 - 6	a	1	<	<	0	0
2-Dekenal	3913 - 71 - 1	a	1	<	<	0	0
Furfural	98 - 01 - 1	a	1	<	<	100	10
Summe Alkanale C4-C11				20,2	25,5	2000	100
Summe Aldehyde				40	60,4	0	0
Essigsäure	64 - 19 - 7	a	10	24	11	0	0

Fortsetzung Tabelle 11

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 1.11 µg/m³	24.09.21 2.12 µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Propionsäure	79 - 09 - 4	a	5	<	<	0	0
Butansäure	107 - 92 - 6	a	5	<	<	0	0
Pentansäure	109 - 52 - 4	a	5	<	<	0	0
Hexansäure	142 - 62 - 1	a	5	<	<	0	0
Heptansäure	111 - 14 - 8	a	5	<	<	0	0
Oktansäure	124 - 07 - 2	a	5	<	<	0	0
Nonansäure	112 - 05 - 0	a	5	<	<	0	0
Dekansäure	334 - 48 - 5	a	5	<	<	0	0
2-Ethylhexansäure	149 - 57 - 5	a	5	<	<	0	0
Summe Carbonsäuren				24	11	0	0
Tetrahydrofuran	109 - 99 - 9		1	<	<	0	0
2-Methylfuran	534 - 22 - 5	a	1	<	<	0	0
2-Pentylfuran	3777 - 69 - 3	a	1	<	<	0	0
Dioxan	123 - 91 - 1		1	<	<	0	0
tert.-Butylmethylether	1634 - 04 - 4		1	<	<	0	0
Dibutoxymethan	2568 - 90 - 3	a	1	<	<	0	0
Diethylcarbonat	105 - 58 - 8	a	2	<	<	0	0
N-Methylpyrrolidon	872 - 50 - 4	a	2	<	<	1000	100
Butanonoxim	96 - 29 - 7	a	1	<	<	60	20
Acetonoxim	127 - 06 - 0	a	1	<	<	0	0
Pentanonoxim	623 - 40 - 5	a	1	7,3	6,3	0	0
Caprolactam	105 - 60 - 2	a	2	<	<	0	0
Dimethylformamid	68 - 12 - 2	a	2	<	<	0	0
Dimethylacetamid	127 - 19 - 5	a	2	<	<	0	0
Benzothiazol	95 - 16 - 9	a	1	<	<	-	15000 (v)
Methyl-Isothiazolinon	2682 - 20 - 4	a	1	<	<		
Tris-2-chlorethyl-phosphat	115 - 96 - 8		1	<	<		
Summe Sonstige				7,3	6,3	0	0
TVOC16000	nach DIN ISO 16000-6			332	310	0	0
TVOC	nach UBA			220,8	279,8	10000	300
VVOC				103,9	161	0	0
VOCid				156,8	192,8	0	0
SVOC				12,2	0	0	0
Formaldehyd	50 - 00 - 0	a	2	6,3	11	n.a.	100
Dichlormethan	75 - 09 - 2		5	unauffällig	unauffällig	2000	200
2-Chlorpropan	75 - 29 - 6		5	unauffällig	unauffällig	8000	800
BG: Bestimmungsgrenze, v: vorläufig							

Raum 3.01 Worst-Case Messung ohne Lüftungsanlage im Vergleich zur 1,5 Std. Messung nach 10 Minuten Lüftung

Tabelle 12: Raum 3.01

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Hexan	110 - 54 - 3	a	1	1,1	<	0	0
Heptan	142 - 82 - 5	a	1	1,3	<	0	0
Oktan	111 - 65 - 9	a	1	2	1,1	0	0
Nonan	111 - 84 - 2	a	1	3,1	1,5	0	0
Dekan	124 - 18 - 5	a	1	19	10	0	0
Undekan	1120 - 21 - 4	a	1	22	12	0	0
Dodekan	112 - 40 - 3	a	1	13	7,4	0	0
Tridekan	629 - 50 - 5	a	1	18	10	0	0
Tetradekan	629 - 59 - 4	a	1	3,4	1,8	0	0
Pentadekan	629 - 62 - 9	a	1	1,1	<	0	0
Hexadekan	544 - 76 - 3	a	1	1	1,1	0	0
Heptadekan	629 - 78 - 7		1	<	<	0	0
Oktadekan	593 - 45 - 3		1	<	<	0	0
Nonadekan	629 - 92 - 5		1	<	<	0	0
2-Methylpentan	107 - 83 - 5		1	<	<	0	0
3-Methylpentan	96 - 14 - 0		1	<	<	0	0
2-Methylhexan	591 - 76 - 4	a	1	<	<	0	0
3-Methylhexan	589 - 34 - 4	a	1	<	<	0	0
2,3-Dimethylpentan	565 - 59 - 3	a	1	<	<	0	0
2,2,4-Trimethylpentan	540 - 84 - 1	a	1	<	<	0	0
2,3-Dimethylheptan	3074 - 71 - 3	a	1	<	<	0	0
Pentamethylheptan	13475 - 82 - 6	a	1	<	<	0	0
Heptamethylnonan	4390 - 04 - 9	a	1	<	<	0	0
Methylcyclopentan	96 - 37 - 7	a	1	<	<	0	0
Cyclohexan	110 - 82 - 7	a	1	2,4	<	0	0
Methylcyclohexan	108 - 87 - 2	a	1	<	<	0	0
Alkane Nonan-Tetradekan			30	127,5	<	2000	200
Summe Aliphaten				136,4	44,9	0	0
1-Hepten	592 - 76 - 7	a	1	<	<	0	0
1-Okten	111 - 66 - 0	a	1	<	<	0	0
1-Nonen	124 - 11 - 8	a	1	<	<	0	0
1-Deken	872 - 05 - 9	a	1	<	<	0	0
1-Undeken	821 - 95 - 4	a	1	<	<	0	0
1-Dodeken	112 - 41 - 4	a	1	<	<	0	0
1-Trideken	2437 - 56 - 1	a	1	<	<	0	0
trimeres Isobuten	7756 - 94 - 7	a	1	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 12

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Vinylcyclohexen	100 - 40 - 3	a	1	<	<	0	0
Isododekene		a	20	<	<	0	0
Summe Alkene				<	<	2000	200
Benzol	71 - 43 - 2	a	1	4,5	<	0	0
Toluol	108 - 88 - 3	a	1	2,7	1,5	3000	300
Ethylbenzol	100 - 41 - 4	a	1	2,6	1,2	2000	200
m/p-Xylol	108 - 38 - 3 # 106 - 42 - 3		1	7,9	3,6	0	0
o-Xylol	95 - 47 - 6	a	1	3,7	1,8	0	0
Xylole				11,6	5,4	800	100
n-Propylbenzol	103 - 65 - 1	a	1	1	<	0	0
iso-Propylbenzol	98 - 82 - 8	a	1	<	<	0	0
1,2,3-Trimethylbenzol	526 - 73 - 8	a	1	2,9	1,4	0	0
1,2,4-Trimethylbenzol	95 - 63 - 6	a	1	8,4	4,2	0	0
1,3,5-Trimethylbenzol	108 - 67 - 8	a	1	1,9	1	0	0
o-Ethyltoluol	611 - 14 - 3	a	1	1,8	<	0	0
m-Ethyltoluol	620 - 14 - 4	a	1	2,8	1,3	0	0
p-Ethyltoluol	622 - 96 - 8	a	1	1,4	<	0	0
p-Cymol	99 - 87 - 6	a	1	<	<	0	0
1,2,4,5-Tetramethylbenzol	95 - 93 - 2	a	1	<	<	0	0
1,4-Diethylbenzol	105 - 05 - 5	a	1	1,4	<	0	0
n-Butylbenzol	104 - 51 - 8	a	1	1,2	<	0	0
1,4-Diisopropylbenzol	100 - 18 - 5	a	1	<	<	0	0
Styrol	100 - 42 - 5	a	1	2,1	1	300	30
a-Methylstyrol	98 - 83 - 9	a	1	<	<	0	0
4-Phenylcyclohexen	4994 - 16 - 5	a	1	<	<	0	0
Indan	496 - 11 - 7	a	1	<	<	0	0
Inden	95 - 13 - 6	a	1	<	<	0	0
1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin	119 - 64 - 2	a	1	1,1	<	0	0
Naphthalin	91 - 20 - 3	a	1	<	<	0	0
1-Methylnaphthalin	90 - 12 - 0	a	0,5	<	<	0	0
2-Methylnaphthalin	91 - 57 - 6	a	0,5	<	<	0	0
Dimethylnaphthaline		a	0,5	<	<	0	0
Acenaphthen	208 - 96 - 8	a	0,2	<	<	0	0
Acenaphthylen	83 - 32 - 9	a	0,2	<	<	0	0
Fluoren	86 - 73 - 7		0,2	<	<	0	0
Phenanthren	85 - 01 - 8		0,2	<	<	0	0
Anthracen	102 - 12 - 7		0,2	<	<	0	0
Diisopropylnaphthaline	38640 - 62 - 9		2	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 12

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Naphthalin UBA				<	<	30	10
Summe C9-C15-Alkylbenzole				22,8	7,9	1000	100
Summe Aromaten				47,4	17	0	0
Methylacetat	79 - 20 - 9		2	31	14	0	0
Ethylacetat	141 - 78 - 6		1	13	6,2	6000	600
Propylacetat	109 - 60 - 4	a	1	<	<	0	0
Isopropylacetat	108 - 21 - 4	a	1	<	<	0	0
n-Butylacetat	123 - 86 - 4	a	1	13	6,8	0	0
iso-Butylacetat	110 - 19 - 0	a	1	<	<	0	0
2-Ethylhexylacetat	103 - 09 - 3	a	1	<	<	0	0
n-Butylformiat	592 - 84 - 7	a	1	<	<	0	0
Methylacrylat	96 - 33 - 3	a	1	<	<	0	0
n-Butylacrylat	141 - 32 - 5	a	1	<	<	0	0
2-Ethylhexylacrylat	103 - 11 - 7	a	1	<	<	0	0
Methylmethacrylat	80 - 62 - 6	a	1	<	<	2100	1100
Methylbenzoat	93 - 58 - 3	a	1	<	<	0	0
Bernsteinsäuredimethylester	106 - 65 - 0	a	1	<	<	0	0
Glutarsäuredimethylester	1119 - 40 - 0	a	1	<	<	0	0
Adipinsäuredimethylester	627 - 93 - 0		1	<	<	0	0
Bernsteinsäurediisobutylester	925 - 06 - 4	a	1	<	<	0	0
Glutarsäurediisobutylester	71195 - 64 - 7	a	1	<	<	0	0
Adipinsäurediisobutylester	141 - 04 - 8		1	17	13	0	0
Maleinsäuredibutylester	105 - 76 - 0	a	1	<	<	0	0
Dimethylphthalat	131 - 11 - 3	a	1	<	<	0	0
Diethylphthalat	84 - 66 - 2		1	2,6	<	0	0
Dibutylphthalat	84 - 74 - 2		1	<	<	0	0
Diisobutylphthalat	84 - 69 - 5		1	<	<	0	0
Summe Ester				76,6	40	0	0
Aceton	67 - 64 - 1		2	177	93	16000 0	53000
Methylethylketon	78 - 93 - 3	a	1	5,1	2,5	0	0
2-Pentanon	107 - 87 - 9	a	1	36	20	0	0
Methylbutylketon	591 - 78 - 6	a	1	<	<	0	0
Methylisobutylketon	108 - 10 - 1	a	1	1,6	<	1000	100
2-Heptanon	110 - 43 - 0	a	1	<	<	0	0
3-Heptanon	106 - 35 - 4	a	1	<	<	0	0
2-Oktanon	111 - 13 - 7	a	1	<	<	0	0
Cyclohexanon	108 - 94 - 1	a	1	<	<	0	0
Acetophenon	98 - 86 - 2	a	1	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 12

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Summe Ketone				219,7	115,5	0	0
1-Propanol	71 - 23 - 8		2	2,5	<	0	0
2-Propanol	67 - 63 - 0		2	28	18		
1-Butanol	71 - 36 - 3	a	1	39	22	2000	700
iso-Butanol	78 - 83 - 1	a	1	59	30		
1-Pentanol	71 - 41 - 0	a	1	3,9	2,4	0	0
1-Hexanol	111 - 27 - 3	a	1	<	<	0	0
2-Ethylhexanol	104 - 76 - 7	a	1	3,1	2,3	1000	100
1-Nonanol	143 - 08 - 8	a	2	<	<		
1-Dekanol	112 - 30 - 1	a	2	<	<		
Benzylalkohol	100 - 51 - 6	a	1	19	14	4000	400
Phenol	108 - 95 - 2	a	1	<	<	200	20
o-Kresol	95 - 48 - 7	a	1	<	<	0	0
m/p-Kresol	108 - 39 - 4 # 106 - 44 - 5	a	1	<	<	0	0
Kresole				<	<	50	5
2,6-Di-tert.-butyl-4-methylphenol	128 - 37 - 0	a	1	<	<	0	0
Summe Alkohole				154,5	88,7	0	0
Ethylenglykol	107 - 21 - 1	a	10	<	<	0	0
2-Methoxyethanol	109 - 86 - 4	a	2	<	<	200	20
2-Ethoxyethanol	110 - 80 - 5	a	2	<	<	1000	100
2-Butoxyethanol	111 - 76 - 2	a	2	5,8	3,5	1000	100
2-Hexoxyethanol	112 - 25 - 4	a	2	<	<	0	0
2-Phenoxyethanol	122 - 99 - 6	a	2	<	<	100	30
2-Methoxyethylacetat	110 - 49 - 6	a	1	<	<	0	0
2-Ethoxyethylacetat	111 - 15 - 9	a	1	<	<	2000	200
2-Butoxyethylacetat	112 - 07 - 2	a	1	<	<	2000	200
Diethylenglykol	111 - 46 - 6	a	10	<	<	0	0
2-Methoxyethoxyethanol	111 - 77 - 3	a	3	<	<	6000	2000
2-Ethoxyethoxyethanol	111 - 90 - 0	a	3	<	<	2000	700
2-Butoxyethoxyethanol	112 - 34 - 5	a	3	<	<	1000	400
Diethylenglykoldimethylether	111 - 96 - 6	a	1	<	<	6000	2000
Ethylidiglykolacetat	112 - 15 - 2	a	1	<	<	0	0
Butyldiglykolacetat	124 - 17 - 4	a	1	<	<	0	0
Triethylenglykolbutylether	143 - 22 - 6	a	3	<	<	0	0
Triethylenglykoldimethylether	112 - 49 - 2	a	2	<	<	0	0
Propylenglykol (Propan-1,2-diol)	57 - 55 - 6	a	10	<	<	600	60
1-Methoxy-2-propanol	107 - 98 - 2	a	2	2,9	3,3	10000	1000
1-Ethoxy-2-propanol	1569 - 02 - 4	a	2	<	<	3000	300

Fortsetzung Tabelle 12

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
1-Butoxy-2-propanol	5131 - 66 - 8	a	2	<	<	0	0
1-Tert.-Butoxy-2-propanol	57018 - 52 - 7	a	2	<	<	0	0
1-Phenoxypropanol	770 - 35 - 4	a	2	<	<	0	0
1-Methoxy-2-propylacetat	108 - 65 - 6	a	1	1,3	<	0	0
Dipropylenglykol	25265 - 71 - 8	a	10	<	<	0	0
Dipropylenglykolmonomethylether	34590 - 94 - 8	a	3	<	<	7000	2000
Dipropylenglykolmono-n-butylether	29911 - 28 - 2	a	3	<	<	0	0
Tripropylenglykol	24800 - 44 - 0	a	10	<	<	0	0
Tripropylenglykolmonobutylether	55934 - 93 - 5	a	3	<	<	0	0
3-Methoxybutanol-1	2517 - 43 - 3	a	2	2,9	2	0	0
3-Methoxybutylacetat	4435 - 53 - 4	a	1	<	<	0	0
Texanol	25265 - 77 - 4	a	2	<	<	0	0
TXIB	6846 - 50 - 0	a	1	<	<	0	0
Summe Glykol-Verbindungen				12,9	8,8	0	0
Trichlormethan	67 - 66 - 3	a	1	<	<	0	0
Tetrachlormethan	56 - 23 - 5	a	1	<	<	0	0
1,2-Dichlorethan	107 - 06 - 2	a	1	<	<	0	0
1,1,1-Trichlorethan	71 - 55 - 6	a	1	<	<	0	0
Trichlorethen	79 - 01 - 6	a	1	<	<	0	0
Tetrachlorethen	127 - 18 - 4	a	1	<	<	1000	100
Chlorbenzol	108 - 90 - 7	a	1	<	<	0	0
1,2-Dichlorbenzol	95 - 50 - 1	a	1	<	<	0	0
1,3-Dichlorbenzol	541 - 73 - 1	a	1	<	<	0	0
1,4-Dichlorbenzol	106 - 46 - 7	a	1	<	<	0	0
1-Chlornaphthalin	90 - 13 - 1	a	1	<	<	0	0
Summe Halogen-KW				<	<	0	0
Limonen	138 - 86 - 3	a	1	1,1	<	0	0
Menthol	89 - 78 - 1	a	1	<	<	0	0
a-Terpinen	99 - 86 - 5	a	1	<	<	0	0
g-Terpinen	99 - 85 - 4	a	1	<	<	0	0
a-Terpineol	98 - 55 - 5	a	1	<	<	0	0
Terpinolen	586 - 62 - 9	a	1	<	<	0	0
Borneol	507 - 70 - 0	a	1	<	<	0	0
Bornylacetat	5655 - 61 - 8	a	1	<	<	0	0
Camphen	79 - 92 - 5	a	1	<	<	0	0
Campher	76 - 22 - 2	a	1	<	<	0	0
3-Caren	13466 - 78 - 9	a	1	1,4	<	0	0
Eukalyptol	470 - 82 - 6	a	1	<	<	0	0

Fortsetzung Tabelle 12

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
a-Pinen	80 - 56 - 8	a	1	5,2	2,5	0	0
b-Pinen	127 - 91 - 3	a	1	1,1	<	0	0
b-Caryophyllen	87 - 44 - 5	a	1	<	<	0	0
Longifolen	475 - 20 - 7	a	1	<	<	0	0
b-Linalool	78 - 70 - 6	a	1	<	<	0	0
Linalylacetat	115 - 95 - 7	a	1	<	<	0	0
b-Myrcen	123 - 35 - 3	a	1	<	<	0	0
Summe monocyclische Terpene				1,1	<	10000	1000
Summe bicyclische Terpene				7,7	2,5	2000	200
Summe Terpene				8,8	2,5	0	0
Hexamethylcyclotrisiloxan	541 - 05 - 9	a	2	<	<	0	0
Oktamethylcyclotetrasiloxan	556 - 67 - 2	a	2	<	<	0	0
Dekamethylcyclopentasiloxan	541 - 02 - 6	a	2	2	<	0	0
Dodekamethylcyclohexasiloxan	540 - 97 - 6	a	2	<	<	0	0
Summe Siloxane				2	<	4000	400
Acetaldehyd	75 - 07 - 0	a	2	34	16	1000	100
Propanal	123 - 38 - 6	a	2	6	2,7	0	0
Butanal	123 - 72 - 8		1	4	1,5	0	0
Pentanal	110 - 62 - 3	a	1	7,9	3,6	0	0
Hexanal	66 - 25 - 1	a	1	26	14	0	0
Heptanal	111 - 71 - 7	a	1	2,5	1,7	0	0
Oktanal	124 - 13 - 0	a	1	2,8	1,9	0	0
Nonanal	124 - 19 - 6	a	1	5,1	4,7	0	0
Dekanal	112 - 31 - 2	a	1	1,2	<	0	0
Undekanal	112 - 44 - 7	a	1	<	<	0	0
Methylpropanal	78 - 84 - 2		1	1,3	<	0	0
3-Methylbutanal	590 - 86 - 3	a	1	<	<	0	0
2-Ethylhexanal	123 - 05 - 7	a	1	<	<	0	0
Benzaldehyd	100 - 52 - 7	a	1	15	9,9	200	20
Acrolein	107 - 02 - 8		1	<	<	0	0
Crotonaldehyd	4170 - 30 - 3	a	1	<	<	0	0
Methacrolein	78 - 85 - 3		1	<	<	0	0
2-Hexenal	6728 - 26 - 3	a	1	<	<	0	0
2-Heptenal	2463 - 63 - 0	a	1	<	<	0	0
2-Oktenal	2548 - 87 - 0	a	1	<	<	0	0
2-Nonenal	18829 - 56 - 6	a	1	<	<	0	0
2-Dekenal	3913 - 71 - 1	a	1	<	<	0	0
Furfural	98 - 01 - 1	a	1	1,6	1	100	10

Fortsetzung Tabelle 12

Verbindung	CAS-Nr.		BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
Summe Alkanale C4-C11				50,8	27,4	2000	100
Summe Aldehyde				107,4	57	0	0
Essigsäure	64 - 19 - 7	a	10	31	19	0	0
Propionsäure	79 - 09 - 4	a	5	<	<	0	0
Butansäure	107 - 92 - 6	a	5	<	<	0	0
Pentansäure	109 - 52 - 4	a	5	<	<	0	0
Hexansäure	142 - 62 - 1	a	5	<	5,6	0	0
Heptansäure	111 - 14 - 8	a	5	<	<	0	0
Oktansäure	124 - 07 - 2	a	5	<	<	0	0
Nonansäure	112 - 05 - 0	a	5	<	<	0	0
Dekansäure	334 - 48 - 5	a	5	<	<	0	0
2-Ethylhexansäure	149 - 57 - 5	a	5	<	<	0	0
Summe Carbonsäuren				31	24,6	0	0
Tetrahydrofuran	109 - 99 - 9		1	<	<	0	0
2-Methylfuran	534 - 22 - 5	a	1	<	<	0	0
2-Pentylfuran	3777 - 69 - 3	a	1	1,1	<	0	0
Dioxan	123 - 91 - 1		1	1,1	<	0	0
tert.-Butylmethylether	1634 - 04 - 4		1	<	<	0	0
Dibutoxymethan	2568 - 90 - 3	a	1	<	<	0	0
Diethylcarbonat	105 - 58 - 8	a	2	<	<	0	0
N-Methylpyrrolidon	872 - 50 - 4	a	2	<	<	1000	100
Butanonoxim	96 - 29 - 7	a	1	<	<	60	20
Acetonoxim	127 - 06 - 0	a	1	<	<	0	0
Pentanonoxim	623 - 40 - 5	a	1	9,1	5,7	0	0
Caprolactam	105 - 60 - 2	a	2	<	2	0	0
Dimethylformamid	68 - 12 - 2	a	2	<	<	0	0
Dimethylacetamid	127 - 19 - 5	a	2	<	<	0	0
Benzothiazol	95 - 16 - 9	a	1	<	<	-	15000 (v)
Methyl-Isothiazolinon	2682 - 20 - 4	a	1	<	<		
Tris-2-chlorethyl-phosphat	115 - 96 - 8		1	<	<		
Summe Sonstige				11,3	7,7	0	0
TVOC16000	nach DIN ISO 16000-6			665	363	0	0
TVOC	nach UBA			580,6	288,3	10000	300
VVOC				308,8	160	0	0
VOCid				491,6	242,3	0	0
SVOC				19,6	13	0	0
Formaldehyd	50 - 00 - 0	a	2	12	8,6	n.a.	100
Dichlormethan	75 - 09 - 2		5	unauffällig	unauffällig	2000	200

Fortsetzung Tabelle 12

Verbindung	CAS-Nr.	BG	24.09.21 3.01 µg/m³	24.09.21 3.01 (1,5 Std.) µg/m³	RW II µg/m³	RW I µg/m³
2-Chlorpropan	75 - 29 - 6	5	unauffällig	unauffällig	8000	800
BG: Bestimmungsgrenze, v: vorläufig						

TVOC16000: gemäß DIN ISO16000-6 bei Quantifizierung mit GCMS anstatt FID (Signal >1 µg/m³).

TVOC ist der TVOC nach UBA: Summe von VOC_{id} + VOC_{un}, wobei VOC_{id} die Summe der quantifizierten Verbindungen und VOC und die Summe der nicht identifizierten Verbindungen, quantifiziert als Toluol-Äquivalent ist (>1 µg/m³).

VVOC: Summe Retentionszeit vor Hexan

SVOC: Summe Retentionszeit nach Hexadekan

Nonan-Tetradekan: Summe der n-Alkane zzgl. der Isoaliphaten, wenn diese im Retentionszeitbereich auffällig. Isoaliphaten quantifiziert anhand Dodekan im TIC, nur semiquantitative Angabe. Isododekene anhand 1-Dodeken quantifiziert, nur semiquantitative Angabe.

C9-C15-Alkylbenzole: quantifiziert anhand Butylbenzol im TIC, nur semiquantitative Angabe.

Bei Nonan-Tetradekan und C9-C15-Alkylbenzolen wurden über alle Signale aufsummiert.

Bei ca.-Angabe wurde die Verbindung anhand einer vergleichbaren Verbindung quantifiziert.

Die Summen berücksichtigen nur die oberhalb angegebenen Einzelverbindungen einer Verbindungsklasse.

Verbindungsklasse, Teilsummen sind nicht enthalten und nur informativ (Ausnahme Alkane Nonan-Tetradekan).

Dichlormethan und Chlorpropan nur qualitativ/semiquantitativ.

4.1.2.2 Durchführung der Analytik

Das Adsorber-Material TENAX wird nach Thermodesorption mit gekoppelter Gaschromatographie-Massenspektrometrie (MARKES TD100-xr, Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra bzw. Shimadzu GC-MS-QP2020, 60 m Säule) vermessen. Zur Übersichtsanalyse (Screening) wurde die Messung im Scan-Modus aufgenommen und die angegebenen Substanzen mit externen Standards quantifiziert. Die Durchführung erfolgte nach dem akkreditierten Verfahren a DIN EN ISO 16000-6:2012-11. Die Messunsicherheit der Analytik ohne Probenahme liegt bei 26 %. Diese gemittelte Messunsicherheit wurde über ein kombiniertes Verfahren mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ berechnet.

Aufgrund prinzipieller analytischer Gegebenheiten sind die Konzentrationen der kürzeren Carbonsäuren sowie der sehr polaren Verbindungen mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet. Niedrige Konzentrationen von Essigsäure besitzen aufgrund einer Blindwertproblematik ebenso eine erhöhte Unsicherheit.

Im Rahmen der Untersuchung wurde für die Probenahme mit TENAX ein Feldblindwert mit analysiert. Die ermittelten Konzentrationen wurden über das Auswerteprogramm sowohl bei den Einzelverbindungen wie auch bei dem TVOC direkt von den Messwerten abgezogen, sodass die erhaltenen Luftkonzentrationen blindwertkorrigiert sind.

Zur Bestimmung der sehr leichtflüchtigen Aldehyde wurde das Adsorber-Material (mit 2,4-Dinitrophenyl-hydrazin DNPH dotiertes Silikagel) mit Desorptionsmittel (Acetonitril) versetzt und die Lösung mittels HPLC-DAD (Shimadzu HPLC LC10vp) vermessen. Die Quantifizierung erfolgte mit internen und externen Standards. Die Durchführung erfolgte nach dem akkreditierten Verfahren a DIN EN ISO 16000-3:2013-01. Für die gesättigten und kurzkettigen ungesättigten und aromatischen Aldehyde sowie Ketone liegt die Messunsicherheit ohne Probenahme bei 15 %. Diese gemittelte Messunsicherheit wurde über ein kombiniertes Verfahren mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ berechnet.

4.1.2.3 Probenahmebedingungen

Die Probenahmebedingungen sind in der Tabelle 13 bis Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 13: Probenahmebedingungen Raum 2.12 (vor ca. 8 Stunden)

Wetterlage:	keine Bewölkung	Wind:	gering
Luftdruck:	984 hPa	Außentemperatur:	11,2 °C
		Außenfeuchtigkeit:	85 % r.F.
Kundenprobennummer:	P12-1; P12-3		
Objekt:	BV Freie Waldorfschule Uhlandshöhe; 1.OG, Raum 2.12		
Probenahmestelle:	Raummitte		
Probenahmehöhe:	1,5 m	Temperatur:	23,5 °C
Probenehmer:	W. Bothe	Luftfeuchtigkeit:	45,7 % r.F.
RLT-Anlage:	ja	Vorgabe Lüftungszyklus:	-
letzte Lüftung:	vor ca. 8 Stunden		
Bemerkung:	-		

Probenahme	Tenax	DNPH-Kartusche	Silikagel	Qualitätsinformation:
Probennummer:	E109689/1	E109689/2	-	Kontrolle TENAX:
Datum:	24.09.2021	24.09.2021	-	ok
Beginn [Uhr]:	07:36	07:35	-	Bedingung TENAX:
Ende [Uhr]:	07:56	08:17	-	Realliter
Dauer [min]:	20min 0sec	42	-	Messung nach
Luftmenge [Liter]:	1,92	55,0	-	Lüftungsvorgaben
Sammelrate [l/min]:	0,100	1,3	-	von ISO 16000:
Röhrchen-Nummer:	308292	13649303	-	ja
Blindwert-Nummer:	320191	-	-	Flußkontrolle DNPH:
Probenahmegerät:	INV 401111	07	-	ja

Tabelle 14: Probenahmebedingungen Raum 1.11 (vor ca. 8 Stunden)

Wetterlage:	keine Bewölkung	Wind:	gering
Luftdruck:	986 hPa	Außentemperatur:	11,2 °C
		Außenfeuchtigkeit:	80 % r.F.
Kundenprobennummer:	P11-1; P11-3		
Objekt:	BV Freie Waldorfschule Uhlandshöhe; EG, Raum 1.11		
Probenahmestelle:	Raummitte		
Probenahmehöhe:	1,5 m	Temperatur:	22,1 °C
Probennehmer:	W. Bothe	Luftfeuchtigkeit:	46,3 % r.F.
RLT-Anlage:	ja	Vorgabe Lüftungszyklus:	-
letzte Lüftung:	vor ca. 8 Stunden		
Bemerkung:	-		

Probenahme	Tenax	DNPH-Kartusche	Silikagel	Qualitätsinformation:
Probennummer:	E109689/3	E109689/4	-	Kontrolle TENAX:
Datum:	24.09.2021	24.09.2021	-	ok
Beginn [Uhr]:	05:35	05:35	-	Bedingung TENAX:
Ende [Uhr]:	05:55	06:19	-	Realliter
Dauer [min]:	20min 0sec	44	-	Messung nach
Luftmenge [Liter]:	1,93	55,0	-	Lüftungsvorgaben
Sammelrate [l/min]:	0,100	1,3	-	von ISO 16000:
Röhrchen-Nummer:	308226	13649303	-	ja
Blindwert-Nummer:	320243	-	-	Flußkontrolle DNPH:
Probenahmegerät:	INV 401111	07	-	ja

Tabelle 15: Probenahmebedingungen Raum 3.01 (vor ca. 8 Stunden)

Wetterlage:	keine Bewölkung	Wind:	gering
Luftdruck:	986 hPa	Außentemperatur:	12,3 °C
		Außenfeuchtigkeit:	82 % r.F.
Kundenprobennummer:	P3-1; P3-3		
Objekt:	BV Freie Waldorfschule Uhlandshöhe; 2.OG, Raum 3.01		
Probenahmestelle:	Raummitte		
Probenahmehöhe:	1,5 m	Temperatur:	23,7 °C
Probennehmer:	W. Bothe	Luftfeuchtigkeit:	46,2 % r.F.
RLT-Anlage:	nein	Vorgabe Lüftungszyklus:	-
letzte Lüftung:	vor ca. 8 Stunden		
Bemerkung:	-		

Probenahme	Tenax	DNPH-Kartusche	Silikagel	Qualitätsinformation:
Probennummer:	E109689/5	E109689/6	-	Kontrolle TENAX:
Datum:	24.09.2021	24.09.2021	-	ok
Beginn [Uhr]:	06:45	06:44	-	Bedingung TENAX:
Ende [Uhr]:	07:05	07:25	-	Realliter
Dauer [min]:	20min 0sec	41	-	Messung nach
Luftmenge [Liter]:	1,92	55,0	-	Lüftungsvorgaben
Sammelrate [l/min]:	0,100	1,3	-	von ISO 16000:
Röhrchen-Nummer:	450701	13649303	-	ja
Blindwert-Nummer:	308293	-	-	Flußkontrolle DNPH:
Probenahmegerät:	INV 401111	07	-	ja

Tabelle 16: Probenahmebedingungen Raum 3.01 (vor ca. 1 Stunden)

Wetterlage:	-	Wind:	gering
Luftdruck:	986 hPa	Außentemperatur:	12,3 °C
		Außenfeuchtigkeit:	82 % r.F.
Kundenprobennummer:	P3N2; P3N3		
Objekt:	BV Freie Waldorfschule Uhlandshöhe; 2.OG, Raum 3.01		
Probenahmestelle:	Raummitte		
Probenahmehöhe:	1,5 m	Temperatur:	24,3 °C
Probenehmer:	W. Bothe	Luftfeuchtigkeit:	44,8 % r.F.
RLT-Anlage:	nein	Vorgabe Lüftungszyklus:	-
letzte Lüftung:	vor ca. 1 Stunden		
Bemerkung:	-		
Probenahme	Tenax	DNPH-Kartusche	Silikagel
Probennummer:	E109689/7	E109689/8	-
Datum:	24.09.2021	24.09.2021	-
Beginn [Uhr]:	08:50	08:28	-
Ende [Uhr]:	09:10	09:10	-
Dauer [min]:	20min 0sec	42	-
Luftmenge [Liter]:	1,92	55,0	-
Sammelrate [l/min]:	0,100	1,3	-
Röhrchen-Nummer:	320262	14276203	-
Blindwert-Nummer:	308245	-	-
Probenahmegerät:	INV 401111	07	-
Qualitätsinformation:			
Kontrolle TENAX:			
ok			
Bedingung TENAX:			
Realliter			
Messung nach			
Lüftungsvorgaben			
von ISO 16000:			
ja			
Flußkontrolle DNPH:			
ja			

4.1.2.4 Protokolle

Die Protokolle zu den Messungen sind im Anhang C1 - Messprotokolle dokumentiert.

4.1.2.5 Bilddokumentation

Die Bilddokumentation der Messdurchführung sind im Anhang C2 - Bilddokumentation dokumentiert.

4.1.3 Vorbemerkung, Vorgang und Anlagen

Vorbemerkung, Vorgang und Anlagen zum Prüfbericht Innenraumluftqualität sind im Anhang C3 - Vorbemerkung, Anhang C4 - Vorgang und Anhang C5 - Anlagen dokumentiert.

4.2 Raumakustik

Die Raumakustik in den beiden Klassenzimmern (Raum 1.11 und Raum 3.01) wurde mithilfe der Software AcouCheck berechnet. Diese Softwareanwendung wurde speziell zur Messung der Raumakustik in Bildungsbereichen entwickelt [5]. Hierbei wird ein an einem Laptop angeschlossenes externes Mikrofon nach Vorgabe der Software im Raum platziert. Insgesamt werden Messungen an sechs verschiedenen Positionen in jedem Raum durchgeführt, wobei jeweils ein einzelner Klatschton abgespielt wird.



Abbildung 56: Darstellung der einzelnen Messpositionen für die Klassenräume 1.11 (links) und 3.01 (rechts)

4.2.1 Klassenzimmer 1.11

Klassenzimmer 1.11 besitzt eine Bodenfläche von 75 Quadratmetern und eine Deckenhöhe von 4 Metern, was einem Gesamtvolumen von 300 Kubikmetern entspricht.

Abbildung 57 zeigt die Messergebnisse aller Positionen im Klassenzimmer 1.11. Der Durchschnitt aller gemessenen Nachhallzeiten wird zusammen mit den berechneten Zeiten basierend auf der Anzahl der Personen im Raum sowie der Raummaterialität bei verschiedenen Frequenzen im Vergleich zum empfohlenen Bereich aufgezeigt (Abbildung 58 und Tabelle 17). Hierbei ist zu ersehen, dass für alle Frequenzen die Nachhallzeiten innerhalb des empfohlenen Bereichs gemäß DIN 18041:2016 liegen (dunkelgrüne Linie, hellgrüner Bereich).

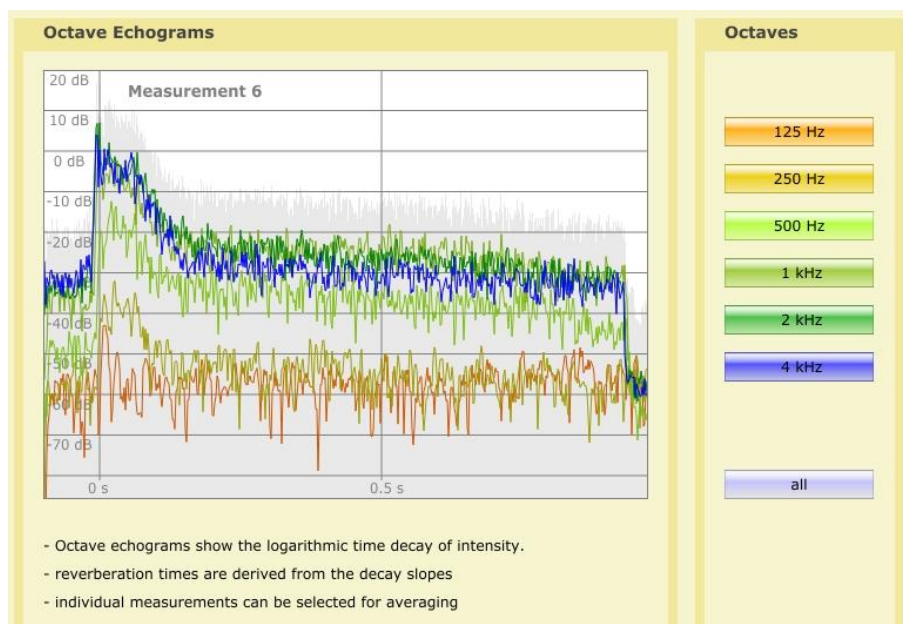


Abbildung 57: Raumakustische Messergebnisse aller Positionen (Klassenraum 1.11)



Abbildung 58: Gemessene und berechnete Nachhallzeiten (Klassenraum 1.11)

Tabelle 17: Gemessene, berechnete und empfohlene Nachhallzeiten (Klassenraum 1.11)

No.	Nachhallzeiten [s] – Getrennte Messungen					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1	--	--	3.61	3.6	2.84	3.56
2	--	--	4.46	4.55	3.59	4.29
3	1.54	1.09	1.39	2.03	2.44	1.44
4	--	--	4.44	4.63	3.36	4.65
5	--	--	4.39	4.29	3.32	3.9
6	--	--	4.47	4.55	3.51	4.13
	Mittlere Nachhallzeiten [s], gemittelt aus den Messungen					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
	1.54	1.09	3.79	3.94	3.18	3.66
	Berechnete Nachhallzeiten inklusive zusätzlicher Absorber					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
	0.82	0.59	0.84	0.81	0.88	0.86
Referenz: DIN 18041:2016 'Sprache / Vortrag'						
	Empfohlene Nachhallzeiten [s] gemäß: 300 m ³					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
empf.	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
max.	1.13	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
min.	0.5	0.62	0.62	0.62	0.62	0.5

4.2.2 Klassenzimmer 3.01

Klassenzimmer 3.01 besitzt eine Bodenfläche von 71,6 Quadratmetern und eine Deckenhöhe von 4,6 Metern, was einem Gesamtvolumen von 330 Kubikmetern entspricht.

Abbildung 59 zeigt das Echogramm aus den sechs Messungen der vorgegebenen Stellen im Klassenzimmer 3.01. Abbildung 60 sowie Tabelle 18 zeigen die Nachhallzeiten basierend auf den Messungen in diesem Klassenzimmer, kalibriert anhand der relevanten Materialien sowie der Anzahl der Personen im Raum. Insgesamt liegen, bis auf die Nachhallzeit bei 250 Hz, die sich gemäß DIN 18041:2016 leicht über dem maximalen Wert befindet, alle Frequenzen innerhalb der empfohlenen Grenzwerte (dunkelgrüne Linie, hellgrüner Bereich).

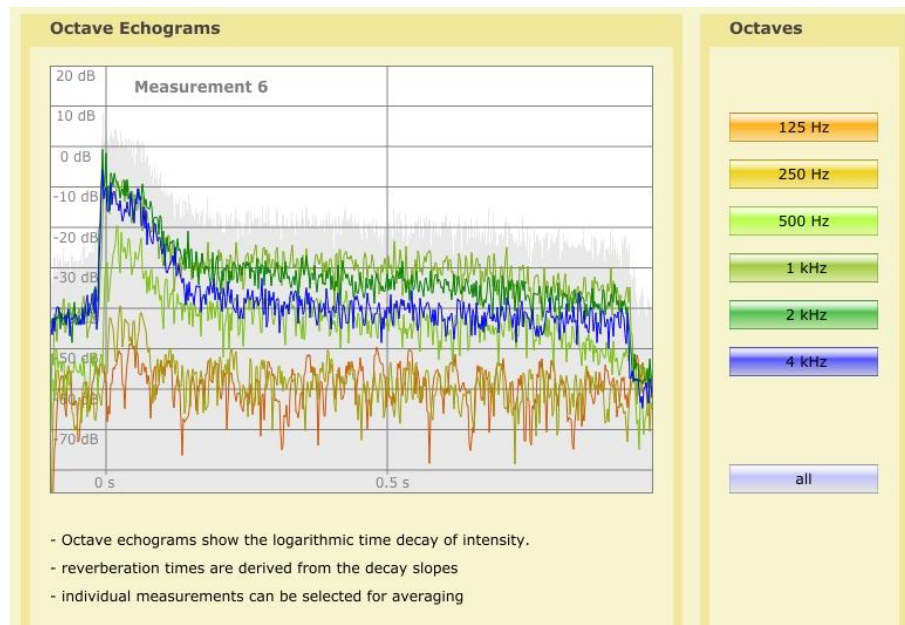


Abbildung 59: Raumakustische Messergebnisse aller Positionen (Klassenraum 3.01)



Abbildung 60: Gemessene und berechnete Nachhallzeiten (Klassenraum 3.01)

Tabelle 18: Gemessene, berechnete und empfohlene Nachhallzeiten (Klassenraum 3.01)

No.	Nachhallzeiten [s] – Getrennte Messungen					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
1	--	--	2.13	2.58	1.83	1.83
2	--	--	4.48	4.42	3.35	3.91
3	2.22	7.72	0.74	0.35	0.62	0.66
4	--	--	3.65	4.51	3.55	3.92
5	--	--	4.33	4.6	3.57	4.23
6	--	--	4.33	4.57	3.42	3.87
	Mittlere Nachhallzeiten [s], gemittelt aus den Messungen					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
	2.22	7.72	3.28	3.51	2.72	3.07
	Berechnete Nachhallzeiten inklusive zusätzlicher Absorber					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
	0.94	1.1	0.84	0.79	0.81	0.8
Referenz: DIN 18041:2016 'Sprache / Vortrag'						
Empfohlene Nachhallzeiten [s] gemäß: 330 m ³						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
empf.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
max.	1.16	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
min.	0.52	0.64	0.64	0.64	0.64	0.52

4.3 Lebenszykluskosten

Im Folgendem werden Aussagen zu den Lebenszykluskosten (LCC) zusammengefasst. Die Lebenszykluskostenberechnung (Berechnungsergebnis gesamt) ist in Abbildung 61 dargestellt. Die Verteilung der gesamten Investitionen veranschaulicht Abbildung 62. In Abbildung 63 wird die Verteilung der Investitionen nach Kostengruppen veranschaulicht.

Der Abschnitt 4.3 ist ein Auszug aus der Dokumentation „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“ [6].

Die Lebenszykluskostenberechnung umfasst Baukosten, sowie Betriebskosten und Instandsetzungskosten für den Zeitraum von 50 Jahren. Die vorliegenden Kosten wurden aufgrund fehlender Detaillierung für die KG 300 gesamt angesetzt und für die KG 400 auf der 2. Gliederungsebene nach DIN 276.

Für die KG 300 liegt eine Kostenfeststellung vor.

Für die KG 400 liegt eine Kostenberechnung vor.

Für die Berechnung wurden die Kosten in Nettobeträge umgerechnet.

Kostenfeststellung, netto, guggenberger+ott Architekten GmbH 11.07.2023

Kostenberechnung, netto, Behnisch Architekten 17.10.2016

Für KG 300 werden pauschal Instandsetzungskosten von 0,35% p.a. gerechnet.

Für KG 410 werden Instandsetzungszyklen von 50 Jahren für KG 410 und je 25 Jahren für KG 420-480 gerechnet.

Lebenszykluskostenberechnung - Berechnungsergebnis gesamt

Ergebnisse

KG	KOSTENGRUPPEN	KOSTEN [€]
DIN 276-1	HK Herstellungskosten	
HK 300	Baukonstruktion	10.504.948,74 €
HK 400	Technische Anlagen	2.812.106,00 €
	Summe Herstellungskosten	13.317.054,74 €
DIN 18960	NK Barwert Nutzungskosten	
NK 300	Betriebskosten	
NK 311 & 321	Ver-/Entsorgung - Wasser	240.125,08 €
NK 312 - 316	Versorgung - Energie	2.227.622,31 €
NK 330	Reinigung	2.371.597,41 €
NK 352	Inspektion und Wartung der Baukonstruktion	413.632,68 €
NK 353	Inspektion und Wartung der Technische Anlagen	859.057,24 €
NK 400	Instandsetzungskosten	
NK 410	Instandsetzung der Baukonstruktion	1.447.714,38 €
NK 420	Instandsetzung der Technischen Anlagen	2.807.481,50 €
	Summe Barwert Nutzungskosten	10.367.230,61 €
Barwert Gesamtgebäude		
	absolut	23.684.285,35 €
	spezifisch zum Preisstand	4.444,25 € €/m²BGF(R)
	spezifisch zum Preisstand 03/2017	3.404,61 € €/m²BGF(R)

Abbildung 61: Ergebnisse Lebenszykluskostenberechnung - Berechnungsergebnis gesamt

Verteilung der gesamten Investitionen

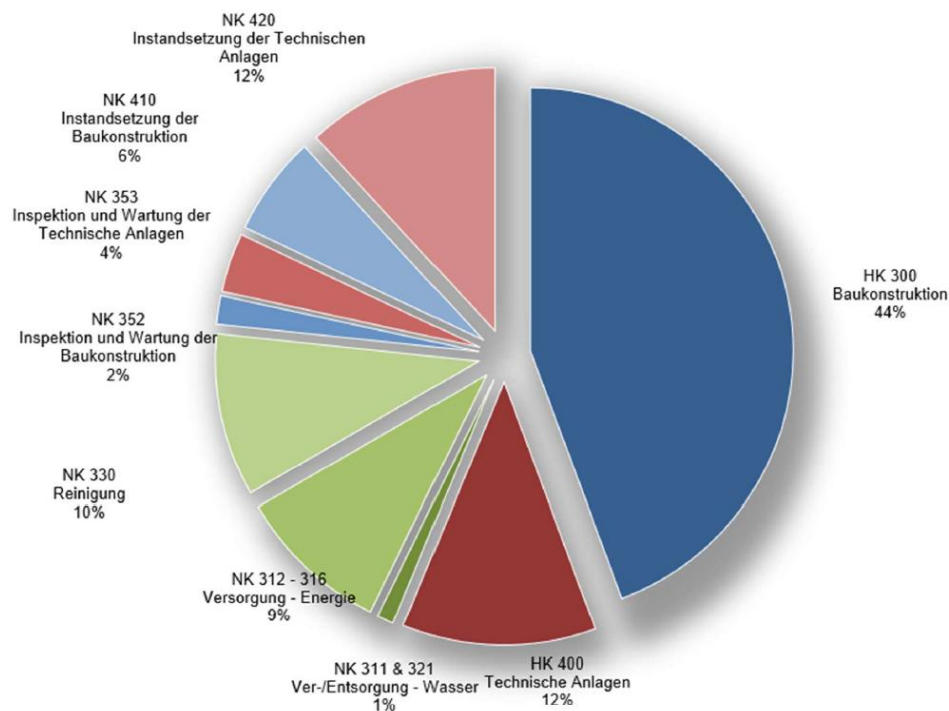
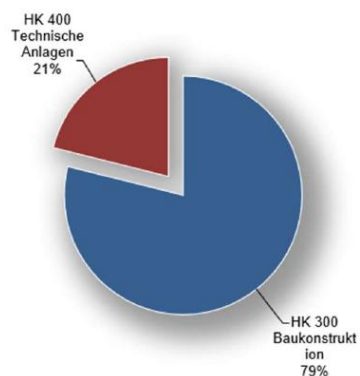


Abbildung 62: Verteilung der gesamten Investitionen

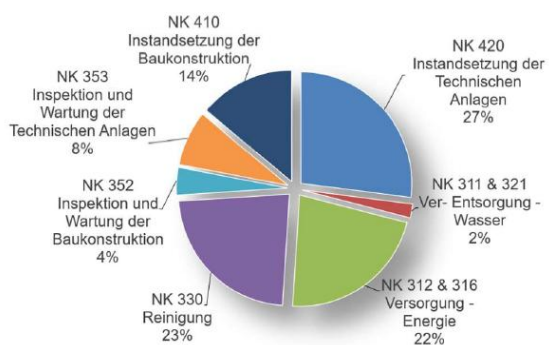
Herstellungskosten



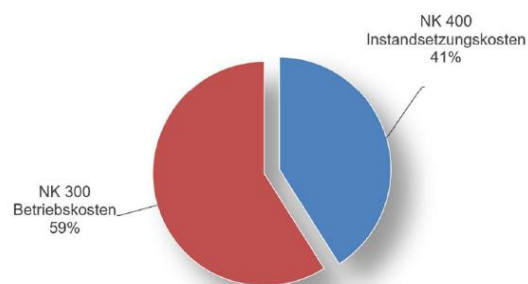
Herstellungskosten und Nutzungskosten



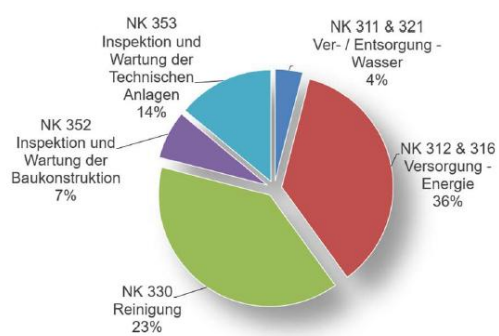
Nutzungskosten



Betriebs- und Instandsetzungskosten



Betriebskosten



Instandsetzungskosten

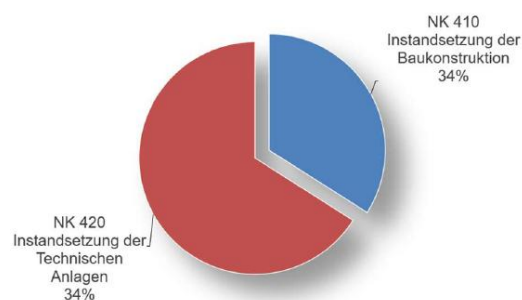


Abbildung 63: Verteilung der Investitionen nach Kostengruppen

Fazit

Die Lebenszykluskostenberechnung wurde mit nicht konsistenten Kostendaten gerechnet. Für die KG 400 (technische Gebäudeausrüstung) liegt keine Kostenfeststellung vor, es wurde mit den Daten der Kostenschätzung von 2016 gerechnet. Daher sind die Ergebnisse nur als Näherungswerte zu betrachten.

Der Barwert der Lebenszykluskosten über 50 Jahre mit 4.444,25 € (entspricht 3.404,61 € zum Kostenstand 03/2017) ist im Vergleich zu Gebäuden ähnlicher Nutzungsart sehr niedrig (nach der Benchmark für Bildungsbauten / Schulen der DGNB würde die höchste Bewertung bei einem Barwert 3/2017 <4.000 € gegeben werden – dieser Wert wird ca. 15% unterschritten).

Die Betriebskosten zeichnen sich durch einen sehr geringen Anteil der Energiekosten, 9%, aus. Dies wird hauptsächlich durch die sehr gute thermische Qualität der Gebäudehülle und den Einsatz von Nahwärme (Blockheizkraftwerk) beeinflusst.

Der Anteil der Herstellungskosten der KG 300 und 400 ist demgegenüber anteilmäßig hoch.

4.4 Ökobilanzielle Betrachtung

Der folgende Abschnitt berichtet über die Untersuchungsergebnisse der Ökobilanz (LCA) und fasst grundlegende Ergebnisse zusammen. Die Lebenszyklusphasen sind in Abbildung 64 dargestellt. Die Gebäudegrunddaten zeigt Abbildung 65. Abbildung 66 fasst die Energiebilanz als Übersicht zusammen. Das Treibhausgaspotenzial / GWP sowie die Gesamtbelastung des Treibhauspotenzials in kg CO₂ Äquivalente veranschaulicht Abbildung 67. Die Primärenergie nicht erneuerbar und Primärenergie gesamt werden in Abbildung 68 und Abbildung 69 dargestellt.

Der Abschnitt 4.4 ist ein Auszug aus der Dokumentation zur Ökobilanz [7].

Die Ökobilanz wurde nach den Rechenregeln des BNB, ohne Einbeziehung der Phase D (Recyclingpotential, thermische Verwertung und Einspeisung PV-Strom) erstellt.

Die Berechnung der Ökobilanz für Bildungsgebäude betrachtet **Herstellung** (A1-3), **Betrieb und Nutzung** (B4 und B6), **Rückbau, Abfallbehandlung, Entsorgung** (C1-4) des Gebäudes über 50 Jahre.

Lebenszyklusphasen und -module nach DIN EN 15978-1, die in die Bilanz einbezogen werden:

Lebenszyklusphasen	Herstellung			Errichtung		Betrieb und Nutzung							Rückbau, Abfallbehandlung, Entsorgung				Vorteile & Belastungen außerhalb Systemgrenzen	
Modulgruppen	A 1-3			A 4-5		B 1-7							C 1-4				D	
	Rohstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport ¹⁾	Errichtung / Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Instandsetzung / Reparatur	Austausch	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Entsorgung	Recyclingpotential	Effekte exportierter Energie
Module	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1	D2
Ökobilanz	X	X	X						X		X				X	X		

¹⁾ Die grau dargestellten Module werden nicht in die Ökobilanz einbezogen.
Ausnahme: Die außerhalb des Betrachtungssystems liegenden Module D1 und D2 sind neben den für die Berechnungen ausgewählten Modulen zusätzlich zu ermitteln und auf die Bezugsfläche bezogen auszuweisen.

Abbildung 64: Lebenszyklusphasen und -module nach DIN EN 15978-1

Die Berechnung erfolgt mit dem Ökobilanzierungsprogramm fbnb-oekobilanz.web.app.

Gebäudegrunddaten (LCA)

1.1 Allgemeines

Gebäudeart: Nichtwohnungsbau
Neubau
Gebäudetyp: Bildungsbau

1.2 Kubatur und Flächen

1.2.1 Geschosse

Geschosse oberirdisch: 3,0
Geschosse unterirdisch: 2,0
Tiefgarage außerhalb des Gebäudes: nicht vorhanden

1.2.2 Kubatur und Grundflächen

Bruttogrundfläche a: 5.329 m²
Nettoraumfläche: 3.648 m²

Fortsetzung Abbildung 65

1.3 Datengrundlagen zur ökologischen Betrachtung

Betrachtungszeitraum: 50 JAHRE (Baujahr 2022)

Ökodaten-Katalog: ÖKOBAUDAT-II

Strommix

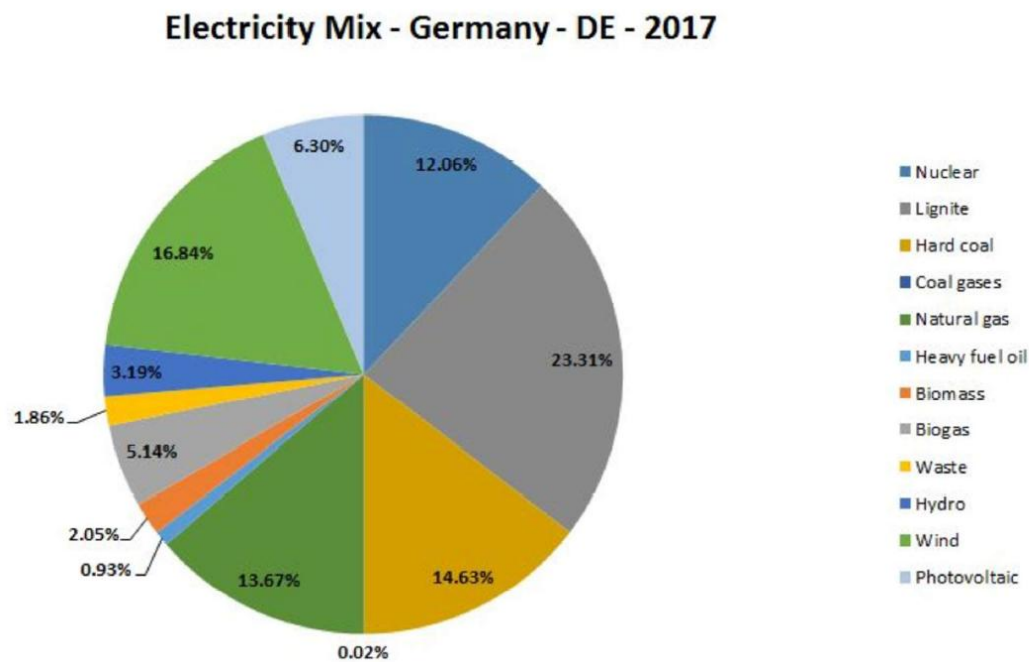


Abbildung 65: Gebäudegrunddaten (LCA)

Übersicht Energiebilanz

Zusammenfassung des Energiebedarfsausweis für das Gebäude

Energieträger	Heizung	Trinkwasser	Beleuchtung	Lüftung	Kühlung	Summe
	kWh/m²a	kWh/m²a	kWh/m²a	kWh/m²a	kWh/m²a	kWh/m²a
Wärme	81,0	10,5	0,0	0,0	0,0	91,5
Strom	0,2	0	6,1	14,7	0	8,5*

*abzüglich 12,5 kWh/m²a PV-Strom

Anteil erneuerbare Primärenergie gemäß E-Mai von LIB Transsolar Energietechnik GmbH: 0,88

Abbildung 66: Übersicht Energiebilanz

1 - Treibhausgaspotenzial / GWP

Umweltwirkungen pro Indikator und Variante für die Bilanzbereiche



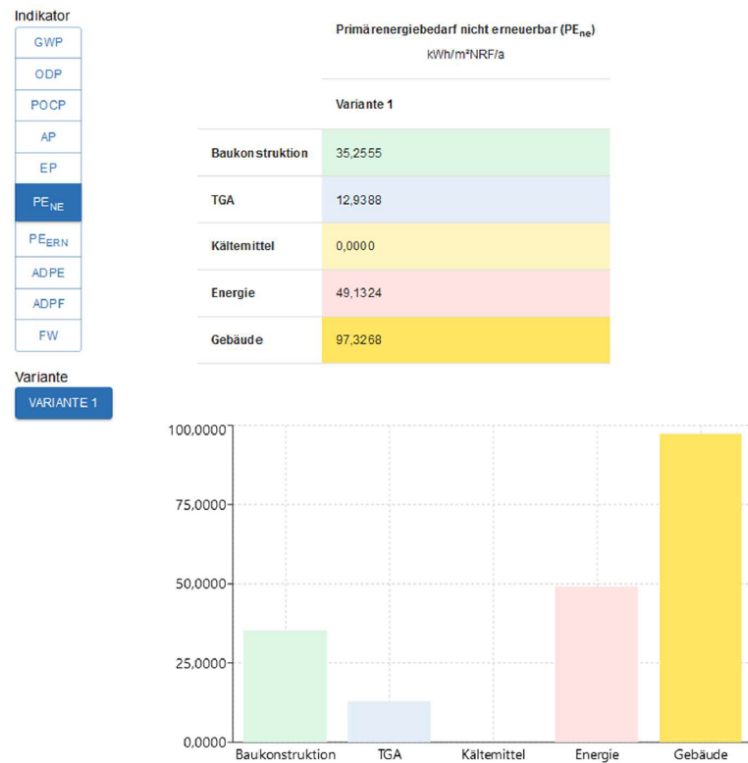
Gesamtbelastung Treibhauspotenzial kg CO₂ Äquivalente

Phase	kg CO ₂ äquival.	% von Summe Gebäude	% von Summe Gebäude + Versorgung	kg CO ₂ äquival. /m ² NRF a
Herstellung (A1-A3) (KGR 300 und 400)	2.359.780	79,82 %		12,94
Instandsetzung (B2/B4) (KGR300/400)	362.544	12,26 %		1,99
Entsorgung (C3/C4)	233.946	7,91 %		1,28
Potenzial nach Ende des Lebenszyklus (Phase D)	-409.217	-13,84 %		-2,24
Summe Gebäude	2.956.270	100,00 %	56,33 %	16,21
Versorgung (B6)	2.291.674	100,00 %	43,67 %	12,56
Versorgung Strombedarf, Nutzungsphase	-208.118	-9,08 %		-1,14
Versorgung Wärmebedarf, Nutzungsphase	2.499.792	109,08 %		13,71
Summe Gebäude mit Versorgung	5.247.944		100,00 %	28,77

Abbildung 67: Treibhausgaspotenzial / GWP

6 – Primärenergie nicht erneuerbar / PEne

Umweltwirkungen pro Indikator und Variante für die Bilanzbereiche



Gesamtinput Primärenergie nicht erneuerbar MJ

Phase	kWh PE nicht erneuerbar	% von Summe-Gebäude	% von Summe-Gebäude + Versorgung	kWh PE nicht ern. / m²NRF a
Herstellung (A1-A3) (KGR 300 und 400))	7.066.367	80,38 %		38,74
Instandsetzung (B2/B4) (KGR300/400)	1.558.843	17,73 %		8,55
Entsorgung (C3/C4)	165.927	1,89 %		0,91
Potenzial nach Ende des Lebenszyklus (Phase D)	-1.345.688	-15,31%		-7,38
Summe Gebäude	8.791.137	100,00 %	49,52 %	48,20
Versorgung (B6)	8.961.859	100,00 %	50,48 %	49,13
Versorgung Strombedarf, Nutzungsphase	-647.155	-7,22 %		-3,55
Versorgung Wärmebedarf, Nutzungsphase	9.609.014	107,22 %		52,68
Summe Gebäude mit Versorgung	17.752.996		100,00 %	97,33

Abbildung 68: Primärenergie nicht erneuerbar / PEne

7 – Primärenergie gesamt + Anteil in % erneuerbar / PEges + PEern

Gesamtinput Primärenergie Gesamt MJ / PEges

Phase	kWh PE Gesamt	% von Summe Gebäude	% von Summe Gebäude + Versorgung	kWh PE Gesamt / m²NRF a
Herstellung (A1-A3) (KGR 300 und 400))	9.630.857	82,86 %		52,80
Instandsetzung (B2/B4) (KGR300/400)	2.019.482	17,37 %		11,07
Entsorgung (C3/C4)	-26.962	-0,23 %		-0,15
Potenzial nach Ende des Lebenszyklus (Phase D)	-1.482.160	-12,75 %		-8,13
Summe Gebäude	11.623.377	100,00 %	41,49 %	63,72
Versorgung (B6)	16.391.012	100,00 %	58,51 %	89,86
Versorgung Strombedarf, Nutzungsphase	-1.088.380	-6,64 %		-5,97
Versorgung Wärmebedarf, Nutzungsphase	17.479.382	106,64 %		95,83
Summe Gebäude mit Versorgung	28.014.389		100 %	153,59

Gesamtinput Primärenergie % Anteil Primärenergie erneuerbar kWh / PEern

Phase	Anteil PE erneuerbar in %
Summe Gebäude	24,37 %
Versorgung (B6)	45,32 %
Summe Gebäude mit Versorgung	36,63 %

Abbildung 69: Primärenergie gesamt + Anteil in % erneuerbar / PEges + PEern

Beurteilung der Ergebnisse

Für die Umweltwirkung des Gebäudes werden als die 2 wichtigsten Kenngrößen

- das CO₂-Äquivalent
- der Primärenergieverbrauch

betrachtet.

Zur Einordnung der berechneten Größen ist ein Vergleich mit anderen Gebäuden gleicher Nutzungsart erforderlich. Dies ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Zum einen werden die relevanten Benchmarks für jedes Gebäude gebäudespezifisch berechnet und sind nicht direkt vergleichbar. Zum anderen ist dies mangels einer breiten Datenbasis zu Bildungsbauten nicht möglich.

Im betrachteten Bauvorhaben wurden, mangels Vorgaben, keine Benchmarks berechnet. Es kann aber für den Indikator 1, Treibhausgaspotential (GWP), Angabe als CO₂-Äquivalent in kg/m²NGF*a, ein Vergleich mit 2 anderen Schulgebäuden gezogen werden.

Dabei schneidet der Neubau der Waldorfschule Uhlandshöhe mit 28,8 kg/m²NGF*a sehr gut, etwa gleichauf mit anderen derzeitigen Schulneubauten die eine Förderung zu QNG (Qualitätssiegel Nachhaltige Gebäude) erhalten, ab.

Der GWP-Anteil der Baukonstruktion zeigt mit ca. 56% im Verhältnis zu 44% für den Betrieb den hohen Aufwand für die Erstellung und daraus folgendem niedrigeren Aufwand für den Betrieb über 50 Jahre.

Für Indikator 7, Primärenergiebedarf gesamt in kWh/m²NGF*a, ergibt das Berechnungsergebnis mit 153,59 kWh/m²NGF*a im Vergleich ebenfalls ein sehr gutes Ergebnis.

5. Monitoring

Das Arbeitspaket 3 berichtet über die in der Schule durchgeführten Messungen. Durch die Erfassung der realen Verbräuche sollte die Prognose der Simulationsergebnisse abgeglichen werden. Messungen in Bezug auf Tageslicht, thermischen Komfort und CO₂-Konzentration zeigen das bauklimatische Verhalten des Gebäudes auf. Eine Nutzerbefragung über das subjektive Empfinden ergänzt die gemessenen Daten.

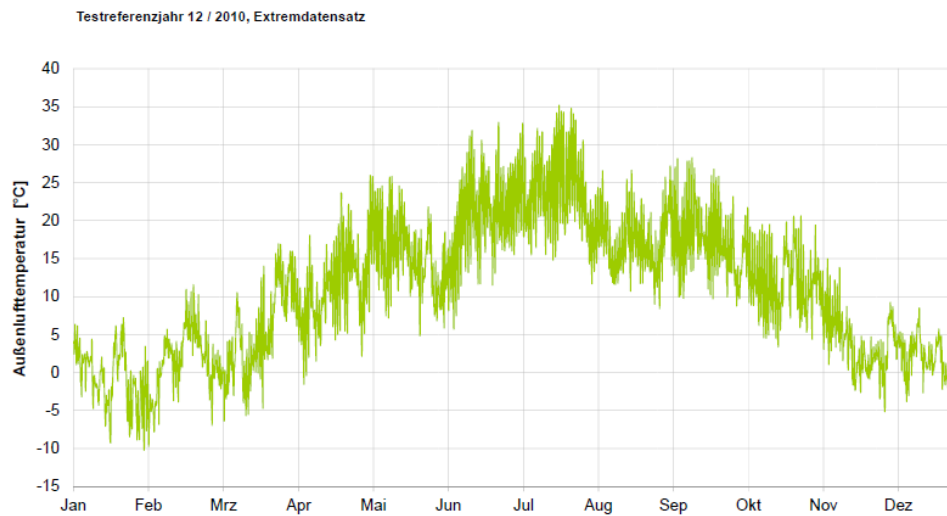
Die Abschnitte 5.1, 5.2 und 5.3 sind Auszüge aus dem Bericht zur Entwurfsplanung zum Lüftungs- und Energiekonzept [2].

5.1 Grundlagen

Wetterdaten des Standortes

Der Konzeptentwicklung werden stündlich aufgelöste Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes² zugrunde gelegt. Der Standort Stuttgart fällt in den Bereich des Testreferenzjahres 12 – Mannheim. Für die thermischen Simulationen wird der Extremdatensatz verwendet, der sowohl im Winter wie auch im Sommer Perioden mit extremen Bedingungen (niedrige bzw. hohe Temperaturen und Außenluftfeuchten) enthält.

² Testreferenzjahre für Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse - TRY. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main, April 2011



**Abbildung 70: Verlauf der Außenlufttemperatur
(Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)**

Am Temperaturverlauf in Abbildung 70 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 $1140 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ (vgl. Abbildung 71).

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

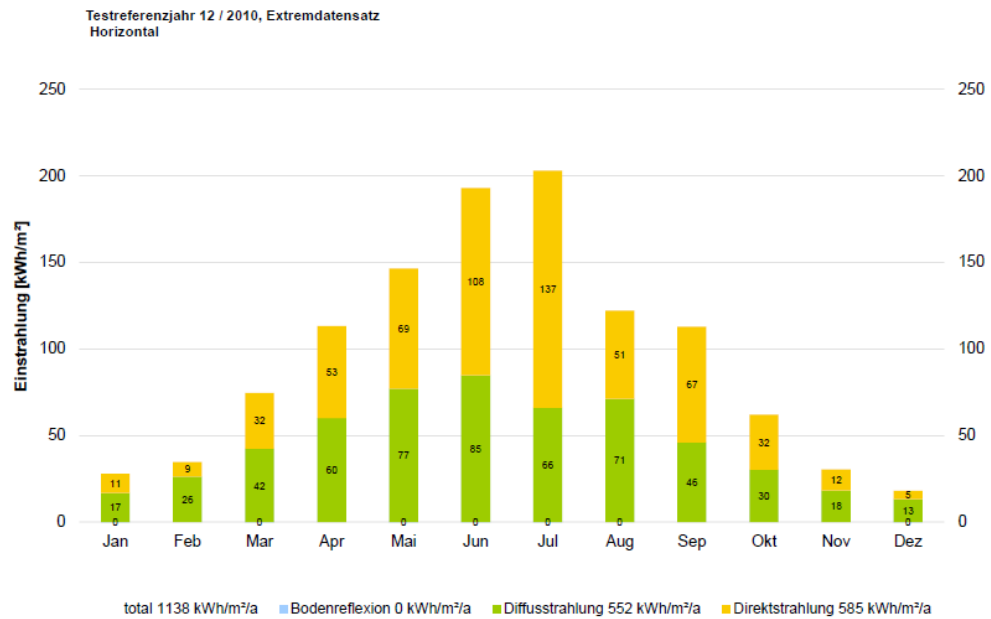


Abbildung 71: Monatliche solare Einstrahlung (direkt und diffus) auf die Horizontale (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)

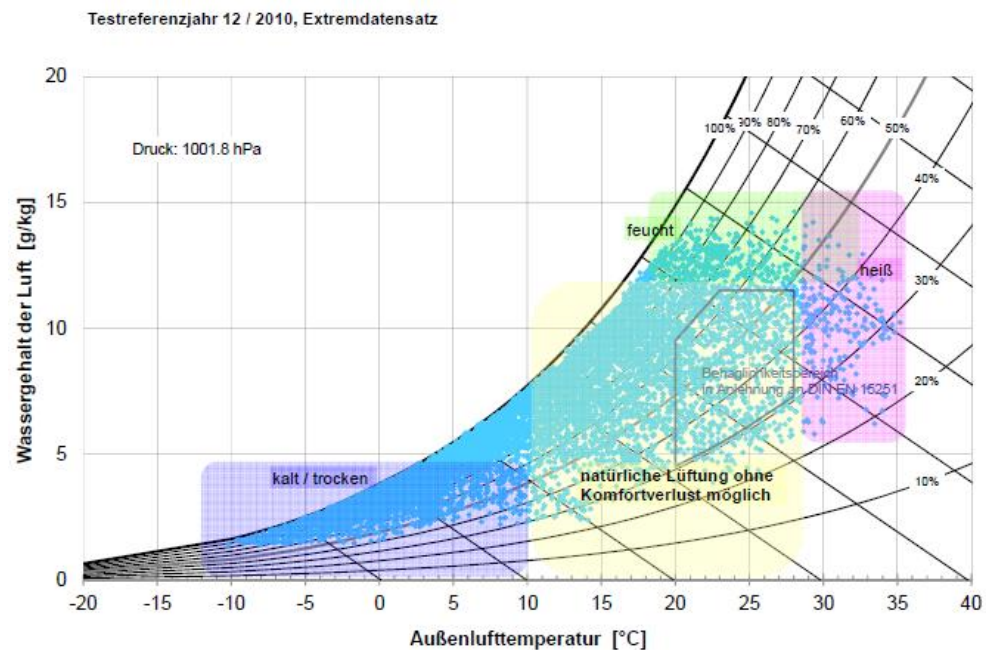


Abbildung 72: Absolute Außenluftfeuchte über der Außenlufttemperatur (Testreferenzjahr 12 X / 2010, Mannheim, Extremdatensatz)

5.2 Thermische Simulation

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

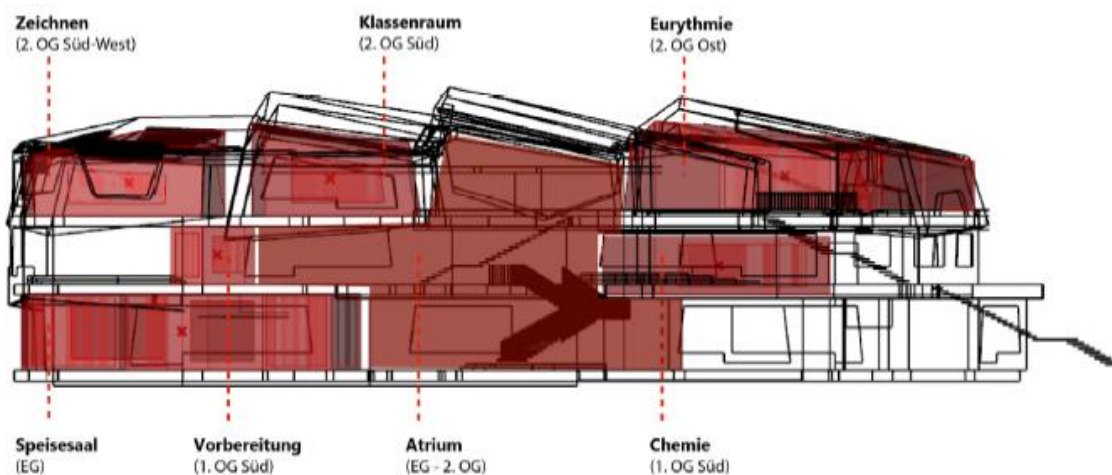


Abbildung 73: Darstellung der Referenzräume der thermischen Simulation

Hinweis: Weitere Informationen zu den Randbedingungen der therm. Simulation sind im Anhang D1 - Zusammenfassung OSN und Anhang D2 - Randbedingungen für die therm. Simulation des OSN sowie im gesonderten Anhang zum Bericht zur Entwurfsplanung [2] des Lüftungs- und Energiekonzepts Waldorfschule Uhlandshöhe aufgeführt.

5.2.1 Sommerlicher Wärmeschutz (DIN 4108-2:2013)

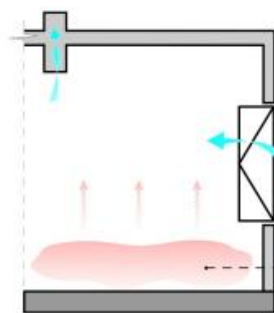
Um den Komfort im Innenraum im Sommer zu untersuchen, wurden die vorherig beschriebenen Zonen unter spezifischen Bedingungen (vordefiniert durch DIN 4108-2:2013) simuliert. Damit die verpflichtenden Anforderungen eingehalten werden, dürfen die Bereiche 500 Kh pro Jahr nicht überschreiten.

Auf Grund der vorgegebenen Randbedingungen dieses standardisierten Prozesses, der sich auf die Leistungsfähigkeit der Fassade fokussiert, repräsentiert diese Untersuchung

keine realistischen Bedingungen für Komfort im Innenraum während des realen Betriebes.

Randbedingungen für die thermischen Simulationen: DIN 4108-2:2013

Klimadaten: Mannheim



Grundluftwechsel:

☀️ $4 \cdot \text{Grundfläche} / \text{Nettoraumvolumen (ACH)}$

🌙 0.24 ACH

Luftwechsel :

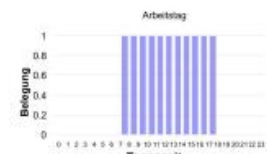
☀️ max. 3 ACH

🌙 max. 5 ACH (Sommer)

Interne Wärmeeinträge:

144 Wh/m²d

Nutzungsprofil



7-18 Mo-Fr



Abbildung 74: DIN 4108-2:2013 Randbedingungen

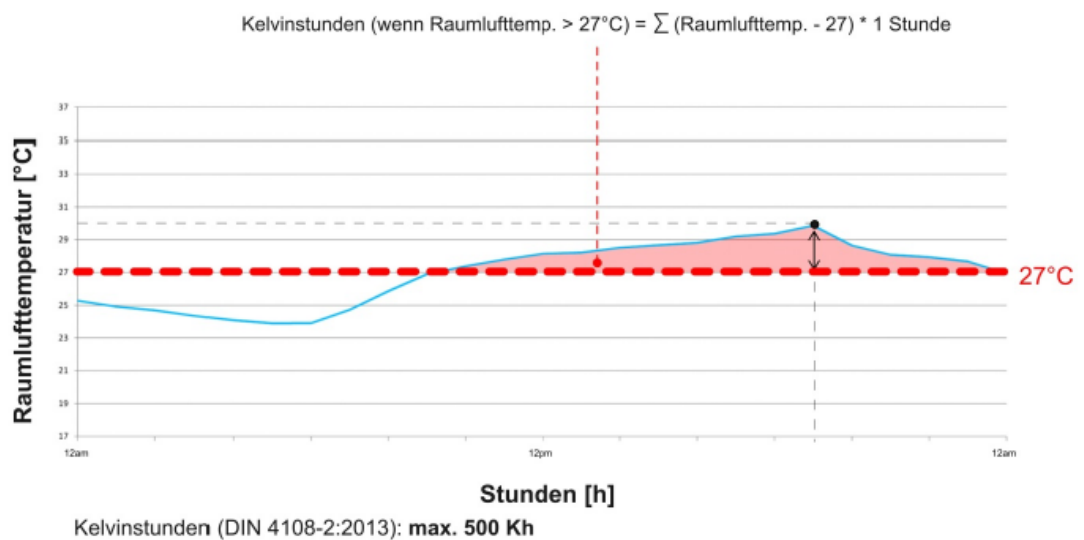


Abbildung 75: DIN 4108-2:2013 Definition von Kelvinstunden

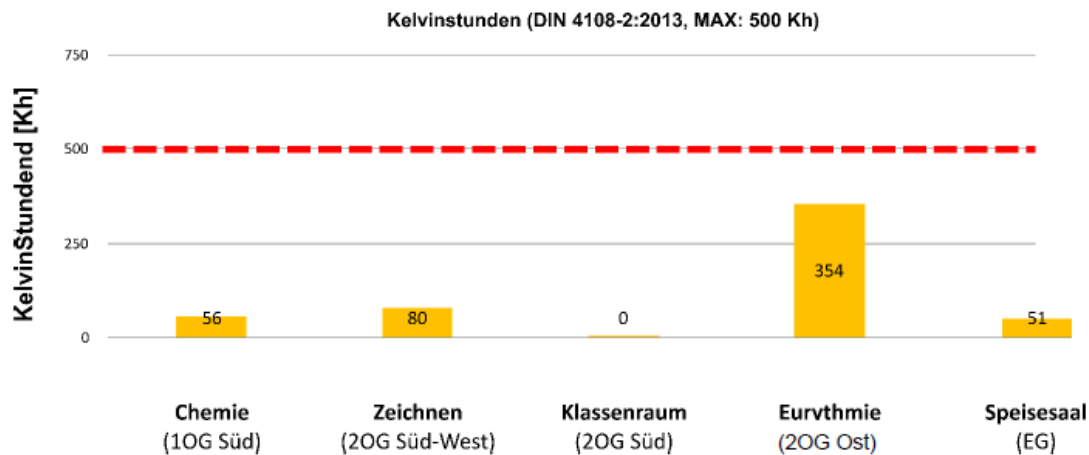


Abbildung 76: Kelvinstunden nach DIN 4108 für die untersuchten Zonen

Alle simulierten Bereiche erfüllen die Anforderungen. Wegen unterschiedlichen Orientierungen und dem variierenden Fensteranteil kommt es zu leichten Unterschieden bei den Bereichen Chemie, Zeichnen und Klassenraum. Die Bereiche Speisesaal und Eurythmie hingegen sind kritischer auf Grund der Beschaffenheit der Räume: Der Bereich Eurythmie ist wärmer als die anderen Bereiche, weil das Holzmaterial, welches als Innenausstattung eingesetzt werden soll, die nützliche Kombination von exponierter thermischer Masse und Nachtlüftung im Sommer nicht erlaubt.

5.2.2 Thermischer Komfort

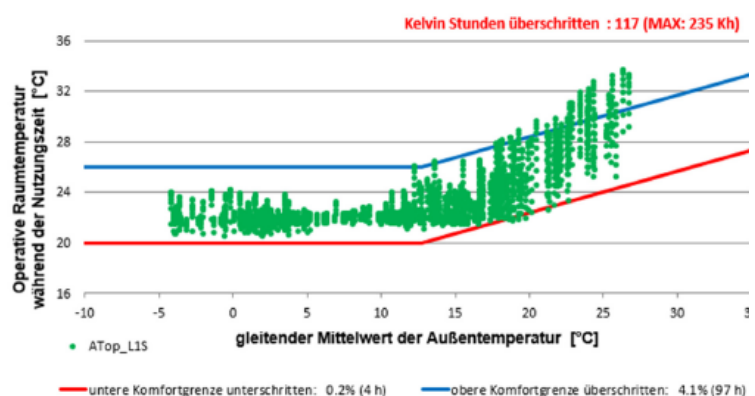
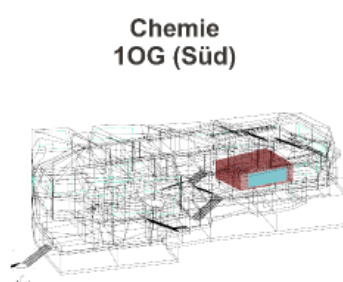
Um den thermischen Komfort während des Betriebes zu evaluieren und um die Verhältnisse für den Komfort im Innenraum mit den tatsächlichen Randbedingungen in der entsprechenden Klimazone (in diesem Fall Mannheim) zu beschreiben, wurde die DIN EN 15251 herangezogen.

Die Wetterdaten reflektieren extreme Winter/Sommerbedingungen der letzten Jahre, weshalb diese 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 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 235 Kh erlaubt, welche den Komfortbereich überschreiten. Im Restaurant tritt eine maximale Überschreitung von 438 Kh auf.



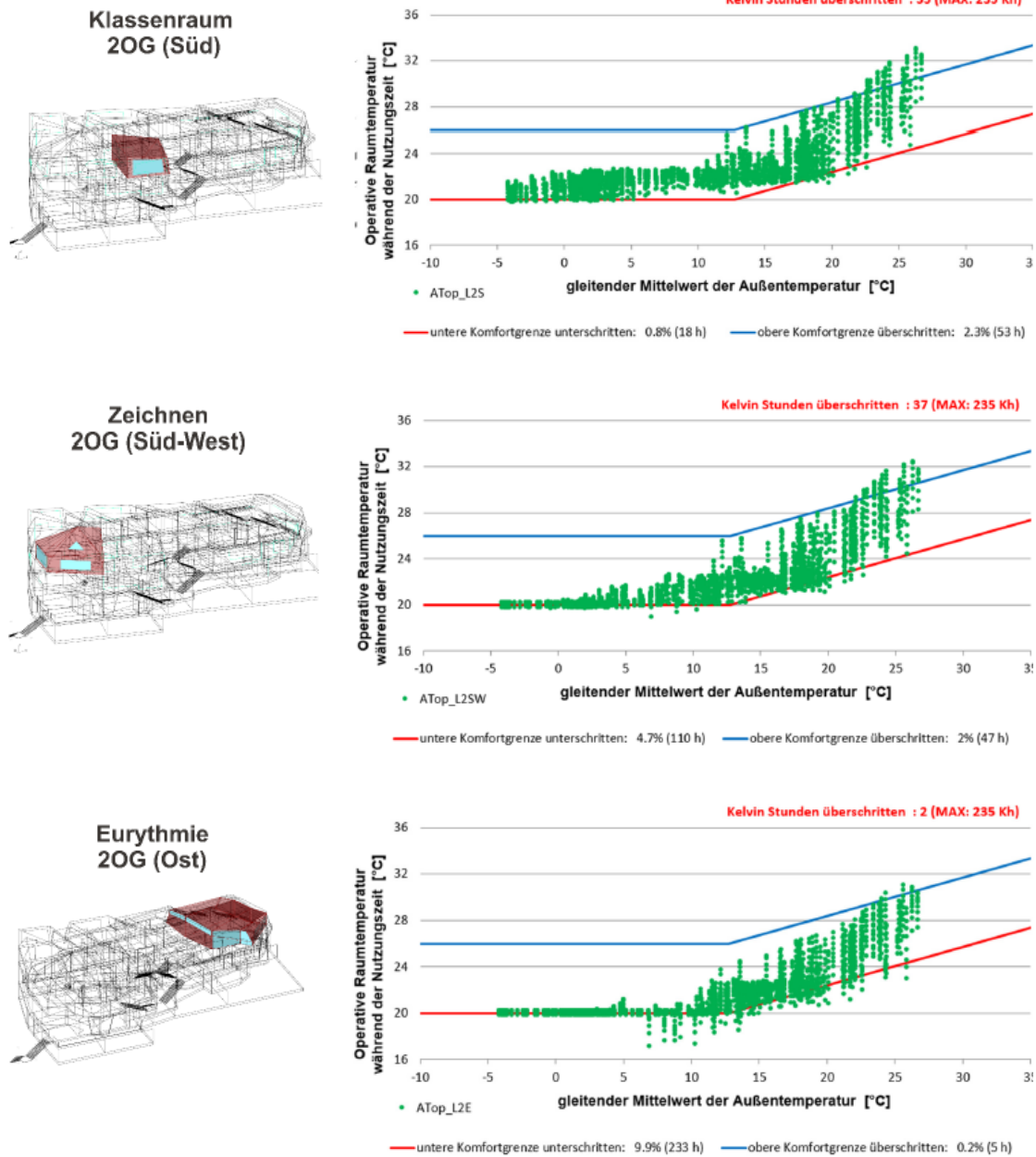


Abbildung 77: Ergebnisse des thermischen Komforts nach DIN EN 15251

Alle Bereiche erfüllen die Anforderungen der DIN EN 15251, 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 sind eine angemessene hygienische Belüftung im Winter sowie eine exponierte Decke (Nachluftauskühlung) im Sommer die Schlüsselfaktoren um den Komfort im Innenraum zu optimieren.

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

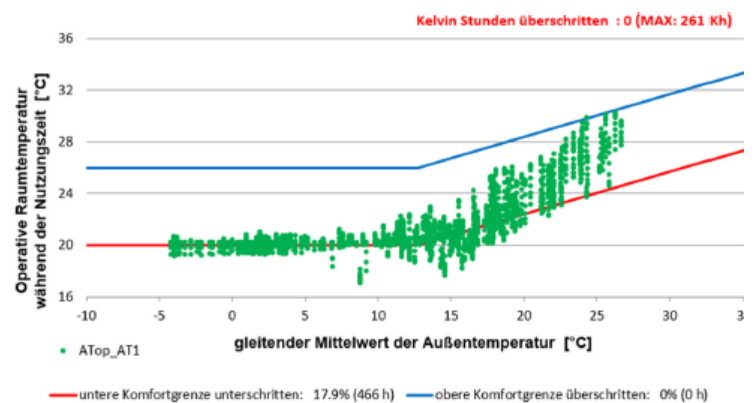
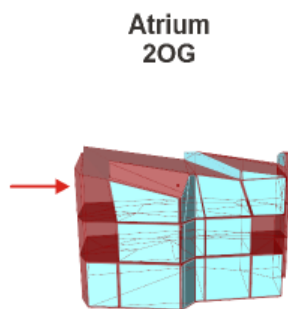
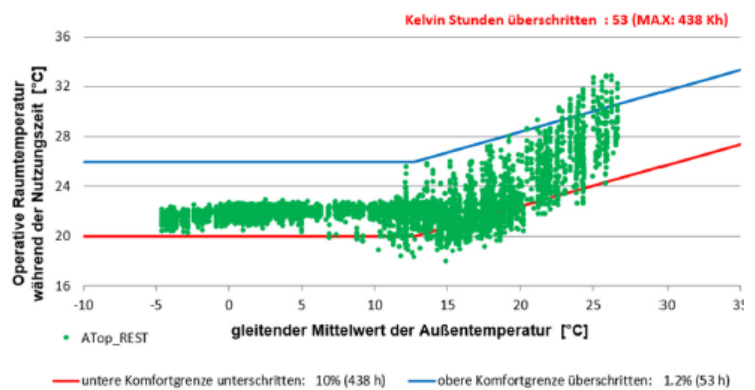
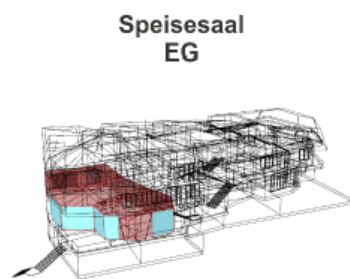


Abbildung 78: Thermischer Komfort für die untersuchten Zonen

5.2.3 Primärenergiebilanz

Der Energiebedarf und daraus resultierend der Primärenergiebedarf für das gesamte Gebäude wurde aus dem thermischen Model ermittelt. Dabei wurden Energiebedarfs-
werte mit den Primärenergiefaktoren von 1,8 für Strom und 0,88 für Wärme aus dem
Nahwärmenetz angesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 79 dargestellt.

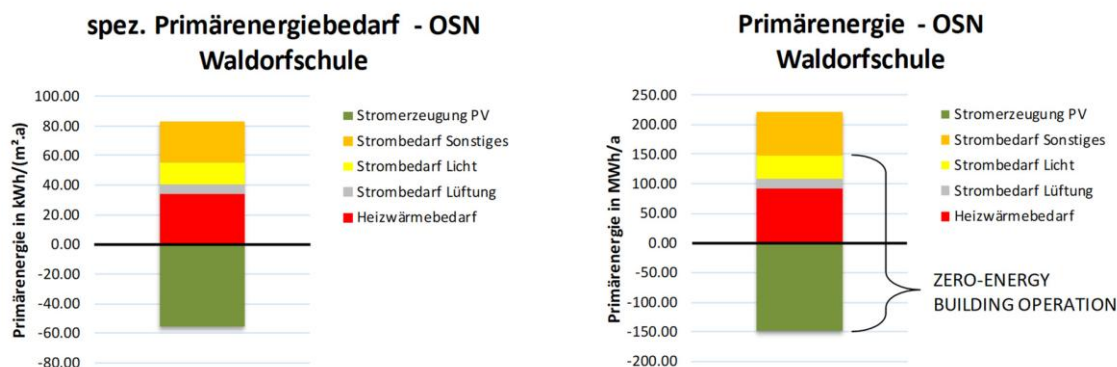


Abbildung 79: Primärenergiebilanz des Gebäudes

Die Ergebnisse zeigen, dass der Primärenergiebedarf für den Gebäudebetrieb ohne Nutzerstrom (unter Sonstiges angegeben) durch die Stromerzeugung des PV-Dachs abgedeckt werden kann.

5.3 Tageslichtsimulation

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

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

Um jedoch überbelichtete Bereiche zu verhindern, war von Anfang an die treibende Vision nicht nur 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 wurden in Bezug auf die farbliche Innengestaltung (Lichtreflexion) und die Eigenschaften der Fenster (Transparenz der Verglasung) betrachtet.

Randbedingungen für die Tageslichtsimulation

Die angesetzten Oberflächeneigenschaften für die Simulation sind im folgenden beschrieben:

Opake Materialien Lichtreflexion:

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

Transparent Materialien Lichttransmission:

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

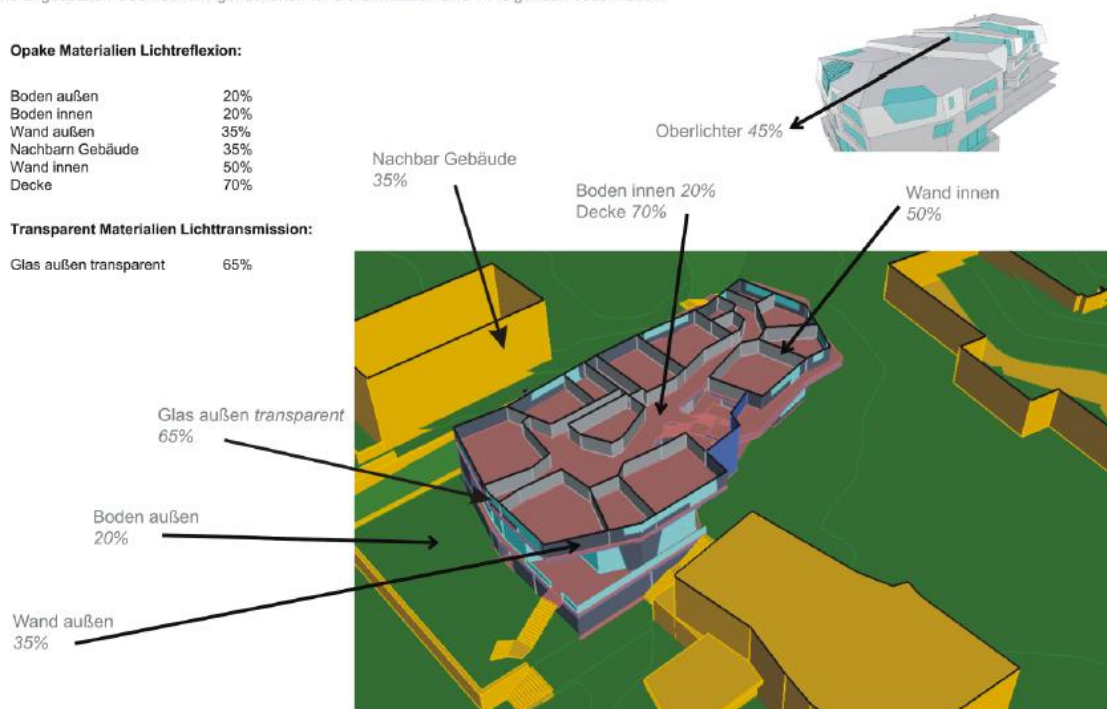
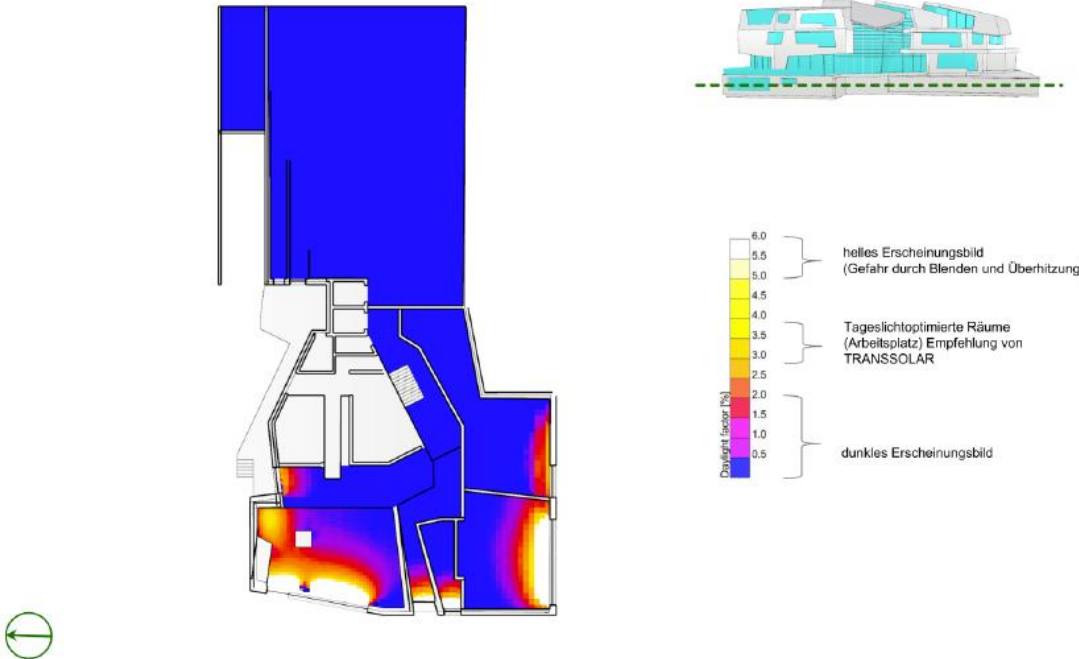


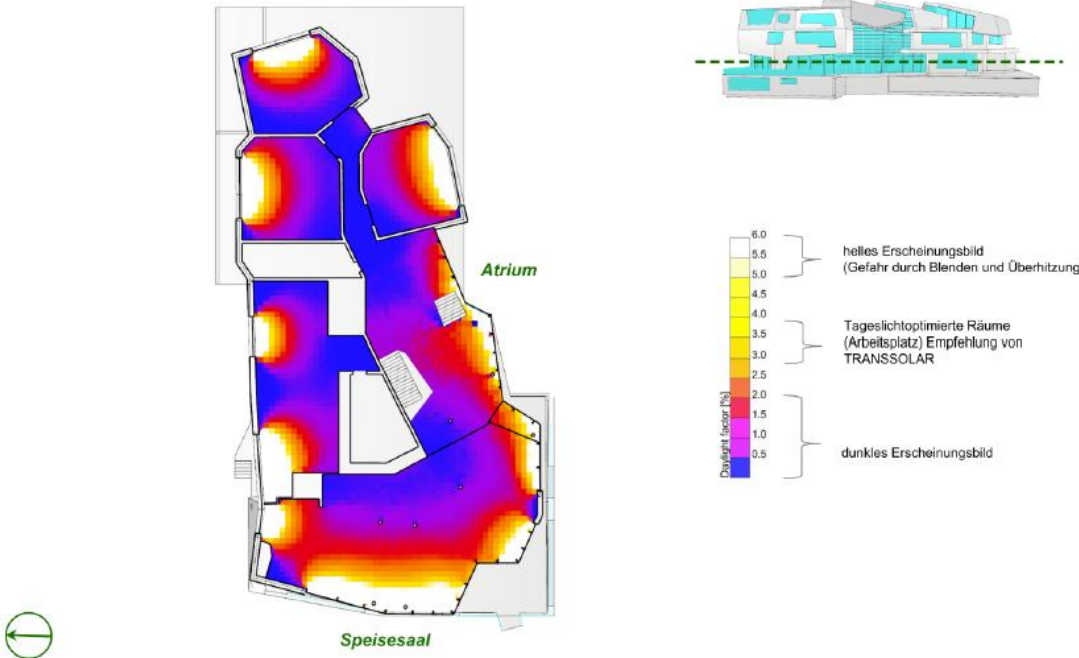
Abbildung 80: Randbedingungen der Tageslichtsimulation

Für die Simulation wurde der Tageslichtfaktor als Maß genommen. Laut Definition, beschreibt der Tageslichtfaktor das Verhältnis von interner zu externer Beleuchtungsstärke 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. Außenliegender beweglicher Sonnenschutz und innenliegende Jalousien sind essentiell um Blendung durch direkte Sonneneinstrahlung zu kontrollieren.

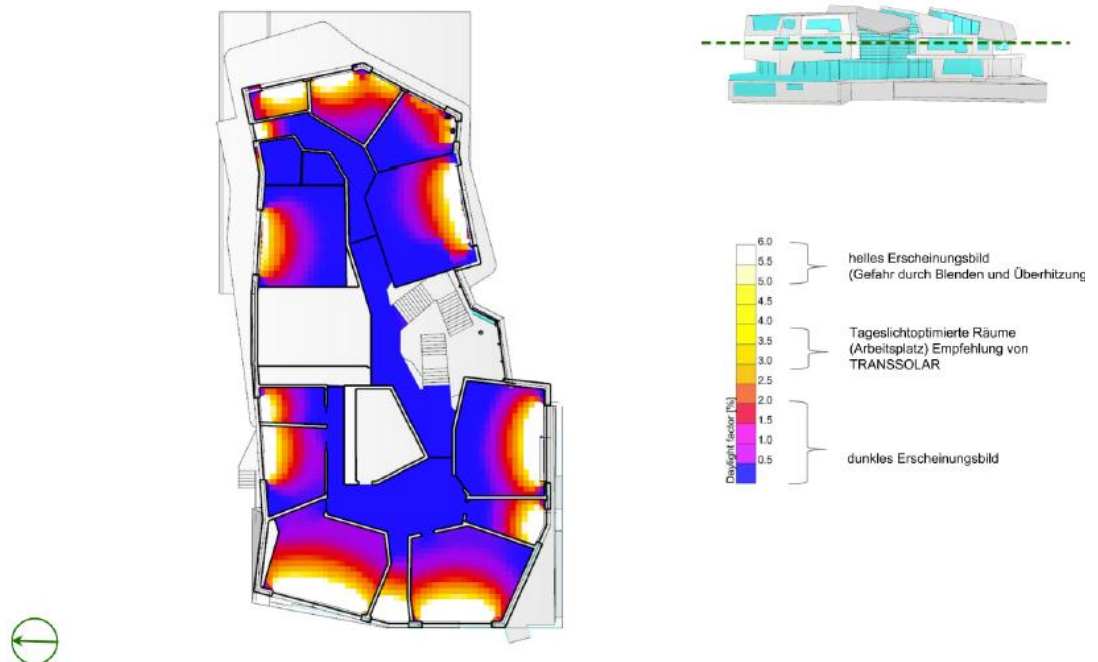
Tageslichtquotient: UG



Tageslichtquotient: EG



Tageslichtquotient: 10G



Tageslichtquotient: 20G

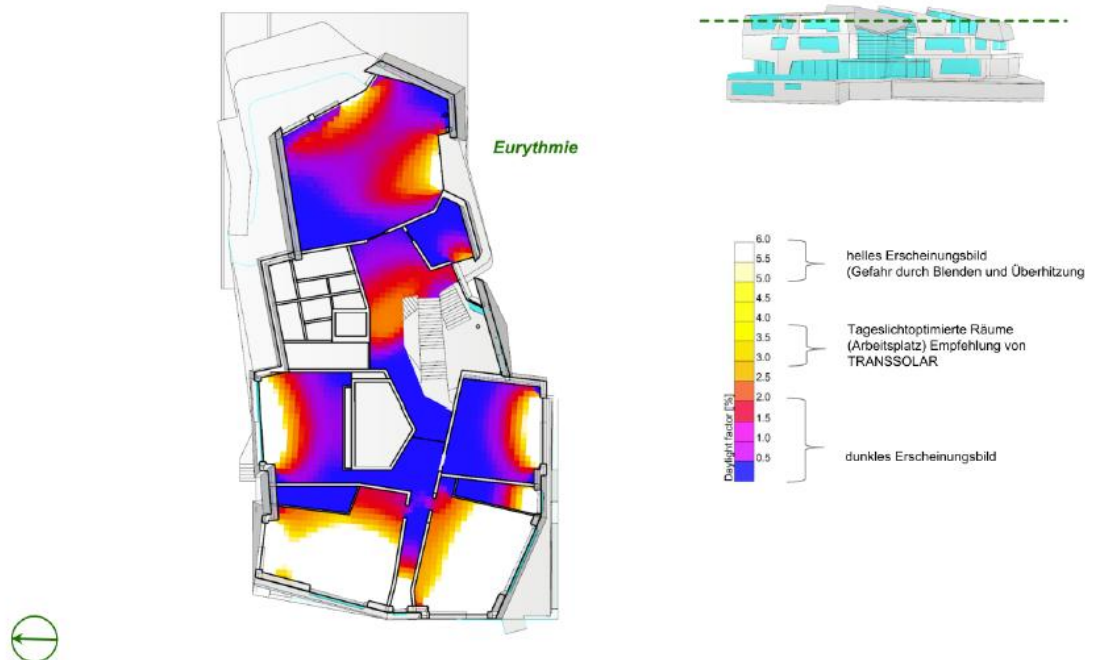


Abbildung 81: Ergebnisse der Tageslichtsimulation

5.4 Messungen

Für die Messungen wurden Messgeräte der Firma IC-Meter verwendet. Diese mobilen Geräte liefern Daten für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration in einem Raum oder einem Gebäude. Über eine autarke Sendeeinheit werden die Messdaten und Informationen alle 5 Minuten auf einen entsprechenden Cloud-Server hochgeladen. Zudem stellt der IC-Meter-Server Informationen von der jeweils nächstgelegenen Wetterstation, Energiemessungen und andere Informationen zur Verfügung, sollten diese von öffentlichen Anbietern verfügbar sein [8]. Wie von Zhang et al. empfohlen [9], beträgt die Höhe, auf der die Geräte während der Messung zu platzieren sind 1,1 m, was der Höhe des Kopfes einer sitzenden Person entspricht.

Die Unterrichtspläne wurden von der Verwaltung der Waldorfschule Uhlandshöhe zur Verfügung gestellt, um die Belegung und das Nutzerverhalten nachvollziehen bzw. verstehen zu können. Die Anzahl der Schüler pro Klasse stammt aus den Aufzeichnungen der Schule, wobei die Daten eine Aussage zur tagesgenauen Anzahl der Schüler pro Klasse nicht ermöglichen. Informationen dazu sind im Anhang A1 - Belegung Klassenzimmer Waldorfschule Uhlandshöhe einsehbar.

Die durchschnittlich empfohlenen CO₂-Konzentrationswerte, die auf den Grafiken dargestellt sind, entsprechen den neuesten Anforderungen für den Lüftungsbericht des deutschen Umweltbundesamtes [10]. Auf den entsprechenden Abbildungen wird der durchschnittlich empfohlene Wert von 1000 ppm für Klassenzimmer mit einer grünen Linie dargestellt, während akzeptable kurzzeitige Spitzenwerte von 1500 ppm mit einer roten Linie dargestellt werden. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Werte lediglich eine Referenz darstellen, die vom Umweltbundesamt festgelegt wurde. Dies bedeutet nicht, dass bei sichtbar höheren CO₂-Spitzenkonzentrationen die Schüler einem Gesundheitsrisiko ausgesetzt waren.

Die gemessenen Klassenzimmer (Raum 1.11, Raum 2.12, Raum 3.01) sowie die Standorte der eingesetzten IC-Meter werden durch die folgenden drei Abbildungen veranschaulicht.

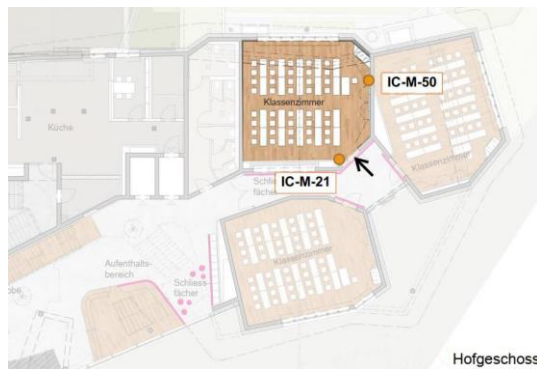


Abbildung 82: Anordnung der Sensoren im Klassenraum 1.11 (Foto: Rafael Gonzalez, Plan basierend auf Bildern von Behnisch Architekten [11])

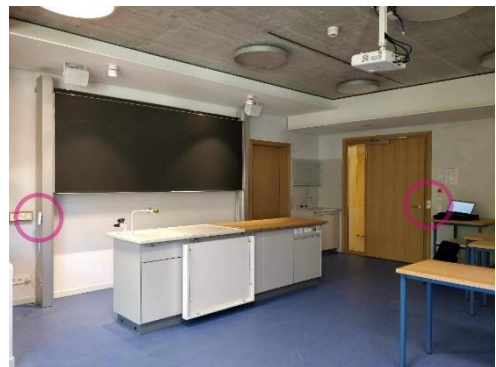


Abbildung 83: Anordnung der Sensoren im Klassenraum 2.12 (Foto: Rafael Gonzalez, Plan basierend auf Bildern von Behnisch Architekten [11])

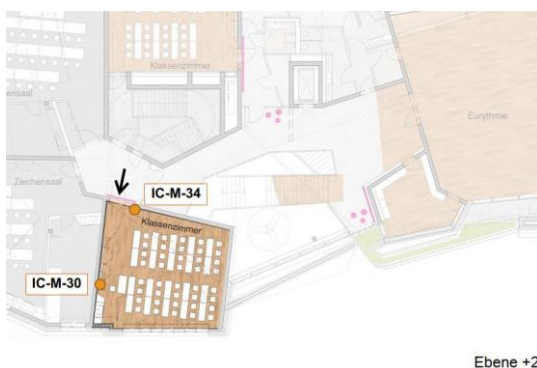


Abbildung 84: Anordnung der Sensoren im Klassenraum 3.01 (Foto: Rafael Gonzalez, Plan basierend auf Bildern von Behnisch Architekten [11])

5.4.1 Konzentration von CO₂

5.4.1.1 CO₂ in Schulgebäuden

Insbesondere in der westlichen Welt verbringen Menschen zwischen 80 und 90 Prozent ihrer Zeit in Innenräumen [12]. Kinder in Europa haben einen durchschnittlichen Schultag von 5 bis 6 Stunden, was etwa 23 Prozent des Tages ausmacht. In einigen Ländern, wie z. B. in Deutschland, kann ein Schultag aufgrund von außerschulischen Aktivitäten bis zu 8 Stunden dauern [13]. Das entspricht bereits einem Drittel des Tages oder der Hälfte der aktiven Stunden, wenn man 8 Stunden Schlaf einrechnet. Die zunehmenden Fälle von Asthma weltweit, eine Krankheit, die mittlerweile die häufigste chronische Erkrankung im Kindesalter ist, deuten auf die Innenraumumgebung von Schulen und Häusern als Ursache hin [12].

Menschen reagieren auf Umwelteinflüsse durch die Sinne. Das Nervensystem empfängt sensorische Informationen, die über unsere Haut, Augen, Ohren oder Nase übertragen werden und durch körperliche Prozesse wie Aufnahme, Einatmung oder Berührung verstärkt werden. Eine andere Art der Reaktion auf Umgebungsbedingungen neben dem sensorischen System ist eine Veränderung des physiologischen und psychologischen Zustands. Diese Art von Veränderungen ist nicht immer sofort erkennbar und kann über einen längeren Zeitraum hinweg schädlich sein. Außerdem ist es wichtig anzuerkennen, dass jede einzelne Person aufgrund nicht nur physischer, physiologischer und psychologischer Unterschiede, sondern auch aufgrund unterschiedlicher Kontexte, Situationen und Erfahrungen unterschiedlich empfängt, wahrnimmt und reagiert [12].

Die Bedingungen der Innenraumumgebung beeinflussen die Gesundheit, den Komfort und die Leistung der Nutzer. Deshalb ist die Qualität der Innenraumumgebung eine der Hauptaufgaben bei der Planung eines Gebäudes [14]. Die Qualität der Innenraumumgebung ist ein breites Konzept, das von vielen Variablen abhängt, die in vier Hauptbereiche gegliedert werden können: Thermischer Komfort, Innenraumlufthqualität, Visueller Komfort und Akustischer Komfort [14].

Die Qualität der genannten vier Bereiche gilt als physische Stressoren. Im Vergleich zu psychosozialen Stressoren wie stressigen Ereignissen oder chronischen Stressoren

hängen sie von der Innenraumumgebung ab. Die Innenraumluftqualität ist ein komplexer physischer Stressfaktor, der unter anderem Geruch, Innenraumluftverschmutzung und Frischluftzufuhr umfasst [12].

Luftschadstoffe in Innenräumen können aufgrund ihres Geruchs Belästigung oder Zufriedenheit verursachen; Reizungen verursachen, indem sie Nervenenden in Nase und Augen stimulieren; die Funktion des endokrinen Systems stören und somit die Verteilung von Hormonen im Körper beeinflussen; entzündliche und allergische Reaktionen hervorrufen; einen Überschuss an freien Radikalen gegenüber Antioxidans-Abwehrmechanismen verursachen, was zu oxidativem Stress und möglicherweise zu systemischer Entzündung führt und Zellveränderungen oder sogar Zelltod verursachen [12]. Einige der berichteten gesundheitlichen Auswirkungen von schlechter Innenraumluftqualität (IAQ) umfassen Müdigkeit und Konzentrationsprobleme, Kopfschmerzen und das Sick-Building-Syndrom, das unter anderem Kopfschmerzen, Schwindel sowie Augen- und Nasenreizungen verursacht [15].

Feinstaub (PM) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs) sind die häufigsten Luftschadstoffe. Hierbei bezieht sich der Feinstaub auf feste oder flüssige Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 μm , weshalb sie je nach ihrer Größe in PM₁₀, PM_{2,5} und PM₁ kategorisiert werden. Es gibt natürliche und anthropogene Quellen von Feinstaub, wie zum Beispiel Waldbrände, Pollen, Bodenerosion sowie Kraftwerke, Kraftfahrzeuge und Verbrennungsanlagen. Die Hauptquelle von Feinstaub in Städten stammt jedoch vom Straßenverkehr aufgrund von Dieselausgasen sowie Abrieb von Bremsen und Reifen [15]. Die Exposition gegenüber Feinstaub sollte immer so gering wie möglich gehalten werden, da es keine Mindestschwelle gibt, unterhalb derer keine Gesundheitsschäden auftreten. Niederländische Veröffentlichungen liefern Belege für den Zusammenhang zwischen Atemwegssymptomen bei Kindern und der verschmutzten Innenraumluft von Schulen in der Nähe von Autobahnen [16]. Die Präsenz von Feinstaub in Klassenzimmern beschränkt sich jedoch nicht nur auf verschmutzte Außenluft als Quelle, da Staub ebenfalls dazu beiträgt, der aufgrund des Verhaltens von Kindern in die Luft gelangt [16]. Asthma, Lungenfunktion, Verschlechterungen bei chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind einige der Gesundheitsfolgen, die durch die Exposition gegenüber Feinstaub verursacht werden [15].

Flüchtige organische Verbindungen (VOCs) hingegen sind organische kohlenstoffhaltige Substanzen, die bei niedrigen Temperaturen verdampfen können. Die bekanntesten VOCs sind aromatische Kohlenwasserstoffe wie Benzol, Aldehyde wie Formaldehyd und Alkohole wie Isopropanol. Sie werden normalerweise in Lösungsmitteln, Klebstoffen, Weichmachern und Parfums gefunden, die zur Herstellung von Möbeln, Farben und sogar Spielzeug verwendet werden. Die Präsenz dieser Substanzen, die von alltäglichen Gegenständen erzeugt werden, zusammen mit dem menschlichen Stoffwechsel, führt bei unzureichender Belüftung zu einer Ansammlung von VOCs in Innenräumen. Gesundheitliche Folgen der Exposition gegenüber VOCs umfassen Beeinträchtigungen des Nervensystems, eingeschränkte Konzentration und Müdigkeit, Allergien, Asthma, Krebs und das Sick-Building-Syndrom [15].

Die Umgebung von Schulen wird als komplex beschrieben, und alle miteinander verbundenen Faktoren beeinflussen die Gesundheit der Nutzer [17]. Belege aus früheren Studien zeigen, dass der Zustand der Klassenzimmerumgebung weitgehend mit den von Lehrern berichteten Atemwegssymptomen zusammenhängt [17].

Es wurde berichtet, dass Schulen mit Teppichboden einen Anstieg von Asthma bei Schülern bewirkten im Vergleich zu Schulen ohne Teppich. Textile Materialien, die in Gegenständen wie Kissen, Teppichen und Vorhängen gefunden werden, gelten als Reservoir für Hausstaubmilben und Allergene von Schülern, die Haustiere zu Hause haben. Dies kann sich auf andere Schüler auswirken und das Risiko für Asthma, Kurzatmigkeit oder Atembeschwerden erhöhen. Es wurde auch eine Verbindung zwischen Formaldehyd (welches in Schaumstoffisolierungen, Klebstoffen, Sperrholz, Faserplatten und Textilien vorkommt) und Asthma sowie nächtlicher Atemnot festgestellt. Lüftungs- und Klimaanlage (HVAC-Systeme) tragen ebenfalls deutlich zur Luftverschmutzung in Innenräumen bei. Deren Komponenten und insbesondere schlechte Wartung können ein Risiko für die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit in Schulen darstellen. Darüber hinaus wurde eine höhere Schülerabwesenheitsrate mit einer hohen Außenkonzentration von Ozon, Stickoxiden und Kohlenmonoxid in Verbindung gebracht [12]. Dies legt nahe, dass auch die Qualität der Außenluft berücksichtigt werden sollte, wenn die Gesamtqualität der gebauten Umgebung von Schulen bewertet wird.

Da Gesundheitskomplikationen, die mit der erhöhten Exposition gegenüber Luftschadstoffen zusammenhängen, oft erst Jahre später bemerkbar werden, haben junge Menschen normalerweise keine Situationen erlebt, die es ihnen ermöglichen, die Bedeutung der Luftqualität in ihrer täglichen Umgebung zu verstehen [15].

Angemessene Innenraumlufthqualität wird definiert als Luft ohne Schadstoffe in schädlichen Konzentrationen gemäß den Empfehlungen anerkannter Behörden und in der mindestens 80 Prozent der Nutzer mit den Bedingungen zufrieden sind [14]. Interne und externe Kontaminationsquellen sowie die Aktivitäten der Nutzer und eine schlecht gewartete Lüftungs- und Klimaanlage beeinflussen die Luftqualität [14].

In Räumen mit hoher Belegung, wie Klassenzimmer in Schulen, tragen Menschen zur Verschlechterung der Innenraumlufthqualität bei. Durch das Atmen gibt der Nutzer CO_2 proportional zur Freisetzung von Gerüchen und Schadstoffen wie Bakterien ab [18]. Auch Wasser geben Menschen beim Atmen ab, aber die Hauptquelle für die Wasserausscheidung durch den Menschen ist das Schwitzen [12]. Kohlendioxid (CO_2) ist, wie von Höfner und Schütze beschrieben "... ein in der Erdatmosphäre natürlich vorkommendes Molekül, das sowohl farblos als auch geruchlos ist. Schülern ist es vor allem aufgrund des Klimawandels und seiner Bedeutung als Treibhausgas bekannt". Viele in der Luft vorhandene Schadstoffe sind sowohl farblos als auch geruchlos, und die menschliche Nase ist nicht in der Lage, langsame Anstiege der Konzentration von geruchsintensiven Schadstoffen in Innenräumen wahrzunehmen [15].

CO_2 wird im Allgemeinen nicht als schädlich angesehen, außer in Konzentrationen von mehr als 5000 ppm. Diese Konzentration kann dann Atemnot, Verwirrung und Konzentrationsstörungen verursachen [15]. Dennoch korreliert CO_2 mit VOCs in Innenräumen, wie bereits im 19. Jahrhundert von Max von Pettenkofer erkannt wurde. Die CO_2 -Konzentration dient nach Pettenkofer lediglich als Referenzwert für das Vorhandensein anderer Schadstoffe. Nach mehreren Experimenten kam er zu dem Schluss, dass ein Raum mit einer CO_2 -Konzentration von über 1000 ppm (dem Pettenkofer-Grenzwert) als schlechte Luftqualität eingestuft werden sollte. Später führte Wanner 1982 ähnliche Experimente durch, bei denen er feststellte, dass bei einer CO_2 -Konzentration von 1500 ppm und höher in einem Raum mit Geruchsbelästigung zu rechnen ist [18]. Gemäß dem deutschen Bundesumweltamts beträgt der durchschnittliche Wert, der während des

Unterrichts in einem Klassenzimmer aufrechterhalten werden soll, 1000 ppm, kurzzeitige Spitzenwerte von beispielsweise 1500 ppm aber akzeptabel sind [10].

Der Überschuss an CO₂ ist nicht der Grund, was Menschen unwohl fühlen lässt. Auch der Sauerstoffmangel trägt nicht dazu bei, da der Körper den Sauerstoffmangel nicht bemerken kann. Wahrscheinlich resultiert das Unwohlsein aus der Anwesenheit anderer Verbindungen, die von Menschen oder anderen Quellen eingeführt werden. Die CO₂-Konzentration muss um 1 Prozent ansteigen (10.000 ppm), bevor Menschen sich schläfrig fühlen, der Sauerstoffgehalt in der Luft allerdings würde es immer noch ermöglichen, normal zu arbeiten. Erst ab einer CO₂-Konzentrationserhöhung von 7 bis 10 Prozent (70.000 - 100.000 ppm) würde der resultierende Effekt die Erstickung sein [12].

CO₂ ist einfach zu messen und zu überwachen und wird daher unter folgenden Bedingungen als Indikatorgas für die Innenraumluftqualität (IAQ) verwendet: Es ist keine andere CO₂-Quelle im Raum vorhanden, und die Luftverschmutzung wird hauptsächlich durch Materialien im Raum oder die Außenluft verursacht [18]. Es sei hier darauf hingewiesen, dass die CO₂-Konzentration in Klassenzimmern von der CO₂-Emission der Schülerinnen und Schüler, Lehrer, der Lüftungsrate, der Zeitspanne sowie der Hintergrund-CO₂-Konzentration in der Außenluft abhängt. Zur Erfassung der CO₂-Konzentration in der Luft existieren verschiedenen Methoden, wobei die gebräuchlichste Methode auf der Infrarotabsorption basiert, bei der Infrarotlicht von CO₂-Molekülen absorbiert und später intensitätsabhängig gemessen wird. Je höher die CO₂-Konzentration, desto intensiver ist die Absorption des Infrarotlichts [15]. Eine effektive Möglichkeit, Gerüche, flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen oder VOCs zu messen gibt es nicht [19].

Insbesondere für Schulen ist zu beachten, dass Mindestlüftungsraten, die auf CO₂ als Indikator basieren (auch wenn es als guter Indikator zur Bestimmung der Lüftungsrate gilt) und in gewissem Maße auch auf Emissionen von Baumaterialien, nicht das Entstehen von Gesundheitsproblemen oder Komfortbeschwerden verhindern [12]. Außerdem sollte beachtet werden, dass die Qualität der Innenraumumgebung einer Schule in Zusammenhang steht mit der Qualität der Innenraumumgebung im Zuhause der Nutzer. Daher kann es letztendlich nicht als einseitiger Faktor betrachtet werden, wenn nach Lösungen gesucht wird [16]. Dennoch kann die Durchführung von Messversuchen dazu

beitragen, dass Schüler sich der Bedingungen zur Aufrechterhaltung einer guten Innenraumluftqualität in Schulen bewusst werden und somit die Luftqualität durch Nutzerbewusstsein und Bildung verbessert werden kann [15].

5.4.1.2 Messergebnisse

Die CO₂-Werte für jeden Raum werden als Durchschnittswerte aller Sensoren in den Klassenzimmern berechnet. Die Messungen wurden insgesamt in drei Klassenräumen durchgeführt, wobei aufgrund von Nichtnutzung während des Datenerfassungszeitraums die Daten aus dem Klassenzimmer im zweiten Stock (Raum 2.12) nicht präsentiert werden können.

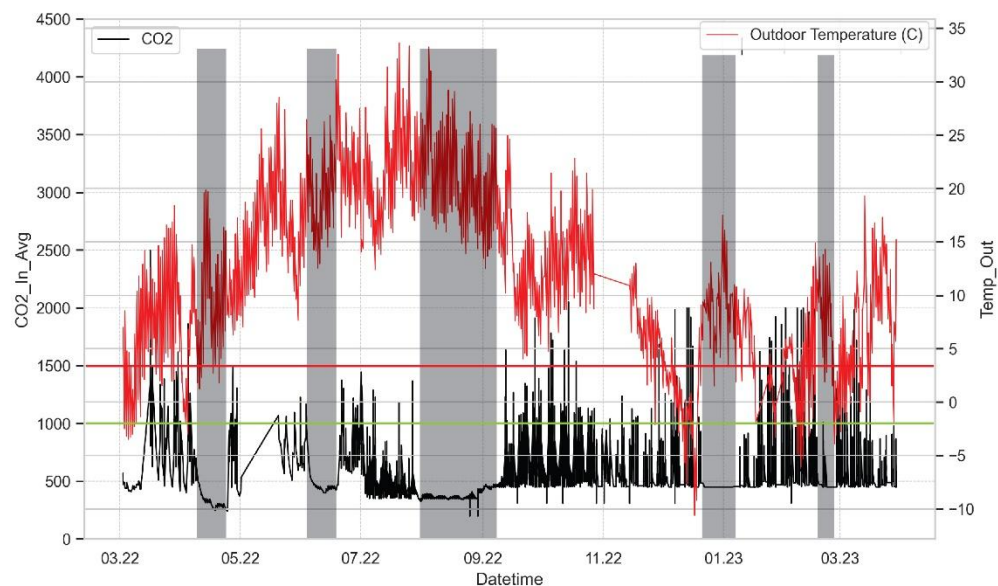


Abbildung 85: Klassenraum 1.11, CO₂-Konzentration während der Unterrichtszeiten gegen Außentemperatur

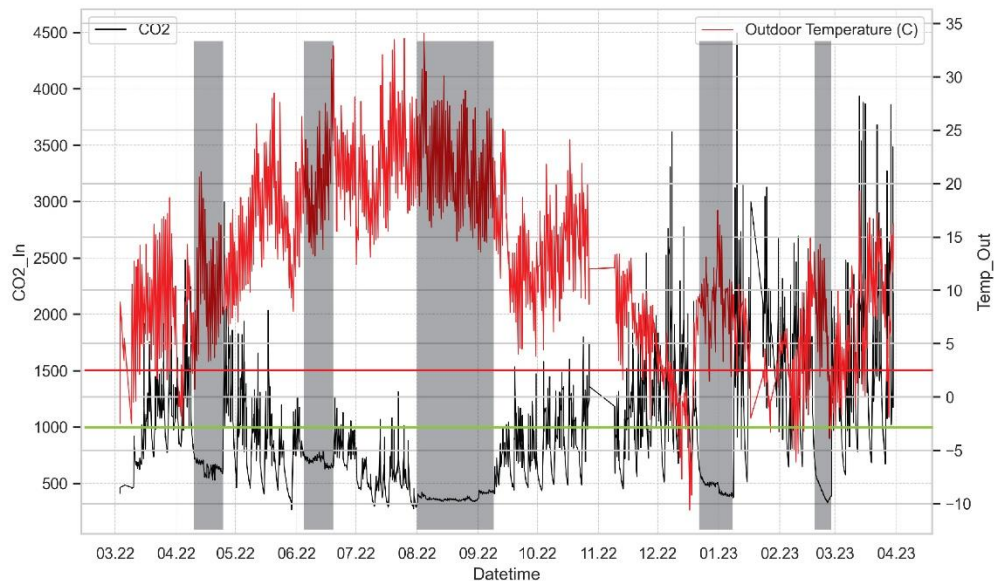


Abbildung 86: Klassenraum 3.01, CO₂-Konzentration während der Unterrichtszeiten gegen Außentemperatur

Die obigen Abbildungen (Abbildung 85 und Abbildung 86) veranschaulichen die CO₂-Konzentration in den Klassenzimmern während der Unterrichtszeiten (zwischen 08:00 und 13:30 Uhr). Die grauen Blöcke repräsentieren die Ferienzeiten. Die Wochenenden sind nicht spezifiziert, können jedoch anhand der periodischen Abfälle in den Daten beobachtet werden.

In beiden Räumen, insbesondere in Raum 3.01, fällt die umgekehrte Beziehung zwischen CO₂-Gehalt und Außentemperatur auf. Die Abbildung 87 zeigt diese Beziehung zusammen mit einer quadratischen Polynomregressionslinie, bei der mit sinkender Außentemperatur die CO₂-Konzentration steigt. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Verhalten der Nutzer in Bezug auf das Öffnen von Fenstern in den kalten Jahreszeiten zu erwarten, da das Verhalten des Fensteröffnens in diesen Zeiten weniger häufig auftritt. Abbildung 88 zeigt die Beziehung zwischen dem Verhalten des Fensteröffnens und der Außentemperatur.

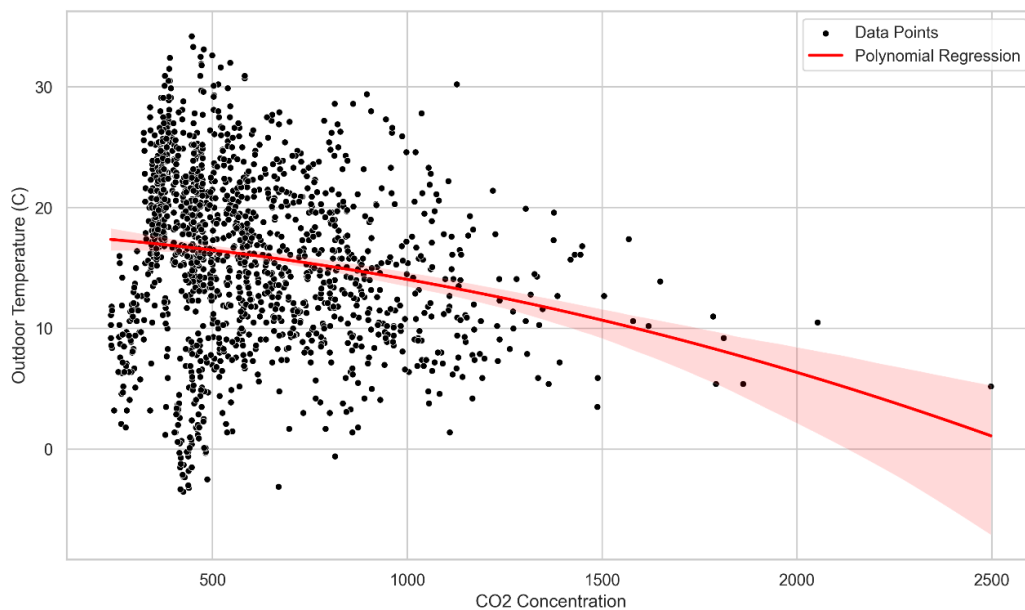


Abbildung 87: CO₂-Konzentration gegen Außentemperatur

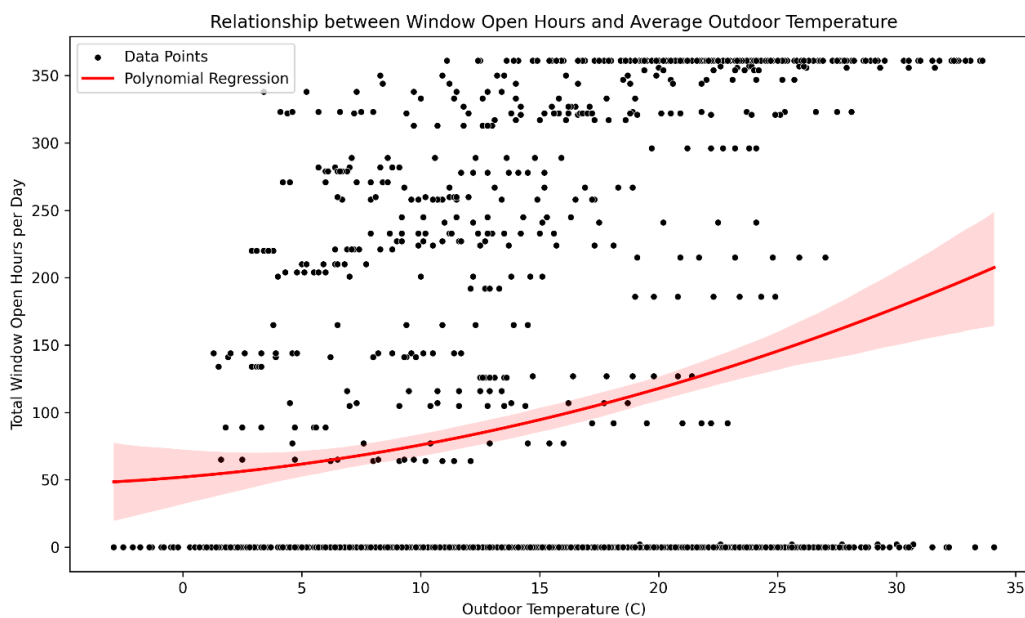


Abbildung 88: Gesamtstunden, in denen das Fenster während eines Tages geöffnet war, gegen die Außentemperatur

Abbildung 89 und Abbildung 90 zeigen die Gesamtanzahl der Stunden, in denen die CO₂-Konzentration über 1500 ppm akkumuliert wird, aufgeschlüsselt nach jedem Monat. Hierbei ist zu beachten, dass die Zahlen je nach Außentemperatur in verschiedenen Jahren zu variieren scheinen, während die Trends, wie zuvor erläutert, gleichbleiben.

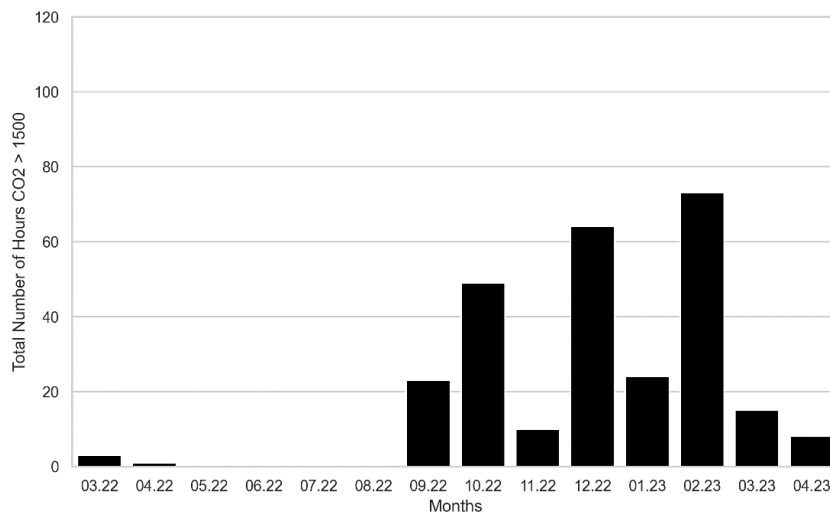


Abbildung 89: Klassenraum 1.11, Gesamtstunden, in denen die CO₂-Konzentration während der Unterrichtsstunden pro Monat über 1500 ppm liegt

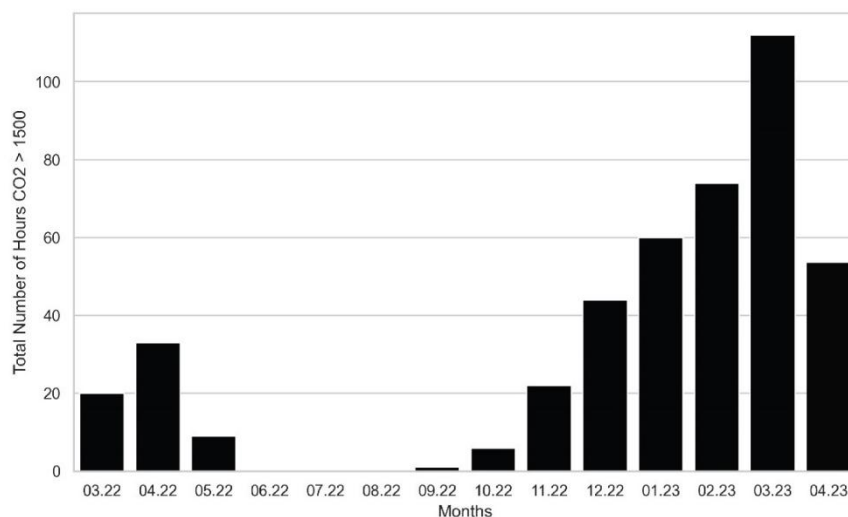


Abbildung 90: Klassenraum 3.01, Gesamtstunden, in denen die CO₂-Konzentration während der Unterrichtsstunden pro Monat über 1500 ppm liegt

Beispiele für Wochen aus einem warmen Zeitraum (13.-18.03.2023) und einem kalten Zeitraum (05.-10.12.2022) veranschaulicht Abbildung 91 und Abbildung 92; CO₂-Konzentration zusammen mit dem Verhalten des Fensteröffnens und des Lüfterbetriebs.

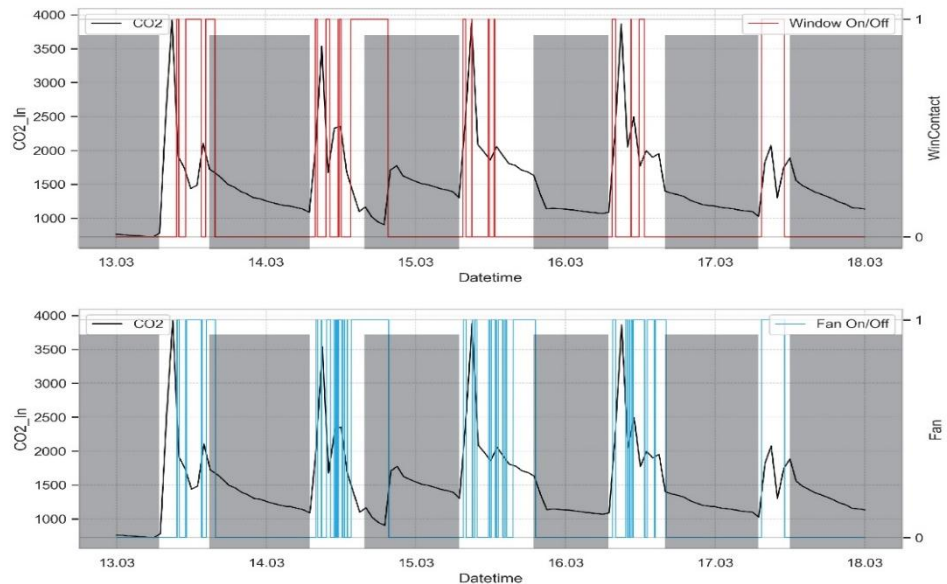


Abbildung 91: Klassenraum 3.01, Beispielswoche aus einer warmen Periode

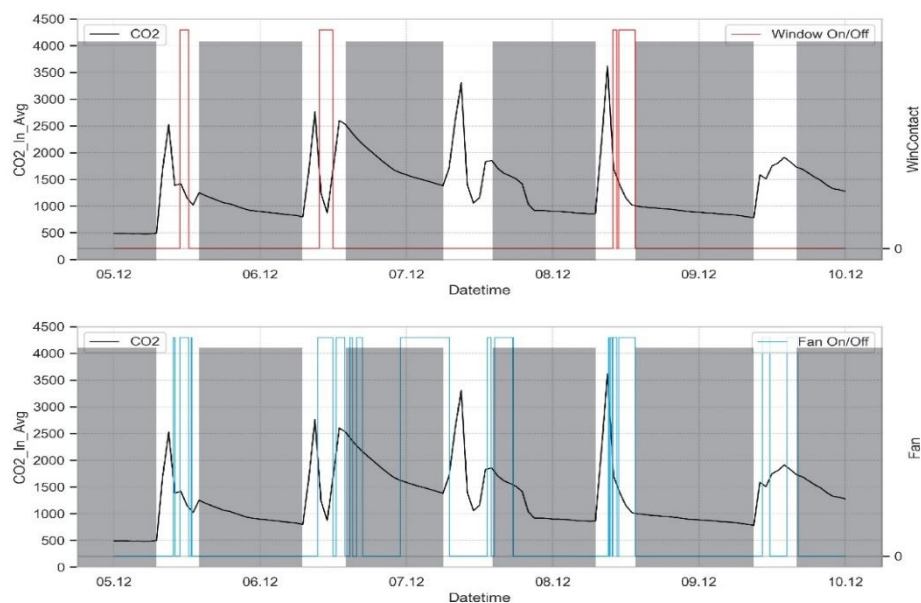


Abbildung 92: Klassenraum 3.01, Beispielswoche aus einer kalten Periode

5.4.2 Temperatur

Die Temperaturprofile in den Klassenzimmern während der Unterrichtszeiten unterscheiden sich im Laufe des Jahres. Das Klassenzimmer im Erdgeschoss verzeichnet insgesamt niedrigere Temperaturen sowohl im Winter als auch im Sommer. Abgesehen von einigen Ausreißern überschreitet das Klassenzimmer 1.11 in warmen Perioden 27°C nicht und fällt in der kalten Periode nicht unter 19°C. Das Klassenzimmer 3.01 im obersten Stockwerk zeigt dabei einen ähnlichen Trend in Bezug auf die Beziehung zwischen Innen- und Außentemperatur, erreicht jedoch im Sommer 31°C. Abbildung 93 und Abbildung 94 veranschaulichen diese Zusammenhänge.

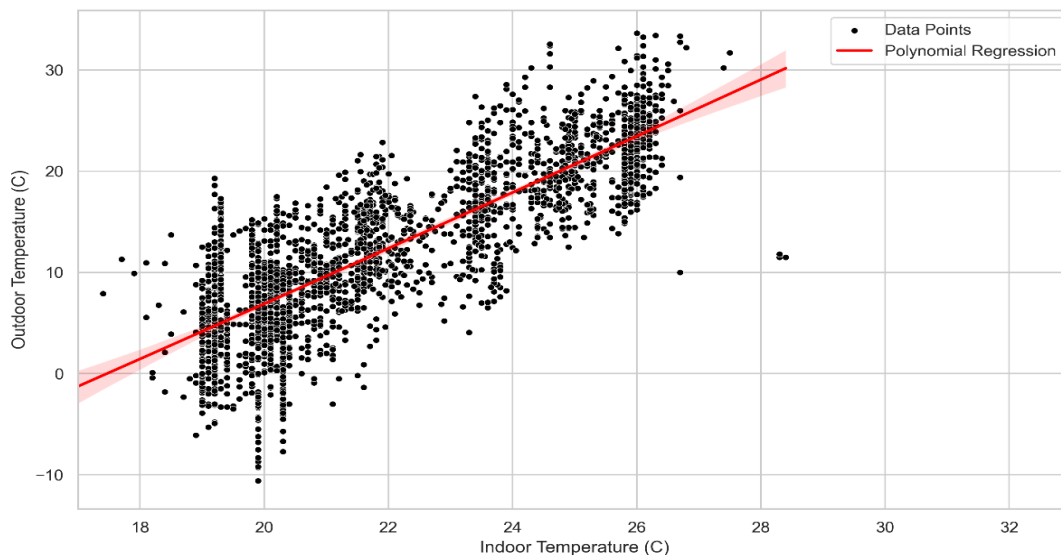


Abbildung 93: Klassenraum 1.11, Innentemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur

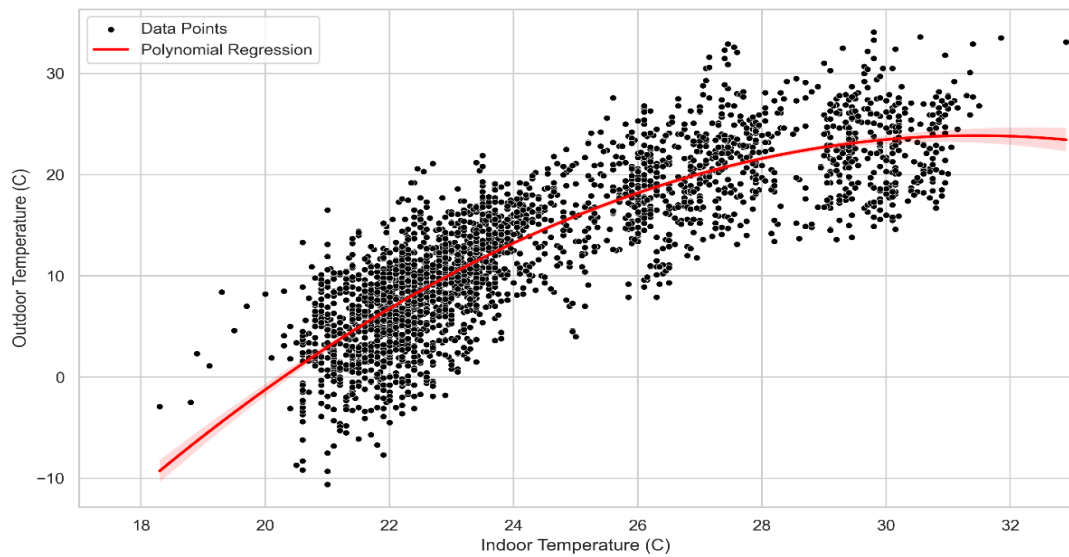


Abbildung 94: Klassenraum 3.01, Innentemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur

5.4.3 Heizungsähler

Die Daten der Heizungsähler beginnen im September 2022. Die Trendlinie weist für beide Klassenzimmer ab November einen steilen Anstieg auf, wobei der Anstieg im Klassenzimmer 1.11 im Vergleich zu Klassenzimmer 3.01 stärker ist.

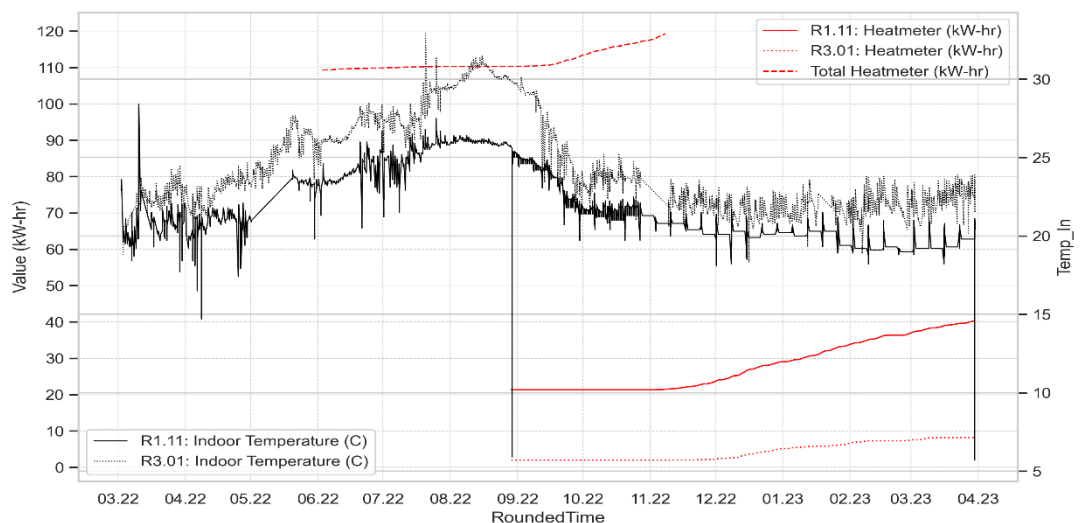


Abbildung 95: Innentemperatur und Heizungsähler (Klassenraum 1.11, 3.01, Gesamt)

5.4.4 Tageslicht

In beiden Klassenzimmern werden mit denselben Sensoren, die in Kopfhöhe (1,1 m) eines sitzenden Schülers an den Wänden angebracht sind, auch die Tageslichtverhältnisse gemessen. Allerdings wurden beide Sensoren im Klassenzimmer 1.11 im Erdgeschoss nach den ersten vier Monaten fehlerhaft, sodass die Übermittlung von zuverlässigen Daten leider nicht mehr möglich war. Daher werden nur die ersten vier Monate der Daten veranschaulicht. Das weitere Klassenzimmer 3.01 verfügt über den vollständigen Datensatz. Obwohl die Datenlängen nicht identisch sind, ist der gemeinsame Zeitraum dennoch vergleichbar. Das Klassenzimmer im Erdgeschoss liegt auf der Nordseite, während das andere Klassenzimmer im obersten Stockwerk liegt und direkt nach Süden ausgerichtet ist. Dies ist an den Tageslichtwerten im Vergleich erkennbar, wie in Abbildung 96 und Abbildung 97 dargestellt.

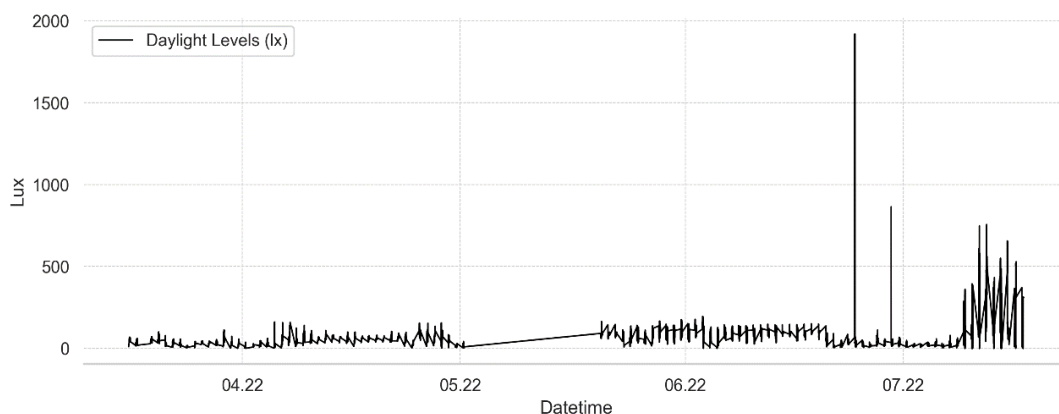


Abbildung 96: Klassenraum 1.11, Tageslicht

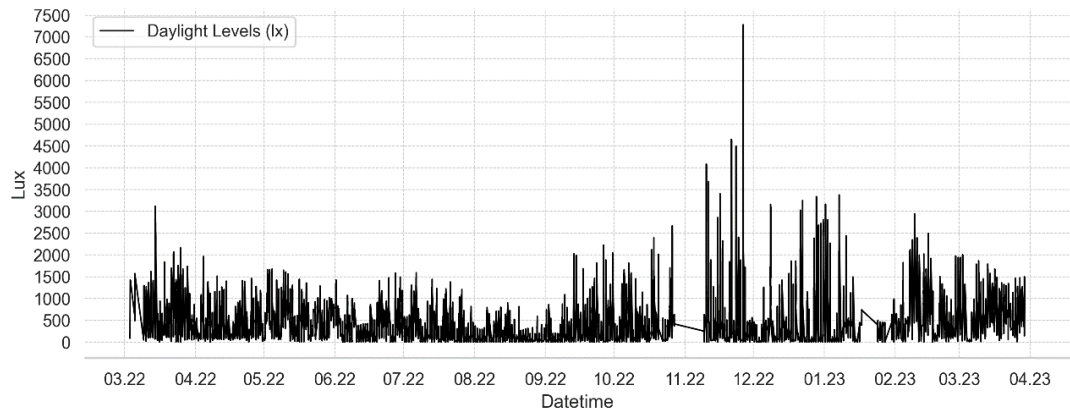


Abbildung 97: Klassenraum 3.01, Tageslicht

Abbildung 98 und Abbildung 99 zeigen die Gesamtanzahl der Stunden pro Monat, in denen die Tageslichtwerte während der Unterrichtszeiten unter 200 Lux fallen. Wie in den Zeitreihengrafiken zu sehen ist, schneidet das Klassenzimmer 3.01 besser ab als das Klassenzimmer 1.11.

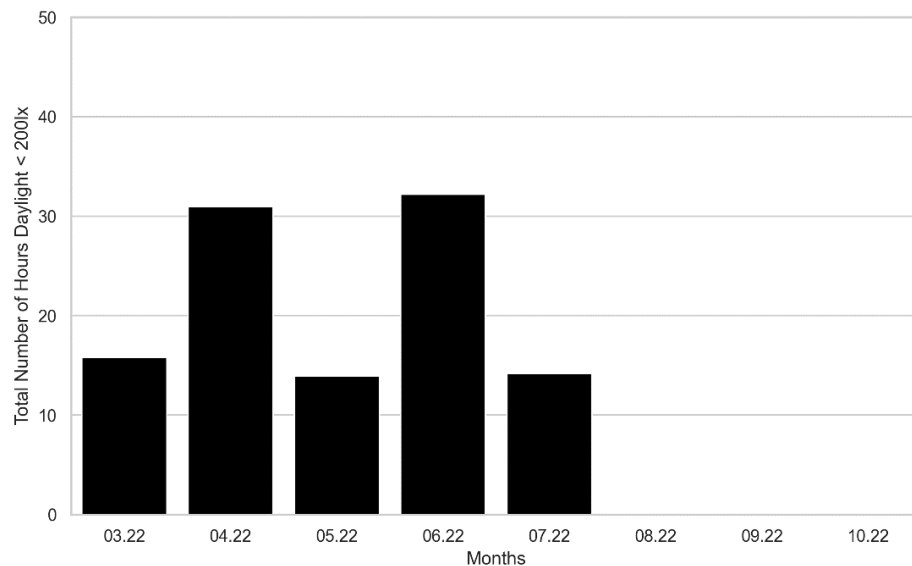


Abbildung 98: Klassenraum 1.11, Gesamtanzahl der Stunden, in denen das Tageslichtniveau unter 200 Lux liegt, aufsummiert über die Monate

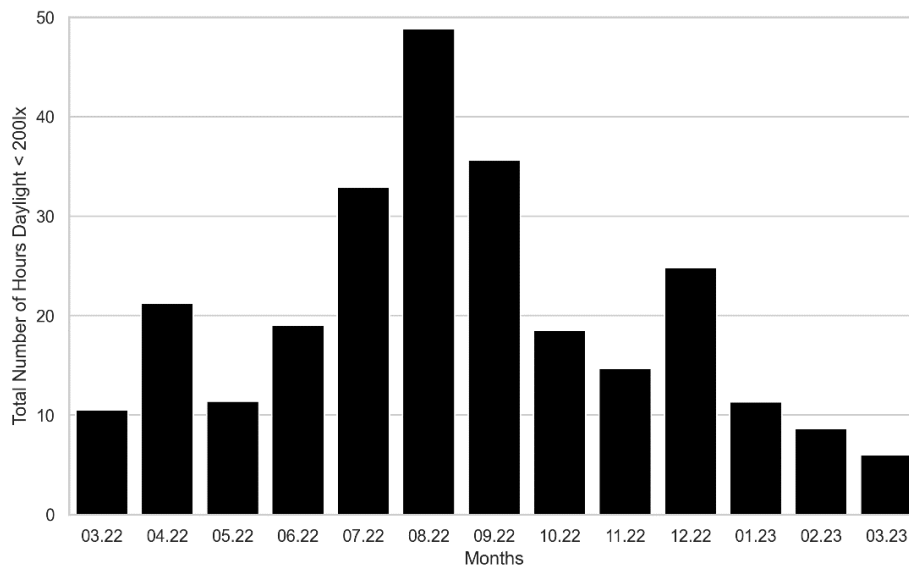


Abbildung 99: Klassenraum 3.01, Gesamtanzahl der Stunden, in denen das Tageslichtniveau unter 200 Lux liegt, aufsummiert über die Monate

5.5 Nutzerbefragung (Survey)

Eine systematische Nutzerumfrage wurde nicht durchgeführt. Allerdings wurde am 30. Januar 2023 eine umfassende Präsentation und Vorlesung für die gesamte Lehrerschaft und die Schüler organisiert. Bei dieser Veranstaltung beteiligten sich die Teilnehmer lebhaft an einer Diskussion mit Prof. Thomas Auer über die Gestaltung des Gebäudes, welche Prinzipien wichtig waren, wie die tatsächlichen Nutzer es wahrnehmen, verstehen und es bedienen. Es wurden keine Bedenken hinsichtlich der Raumnutzung und des Nutzerkomforts geäußert. Es kamen jedoch mehrere Ideen aus der Veranstaltung hervor, wie insbesondere die Schüler noch stärker dazu ermutigt werden könnten, aktive Teilnehmer des Gebäudes zu werden und sich generell stärker hinsichtlich der klimabedingten Maßnahmen bewusst zu werden. Diese Leitgedanken werden im folgenden Kapitel weiter erläutert.

6. Pädagogische Integration

Das Arbeitspaket 4 zeigt Arbeits- und Themenschwerpunkte zur pädagogischen Integration des architektonischen Konzepts auf und berichtet über die Durchführung der Veranstaltung und des Workshops an der Waldorfschule in Stuttgart vor Ort.

6.1 Themenschwerpunkte zur pädagogischen Integration des architektonischen Konzepts

Die in der freien Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart verbauten Systeme sind wie folgt zusammenzufassen:

1) Heizen

- a) Radiatoren in den Klassenräumen, Thermostatventil
- b) Fußbodenheizung Speisesaal/Atrium
- c) Luft-Nachheizung zentr. Lüftungsanlage Küchen-/Speisebereich

2) Kühlen

- a) Wandkühlung Eurythmie
- b) Passive Kühlung über thermische Masse, Ventilator ins Atrium

3) Lüften

- a) Natürliche Fensterlüftung mit dezentralen Lüftern Atrium/Klassenzimmer
- b) Zentrale mechanische Lüftung Küche/ Speiseraum, Mischlüftung

4) Sonnenschutz

5) Kunstlicht

6) Energie

a) Fossile Energieträger (Gas-BHKW)

b) Regenerative Energie

1. Sonnenenergie (Photovoltaik)

2. Erdwärme (Erdkanal, Kühlen)

Die für die pädagogische Integration der Themenbereiche aus dem architektonischen Konzept sowie die damit verbundenen Einflüsse am Gebäude wurden entsprechend der Schulfachzugehörigkeit ausgearbeitet und sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19: Pädagogische Integration

Thematik	Schulfach		Einfluss Gebäude
1) Klima/Standort	Phy- sik	Erd- kunde	
a) Strahlung			
i) Direkt/Diffusstrahlung			Fenster/Visuell/Kühlen
ii) Solares Spektrum			Sonnenschutz
b) Temperatur	Erdkunde		
i) Tag/Nachtschwankungen			Gebäudehülle/Thermisch
ii) Jahreszeitenklima			Gebäudehülle/Thermisch
iii) Feuchte			Gebäudehülle/Thermisch
c) Wind			Hygienisch/Lüften
d) Niederschlag			Installationen
2) Menschliche Behaglichkeit	Phy- sik	Bio- logie	
a) Thermische Behaglichkeit			Heizen/Kühlen
i) Grundlagen			
(1) Wege der Wärme- übertragung	Physik		
(2) Energieumsatz Mensch	Biologie		
ii) Bewertung des thermischen Komforts	Biologie		
(1) PMV-Index			
(2) Adaptives Komfortmodell			
(3) Faktoren			
(a) Lufttemperatur			

(b) MRT	Biologie	
(c) Luftfeuchte		
(d) Luftgeschwindigkeit		
(e) Aktivitätsgrad		
(f) Bekleidungsfaktor		
iii) Heizen/Kühlen		
(1) Passiv	Physik	
(a) Solarer Eintrag		Fenster
(b) Thermische Speicher- masse		Bauteil-Nachtauskühlung
(c) Umgebungswärme		Erdkanal
(d) Adiabate Kühlung		
(2) Aktiv		Radiatoren
b) Hygienische Behaglichkeit		Fensterlüftung/Ventilatoren
i) Grundlagen	Biologie	
(1) Mensch (Geruch/Atmung)		
(2) Luft		
ii) Luftbelastungen		
(1) Gerüche		
(2) VOCs		
(3) CO ₂		
(4) Feuchte		
(5) Feinstaub		
iii) Lüftungsarten	Physik	
(1) Natürliche Lüftung		
(2) Mechanische Lüftung		
(3) Hybride Lüftung		
c) Visuelle Behaglichkeit		Fenster/Sonnenschutz/Kunstlicht
i) Grundlagen		
(1) Mensch (Auge/zirkadianer Rhythmus)	Biologie	
(2) Lichtspektrum	Physik	
(3) Lichtgrößen		
(4) Lichtfarben/Farbmischung		
ii) Kunstlicht		
d) Akustische Behaglichkeit		Schallabsorber, Fenster
i) Grundlagen		
(1) Mensch (Ohr, Hörbereich)	Biologie	
(2) Schall	Physik	
(a) Schallübertragung		
(b) Schalltechn. Größen		
ii) Nachhallzeit		
iii) Schallschutz		

3) Energie	Physik	
a) Relevante Energieformen in Gebäuden		
i) Thermische Energie		Wärme/"Kälte"
ii) Elektrische Energie		Strom
iii) Energieerzeugung		
(1) Fossile Energiequellen		Nahwärmenetz
(2) Regenerative Energiequellen		Geothermie, Photovoltaikanlage
b) Energiebilanz von Gebäuden		
i) Gewinne		Solare Gewinne, Interne Gewinne
ii) Verluste		Transmissionswärmeverluste, Lüftungswärme
iii) Energiebedarf/-verbrauch		
iv) Nutz-, End-, Primärenergie		
v) Graue Energie, LCA		

6.2 Vorlesung und Workshop

Am Montag, 30. Januar 2023 fand am Standort der freien Waldorfschule Uhlandshöhe eine Veranstaltung mit Präsentation und Workshop zur Vorstellung des architektonischen Konzepts sowie dessen technischen Umsetzung statt.

Zu Beginn hielt Herr Professor Dipl.-Ing. Thomas Auer eine Präsentation für alle Schülerinnen und Schüler sowie Lehrkräfte, in der die grundlegenden Konzepte zu thermischer Behaglichkeit, Bauphysik und energieeffizientem Design erklärt wurden. Der zweite Teil der Vorlesung konzentrierte sich primär auf das Gebäude selbst und erklärte, wie die Mechanismen hinter der Belüftung konzipiert wurden und wie diese funktionieren. Anschließend hatten die Schülerinnen und Schüler als auch die Lehrkräfte die Möglichkeit, Fragen zu stellen und über ihre Erfahrungen mit dem System im Gebäude zu diskutieren.

Im Anschluss an die Vorlesung fand ein ausgiebiger Workshop mit den Lehrern und dem Team der Technischen Universität statt, um zu erörtern, wie die Ergebnisse des Projekts in den Lehrplan aufgenommen werden können.



Abbildung 100: Fotos von der Veranstaltung (Fotos: Bilge Kobas)

Im Anschluss an die Vorlesung fand ein ausgiebiger Workshop mit den Lehrern und dem Team der Technischen Universität statt, um zu erörtern, wie die Ergebnisse des Projekts in den Lehrplan aufgenommen werden können. Aus diesen Diskussionen und Anregungen wurden mehrere Ideen formuliert, insbesondere wie die Schülerinnen und Schüler noch stärker dazu ermutigt werden können, aktive Teilnehmer des Gebäudes zu werden

und wie sie sich stärker hinsichtlich der klimabedingten Maßnahmen bewusster werden. Darauf basierend wurden schließlich fünf Leitgedanken als zielführende Maßnahmen abgeleitet:

6.3 Leitgedanken

1. Kommunikation und Vermittlung grundlegender Konzepte des klimaadaptiven Designs anhand von Beispielen ortstypischer Architektur im Kunst- und Kulturunterricht.
2. Sichtbarmachung von Echtzeitdaten in den Klassenzimmern.
3. Freie Semesterprojekte zum klimagerechten Bauen und nachhaltigen Design, unter Verwendung des Gebäudes als Fallstudie.
4. Teilnahme von Schülern an den "Open-Days" des TUM Lehrstuhls Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen oder ähnlicher Lehrstühle an verschiedenen Universitäten.
5. Praktikum am Lehrstuhl zur aktiven Teilnahme an laufenden Forschungs- und Gestaltungsprojekten.

Im Folgenden werden die fünf Leitgedanken erläutert:

Leitgedanke 1:

Vermittlung grundlegender Konzepte des klimaadaptiven Designs anhand von Beispielen ortstypischer Architektur

Im Rahmen von Kunst- und Kulturunterricht kann ein Unterricht über ortstypische Architektur aus verschiedenen Regionen und Klimazonen der Welt abgehalten werden. Dabei werden ausreichende und einfach umsetzbare Lösungen präsentiert, um den Zusammenhang zwischen Klima und Gestaltung zu verdeutlichen. Ein solcher Unterricht soll sich prinzipiell an alle Studenten richten, auch an diejenigen, die nicht unbedingt eine berufliche Zukunft oder ein vertieftes Interesse an dem Thema haben bzw. planen.

Leitgedanke 2:

Sichtbarmachung von Echtzeitdaten in den Klassenzimmern. Die Daten in den Schulalltag integrieren

Die Daten sollen in den Schulalltag integriert werden. Dafür könnten in den Klassenzimmer Sensoren mit Monitoren installiert werden, die Echtzeitdaten anzeigen. Auf diese Weise können die Schülerinnen und Schüler vertraut gemacht werden mit den Variationen der Raumklimafaktoren über die Zeit hinweg und sie können beobachten, wie sich diese Faktoren verändern, wenn sie Teile des Gebäudes nutzen.

Leitgedanke 3:

Freie Schulprojekte zu nachhaltigem Design

Bei ihren Schulprojekten können die Schülerinnen und Schüler wählen und sich auch auf nachhaltiges Design im Allgemeinen konzentrieren und dabei das Gebäude selbst als Fallstudie verwenden. Einfache Handheld-Sensoren, die keine bis minimale Datenauswertung erfordern, könnten zu diesem Zweck erworben und an die Schülerinnen und Schüler verteilt werden. So können dann ihre eigenen Forschungsfragen formuliert und entsprechend eigene Daten gesammelt werden. Diese selbständige und projektbezogene Vorgehensweise würde dazu beitragen, ihnen partizipativ und unmittelbar ein Gefühl für das Klima und die Auswirkungen von Gebäudeplanung und -betrieb zu vermitteln.

Leitgedanke 4:

Beteiligung von Schülerinnen und Schülern an den Tagen der offenen Tür

Der Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen kann ab 2024 Tage der offenen Tür für zukünftige Schülerinnen und Schüler von Gymnasien und/oder Universitäten organisieren. Bei diesen Veranstaltungen werden das Forschungs- und Lehrteam des Lehrstuhls mit den potenziell Studierenden in Kontakt treten, um ihnen die

grundlegenden Ansätze, Ideen und Ziele hinter dem klimaadaptiven Design und der Forschung zu erläutern. Für Schülerinnen und Schüler, die ein besonderes Interesse an der fächerübergreifenden Thematik haben und sich auch vorstellen können, dies in Zukunft weiter zu studieren, bietet die Veranstaltung die Möglichkeit, wichtige Kontakte zu relevanten Fachbereichen und ihren Dozenten herzustellen und etwaige Fragen zu klären.

Leitgedanke 5:

Praktikum an Universitäten bei Lehrstühlen themenverwandter Forschung

Für Schülerinnen und Schüler aber auch Studierende, die ihre Praktika vertieft dieser Thematik widmen möchten, wird der Lehrstuhl diesbezügliche Praktika anbieten, bei denen sie in laufende Forschungs- und/oder Lehrprojekte innerhalb ihrer Praktikumszeit eingebunden werden können.

7. Symposium

Das Arbeitspaket 5 umfasst die öffentliche Präsentation der Projektergebnisse und digitale Dokumentation anhand des Symposiums „Zukunftsfähiger Schulbau“. Es enthält Informationen zu der Veranstaltung mit Zahl der Teilnehmenden, Vorstellung der Referierenden und behandelte Themen sowie eine abschließende Dokumentation der Inhalte. Die Veranstaltung „Zukunftsfähiger Schulbau“ fand am 29. April 2024 im Theaterhaus Stuttgart statt. Am 30. April 2024 wurde eine Exkursion zur Freien Waldorfschule Uhlandshöhe durchgeführt. Ziel der Veranstaltung war es, die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse öffentlich zugänglich zu machen und in einen breiteren fachlichen Kontext einzubetten. Mit Vorträgen aus Architektur, Pädagogik, Verwaltung und Forschung wurden verschiedene Perspektiven eingebunden. Die interdisziplinären Beiträge wurden in drei Themenblöcke aufgeteilt. Neben der Vorstellung einzelner Projekte bot das Symposium zwischen den Blöcken Raum für themenbezogenen Austausch und fachübergreifende Diskussionen. Die Inhalte wurden filmisch dokumentiert und auf einer Website langfristig zur Verfügung gestellt. Damit wird eine kontinuierliche Zugänglichkeit über die Veranstaltung hinaus ermöglicht.

Programmübersicht

Tag 1: Symposium 29. April 2024

Einlass: 12:30 Uhr

Block 1: 13 - 15 Uhr

Sabine Djahanschah

Stefan Behnisch

Otto Seydel

Barbara Pampe

Kaffeepause

Block 2: 16 – 18 Uhr

Jeannette Kuo

Florian Nagler

Vera Hartmann

Elisabeth Endres

Pause

Block 3: 19 – 21 Uhr

Tobias Wulf

Julian Weyer

Almut Grüntuch-Ernst

Thomas Auer

Get together

Tag 2: Exkursion 30. April 2024

Besuch der Freien Waldorfschule Uhlandshöhe, Stuttgart

7.1 Hintergrundinformation

Anzahl Teilnehmende: 192

Referierende:

Die Referierenden stammen aus verschiedenen Fachrichtungen, darunter Architektur, Ingenieurwesen, Pädagogik, Verwaltung und Stiftungswesen. Die fachliche Zusammensetzung ergibt eine thematische Breite und ermöglicht es, unterschiedliche Perspektiven auf das Thema zukunftsfähiger Schulbau aufzuzeigen und in einem gemeinsamen Rahmen zusammenzuführen.

Sabine Djahanschah (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Cluster-Bau, Städtebau)

Thomas Auer (Transsolar, Klima Engineering)

Stefan Behnisch (Behnisch Architekten)

Barbara Pampe (Pädagogische Architektur Montag-Stiftungen)

Jeannette Kuo (Karamuk Kuo Architects)

Elisabeth Endres (Ingenieurbüro IB Hausladen)

Florian Nagler (Florian Nagler Architekten)

Vera Hartmann (Sauerbruch Hutton)

Tobias Wulf (wulf architekten)

Almut Grüntuch-Ernst (Grüntuch Ernst Architekten)

Julian Weyer (C.F. Møller Architects)

Otto Seydel (Pädagoge und Schulreformer)



Zukunftsfähiger Schulbau

Programm Symposium 29. April 2024

Block 1: 13 - 15 Uhr
Sabine Djahanschah Eröffnungsvortrag
Stefan Behnisch Gedanken zu einer nachhaltigeren Gebauten Umwelt
Otto Seydel Pädagogische Anforderungen an ein Schulgebäude: „Notwendige“, „wünschenswerte“ und „überflüssige“?
Barbara Pampe Einfach Bauen - zukunftsorientiertes Lernen

Kaffeepause

Block 2: 16 - 18 Uhr
Jeannette Kuo Luft in die Mitte
Florian Nagler Gymnasium Diedorf - ein Rückblick
Vera Hartmann Berlin Metropolitan School
Elisabeth Endres Herausforderung Schulbau - eine Chance für die Baukultur

Pause

Block 3: 19 - 21 Uhr
Tobias Wulf Das verflogene Klassenzimmer
Julian Weyer Skandinavische Inspiration in Deutschland
Almut Grüntuch-Ernst Bildung Bauen
Thomas Auer Zukunftsfähiger Schulbau

Get together

DBUQ TUM

Freie Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart, Behnisch Architekten
© DAVID MATTHIESSEN

Abbildung 101 Veranstaltungsposter Symposium (Serena Keller, TUM)

7.2 Inhalt

Nachhaltigkeit ist gerade im Schulbau von großer Relevanz. Nicht ohne Grund spricht Bruce Mau im Hinblick auf Architektur von Schulen von „The Third Teacher“ (Loris Malguzzi). Er bringt damit zum Ausdruck, dass Schulgebäude und deren Architektur den Kindern etwas lehrt. Michel de Montaigne sagte „Der Ort, an dem die Kinder ihren Nutzen ziehen, die Schule, möge auch ihre Vergnügungsstätte sein“. Folglich kommen der architektonischen Qualität und Nachhaltigkeit im Schulbau eine besondere Bedeutung zu! Aber was bedeutet Nachhaltigkeit in diesem Kontext und wie lässt sich gewährleisten, dass Schulen trotz aller Anforderungen keine hochtechnisierten Lernmaschinen werden? Das Symposium hat zum Ziel, diese Fragen zu reflektieren und unterschiedliche Ansätze aufzuzeigen. Neben allgemeinen Betrachtungen wird anhand von zahlreichen herausragenden Fallbeispielen aus Deutschland und darüber hinaus die Frage der Nachhaltigkeit im Schulbau erörtert. Wieviel Technik braucht eine nachhaltige Schule? Was ist bzw. was schafft gute Aufenthaltsqualität? Wie kann Schule im besten Sinne zu einer „Vergnügungsstätte“ für unsere Kinder, Lehrkräfte, Betreibende und Bauherren – meist Kommunen – gestaltet werden? [20]

Im Folgenden werden die Referierenden vorgestellt und der auf dem Symposium gehaltene Vortrag dokumentiert.

Sabine Djahanschah (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Cluster-Bau, Städtebau)

Djahanschah arbeitete bis 1995 als Sachverständige für Schall- und Wärmeschutz. Seit 1996 leitet sie das Referat „Zukunftsfähiges Bauwesen“ der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Des Weiteren ist sie Jurymitglied für den deutschen Holzbaupreis und im International Advisory Board der Universität Stuttgart. Tätig ist sie auch für die Expertengruppe Städtebaulicher Denkmalschutz BMI (2012-2021), und die Gruppe „Lebendige Zentren“ des BMWSB (2021). Engagement zeigt sie als Mitglied des Stiftungsrats Bundesstiftung Baukultur im Kuratorium Fraunhofer IBP, sowie im Beirat Hering-Stiftung Natur und Mensch.

Vortrag: Eröffnungsvortrag

Für Sabine Djahanschah ist der Schulbau kein Bau, der einen Selbstzweck erfüllt. Er soll ermöglichen, dass Kinder selbstbestimmt und flexibel lernen können und die Räume möglichst langfristig genutzt werden. Zudem kann die Planung von Schulbauten genutzt werden, um neue pädagogische Lern- und Lehrformen zu diskutieren. Die Architektur sollte beispielhaft eingesetzt werden, dass das Gebäude die Kinder prägt und sie ein positives Verhältnis zu nachhaltigen Bauweisen entwickeln.

Thomas Auer (Transsolar, Klima Engineering)

Auer beschäftigte sich mit der Dekarbonisierung des Gebäudesektors und dem Nutzerkomfort bei Transsolar Energietechnik GmbH. Von 2001 bis 2008 folgte ein Lehrauftrag an der Yale University, sowie weitere Gastprofessuren. Seit 2014 ist er Professor an der TU München. Zu seinen Schlüsselpublikationen gehört „Zukunftsfähiger Schulbau“, in Zusammenarbeit mit Prof. Florian Nagler und Sabine Djahanschah.

Vortrag: Zukunftsfähiger Schulbau

Prof. Thomas Auer stellt in seinem Vortrag die Studie „Zukunftsfähiger Schulbau“ vor. An zwölf Schulen wurden Messungen, Untersuchungen sowie Befragungen durchgeführt, die interessante Ergebnisse zeigen. Überleitend zum Vortrag von Stephan Behnisch, in dem der Entwurf der Waldorfschule in Stuttgart vorgestellt wird, stellt er sich die Frage der Angemessenheit des Umfangs des technischen Aufwands an Schulen.

Stefan Behnisch (Behnisch Architekten)

Behnisch gründete 1989 das Büro Behnisch Architekten und expandierte damit 1999 in die USA. Im Bereich des nachhaltigen Bauens realisierte er wegweisende Projekte. Er lehrte außerdem an den renommiertesten Universitäten, darunter an der TU Delft, in Harvard, an der Yale School of Architecture, an der TU München, sowie viele Weitere.

Vortrag: Gedanken zu einer nachhaltigeren gebauten Umwelt

Für Stefan Behnisch soll sich die Architektur mit den Veränderungen im Lehren und Lernen auseinandersetzen. Sie muss, um für die Zukunft gewappnet zu sein, möglichst flexibel sein und modernen Schulkonzepten zahlreiche Möglichkeiten offenlassen. Schulbauten sind für ihn nicht nur Orte für den Unterricht, sondern sollen den kulturellen Wert der gebauten Umwelt vermitteln.

Barbara Pampe (Pädagogische Architektur, Montag-Stiftungen)

Pampe ist Co-Vorständin der Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft. Zuvor leitete sie den Bereich Pädagogische Architektur. Zudem lehrt sie an diversen Hochschulen im In- und Ausland. 2011 bis 2014 erhielt sie die Professur für Entwerfen und Gebäudelehre an der German University in Kairo. Des Weiteren ist sie Mitglied des Landesbeirats Schulbau in Berlin und Fachpreisrichterin bei zahlreichen Wettbewerben.

Vortrag: Einfach Bauen - zukunftsorientiertes Lernen

Wenn Barbara Pampe an zukunftsfähigen Schulbau denkt, ist für sie das wichtigste Stichwort Veränderung. Benötigt werden die richtigen räumlichen Antworten auf die Herausforderungen der Schule von heute, aber ebenso angepasste Richtlinien.

Jeannette Kuo (Karamuk Kuo Architects)

Kuo ist, zusammen mit Ünal Karamuk, Mitgründerin bei Karamuk Kuo und seit 2022 Professorin für Architektur und Konstruktion an der TU München. Von 2016 bis 2022 war sie Entwurfsprofessorin an der Harvard University Graduate School of Design. Die Bauten und Projekte von Karamuk Kuo überspannen verschiedene Maßstäbe und Typologien, darunter auch Bildungsbauten. Sie ist seit 2018 Mitglied des Bunds Schweizer Architekt/innen.

Vortrag: Luft in die Mitte

In Ihrem Vortrag präsentiert Jeannette Kuo den Neubau des Schulhauses Weiden, den sie gemeinsam mit ihrem Architekturbüro Karamuk Kuo entwarf. Der Erweiterungsbau des Weidener Schulcampus, der eine Turnhalle und 24 Klassenräume umfasst, bewahrt

durch seine kompakte Form den parkähnlichen Charakter des Campus und schafft durch den gemeinsamen Schulhof eine Verbindung zwischen Alt- und Neubauten. Die Turnhalle, die sonst oft versteckt angeordnet ist, wird zum Mittelpunkt der Schule und belebt den Alltag, während die oberen Stockwerke mit Klassenräumen eine flexible Lernlandschaft bieten.

Elisabeth Endres (Ingenieurbüro IB Hausladen)

Endres beschäftigt sich bei IB Hausladen mit Interdependenzen von Architektur, Material und Technik in Gebäuden und Quartieren. Ziel sind eine hohe Gebäudeperformance, minimaler Technikeinsatz, sowie Suffizienzstrategien u. a. in der Konzeption der Low-Tech Schule SOS Pilotschule Weimar. Ab 2019 leitet sie das Institut Bauklimatik und Energie der Architektur der TU Braunschweig.

Vortrag: Herausforderung Schulbau - eine Chance für die Baukultur

Für Elisabeth Endres zählt der Schulbau zu den bedeutendsten Aufgabenbereichen im Bauwesen. Angesichts der beträchtlichen Zeit, die Kinder in Schulgebäuden verbringen, sieht sie in ihnen einen prägenden Einfluss – es können Lebenshaltungen und Einstellungen geformt werden. In ihrem Vortrag stellt sie den Neubau der Staatlichen Gemeinschaftsschule in Weimar vor, bei dem zusammen mit der Montag Stiftung ein Planungsbaukasten für Schulen erstellt wurde.

Florian Nagler (Florian Nagler Architekten)

Nagler schloss 1989 seine Lehre als Zimmermann ab und widmete sich dem Studium der Architektur an der Universität Kaiserslautern. Nach mehreren Jahren als freier Mitarbeiter und Architekt gründete er 2001 gemeinsam mit Barbara Nagler das Architekturbüro Nagler Architekten. Seit 2010 ist er Professor für Entwerfen und Konstruieren an der TU München.

Vortrag: Gymnasium Diedorf - ein Rückblick

Florian Nagler ist der Auffassung, dass Schulbauten nicht auf ein bestimmtes pädagogisches Konzept zugeschnitten werden sollten. Stattdessen sollten darin viele pädagogische Konzepte umgesetzt werden können. In seinem Vortrag berichtet er über das Schmuttertal Gymnasium in Diedorf. Sein Büro hat viele Erkenntnisse aus dem Projekt gewonnen und im Anschluss als Gegenthese das Forschungsprojekt Einfach Bauen entwickelt.

Vera Hartman (Sauerbruch Hutton)

Vera Hartmann studierte an der BTU Cottbus, der ETSAB bei Enric Miralles, Barcelona und der UDK Berlin. Sie war u. a. bei Angélil Graham in Zürich und bei asymptote architecture in New York und ist seit 2000 bei Sauerbruch Hutton tätig. Als Projektleiterin betreut und verantwortet sie Projekte mit Schwerpunkt Wohnungs- und Bildungsbau über alle Leistungsphasen hinweg. Neben dem Planen von Neubauten, zählt das Bauen im Bestand und die Innenarchitektur zu ihren Spezialgebieten. Vera Hartmann ist Partnerin seit 2020 und wurde 2023 in die Geschäftsführung gewählt.

Vortrag: Berlin Metropolitan School

Vera Hartmann präsentiert in ihrem Vortrag die Berlin Metropolitan School. Bei diesem Projekt interessierte sie unter anderem auch das Thema Heimat. Wie kann die umgebende Bevölkerung in eine Schule integriert werden, die sonst eigentlich exklusiv funktioniert? Ein besonderes Augenmerk bei dem Projekt lag auf dem Thema Suffizienz, spezifisch Materialsuffizienz, Mehrfachkodierung und Flächensuffizienz.

Tobias Wulf (wulf architekten)

Wulf gründete 1987 das Architekturbüro wulf architekten, das heute international für anspruchsvolle und nachhaltige Projekte bekannt ist. Hier wurde das modulare Pilotprojekt „Münchner Lernhaus“ entwickelt und realisiert. Von 1991 bis 2022 erhielt Wulf die Professur für Baukonstruktion und Entwerfen an der HfT Stuttgart. Seine Tätigkeiten umfassen außerdem Vorträge, Preisgerichte und Gestaltungsbeiräte.

Vortrag: Das verflogene Klassenzimmer

Tobias Wulf versteht Schulbau im ursprünglichsten Sinne als Kulturbau. Architekten sollen mit diesem Bewusstsein Strategien entwickeln, mit denen sie dem gerecht werden. In seinem Vortrag betont er, dass charaktervolle Räume in der Lage sind, pädagogische Konzepte zu inspirieren. Hierbei präsentiert er Projekte aus seinem Büro, die innovativ, modular, weitergebaut und experimentell sind.

Almut Grüntuch-Ernst (Grüntuch Ernst Architekten)

Grüntuch-Ernst ist Mitbegründerin des gleichnamigen Architekturbüros. Sie lehrte an der UdK Berlin, ist seit 2011 Professorin an der TU Braunschweig und seit 2016 Mitglied der Akademie der Künste in Berlin. Sie ist international bekannt für Vorträge und Preisgerichte, darunter 2006 als Generalkommissarin des deutschen Beitrags für die 10. Internationale Architektubiennale sowie 2010 bis 2015 als Mitglied der Kommission für Stadtgestaltung München.

Vortrag: Bildung Bauen

Almut Grüntuch-Ernst sieht in der Digitalisierung eine große Herausforderung unserer Zeit. Einerseits kann durch Digitalisierung Bildung weltweit erweitert und vernetzt werden, andererseits macht sie die physischen Orte der Bildung besonders wichtig. Denn dort finden die zwischenmenschlichen Begegnungen sowie die sinnlichen Auseinandersetzungen mit Raum, Material und Natur statt. In ihrem Vortrag stellt sie die *Deutsche Schule Madrid* vor, geplant von ihrem Architekturbüro Grüntuch Ernst Architekten.

Julian Weyer (C.F. Møller Architects)

Weyer studierte an der Aarhus School of Architecture und ist seit 2007 Partner in C.F. Møller Architects. Er arbeitet europaweit mit innovativer Architektur, Landschaftsarchitektur und Städtebau, integriert mit sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit, hierunter Schul- und Ausbildungsprojekte von Campus bis Cluster.

Vortrag: Skandinavische Inspiration in Deutschland

Für Julian Weyer muss ein zukunftsfähiger Schulbau damit umgehen können, dass sich Unterricht und Pädagogik stetig weiterentwickeln werden. Ein „one-size-fits-all“-Modell gibt es nicht. In seinem Vortrag präsentiert er diverse Schulbauprojekte und deren Herausforderungen von C.F. Møller Architects.

Otto Seydel (Pädagoge und Schulreformer)

Seydel war 26 Jahre Mitarbeiter der Schule Schloss Salem. 2001 gründete er das Institut für Schulentwicklung. Seit 2010 berät er Schulträger bei Schulbaumaßnahmen. Er ist Beirat des Forums „Bau und Betrieb von Bildungseinrichtungen“ und Mitglied des Expertenteams der Montag Stiftung.

Vortrag: Pädagogische Anforderungen an ein Schulgebäude. „Notwendige“, „wünschenswerte“ und „überflüssige“?

Für Otto Seydel ist die richtige Balance zwischen anregenden, bewegten Situationen und fokussierenden, ruhigen Konstellationen der Ausgangspunkt, von dem aus Räume, Ausstattung und Nutzungskonzept verbunden werden müssen. Bei seinem Vortrag stellt er die Ergebnisse einer Studie vor, bei der etwa 40 Lernsituationen in der Schule untersucht wurden, die bestimmte Raumsituationen erfordern.



Abbildung 102: Foto Symposium Theaterhaus Stuttgart (Foto: TUM)



Abbildung 103: Fotos Symposium
Stefan Behnisch (links), Sabine Djahanschah (rechts) (Foto: TUM)

Realisierung eines Nearly Zero Energy Standards für die freie Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart

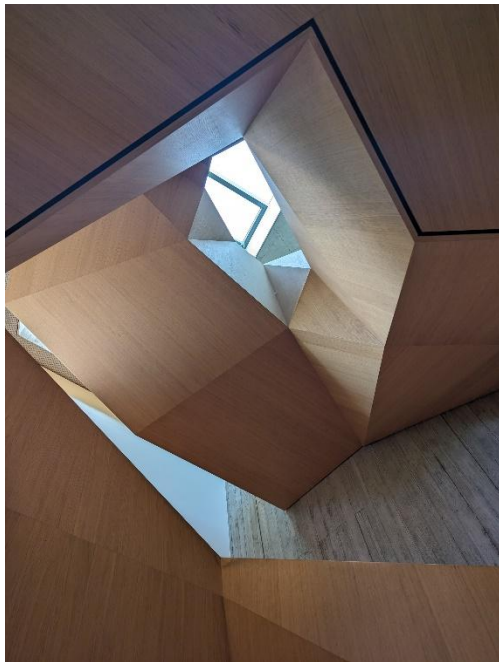


Abbildung 104: Exkursion Freie Waldorfschule Uhlandshöhe (Foto: TUM)

7.3 Bewerbung

Zur Bekanntmachung des Symposiums „Zukunftsfähiger Schulbau“ wurde ein mehrstufiges Vorgehen mit verschiedenen Kommunikationswegen umgesetzt, darunter Poster und Flyer, E-Mails, Beiträge auf Fachportalen, eine Kampagne über soziale Medien und eine Veranstaltungswebsite.

Im ersten Schritt wurden Themenschwerpunkte definiert, Referierende ausgewählt und das Programm erstellt, das verschiedene Perspektiven auf das Thema eröffnet. Aufbauend darauf wurden potenzielle Zielgruppen analysiert. Zu diesen zählten insbesondere Fachpersonen aus Architektur, Ingenieurwesen, Pädagogik und Verwaltung sowie Vertretungen von Städten, Kommunen, Ministerien, Schulämtern und Hochschulen. Zusätzlich wurde das Symposium als Fortbildung bei den ortsspezifischen Architektenkammern registriert, um die Ansprache dieser Zielgruppe zu unterstützen. Für die direkte Ansprache wurden öffentlich zugängliche, fachlich relevante Kontaktadressen mit inhaltlichem Bezug zum Thema des Symposiums genutzt.

Die Bewerbung wurde zusätzlich über die Website sowie über soziale Medien (YouTube, LinkedIn, Instagram) umgesetzt. Zur Steigerung der Sichtbarkeit wurde eine einheitliche Bildsprache entwickelt, bestehend aus Key Visuals, einem Veranstaltungsposter, Flyer und einem zentralen Webauftritt, der auch der späteren Dokumentation dient.



Abbildung 105 Titelcover Symposium (Serena Keller, TUM)

Ein zentrales Element der Kommunikationsstrategie war die Produktion kurzer Videobotschaften. Diese wurden im Vorfeld in Zusammenarbeit mit einer Content-Agentur (Proesler Kommunikation GmbH) von den Referierenden, Veranstaltenden und Fördernden aufgenommen und thematisierten sowohl den Hintergrund des Symposiums als auch die persönliche inhaltliche Verbindung der Referierenden zum Thema. Die Videos wurden auf der Website eingebunden und über soziale Medien (YouTube, LinkedIn) in mehreren Sequenzen veröffentlicht, angeleitet durch den unten dargestellten Redaktionsplan. Zur Reichweitenerhöhung teilten die Referierenden die Beiträge in ihren eigenen Netzwerken.

Zusätzlich wurde die Veranstaltung in Fachmedien und auf themenrelevanten Online-Plattformen (baunetz.de, german-architects.com, dbz.de, bm-online.de, arc.ed.tum.de) sowie in den Fortbildungsprogrammen der Architektenkammern angekündigt. Alle Veröffentlichungen verlinkten zudem auf die Website des Symposiums, auf der weitere Informationen zur Veranstaltung, zu den Referierenden sowie die Anmeldung und der Ticketverkauf zur Teilnahme bereitgestellt wurden.

Die Bekanntmachung der Website trug zugleich zur ersten Etablierung bei, da sie anschließend an die Veranstaltung als Plattform zur Dokumentation des Symposiums und zur Verbreitung der Projektergebnisse dient.

Redaktionsplan Bewerbung Videobotschaften

Die Videobotschaften dienten der inhaltlichen Bewerbung des Symposiums. Ziel war es, über persönliche Statements der Referierenden zentrale Themen anzureißen, Interesse zu wecken und zur Teilnahme einzuladen. Die Botschaften wurden über einen Zeitraum von drei Monaten von Februar bis April 2024 veröffentlicht. Dafür wurden sie über die Plattform YouTube bereitgestellt und auf der Veranstaltungswebsite eingebettet, ergänzt durch zweimal wöchentliche Beiträge auf LinkedIn.

Redaktionszeitraum: **Start:** KW 6 (Februar 2024)
 Ende: KW18 (Ende April 2024)
 Frequenz: 2 LinkedIn-Posts pro Woche

Tabelle 20: Redaktionsplan: Inhalte der Videobotschaften

Referierende	Thema der Videobotschaft	Veröffent- lichung
Stefan Behnisch	Architektur muss auf Veränderungen im Lehren und Lernen reagieren und Flexibilität für Schulkonzepte bieten	KW 6
Elisabeth Endres	Schulgebäude als prägende Lebensräume - Einfluss auf Haltungen und Einstellungen	KW 7
Almut Grüntuch-Ernst	Bedeutung physischer Bildungsorte im Kontext von Digitalisierung	KW 7
Florian Nagler	Schulbauten sollten pädagogisch offen bleiben und verschiedene Konzepte ermöglichen	KW 8
Julian Weyer	Schulbau muss mit pädagogischem Wandel umgehen können – kein „one-size-fits-all“-Ansatz	KW 9
Otto Seydel	Balance von bewegten und ruhigen Lernsituationen als Grundlage räumlicher Planung	KW 9
Tobias Wulf	Schulbau als Kulturbau – Räume mit pädagogischer Ausdruckskraft	KW 10
Vera Hartmann	Inklusion des sozialen Umfelds in Schulprojekte - Beispiel Berlin Metropolitan School	KW 10
Barbara Pampe	Zukunftsfähiger Schulbau erfordert Veränderung - räumlich und regelbasiert	KW 11
Sabine Djahanschah	Schulbau soll selbstbestimmtes Lernen fördern und langfristige Nutzung ermöglichen	KW 12
Thomas Auer	Studie „Zukunftsfähiger Schulbau“ - Messungen, Befragungen und Erkenntnisse aus zwölf Schulbauten	KW 13

Begleitende Maßnahmen

- Einheitliche Bildsprache mit Key Visuals zur Wiedererkennung
- Hashtag-Nutzung zu den Themenbereichen für erhöhte Reichweite
- Verlinkung zur Website mit Ticketfunktion
- Monitoring von Reichweite und Interaktionen auf LinkedIn und Website
- Einsatz weiterer Kommunikationskanäle (Poster, Flyer, E-Mail und Beiträge)

Gründe für die Kommunikationswege der Bewerbung

- Kombination gedruckter und digitaler Kanäle: Die parallele Nutzung von E-Mail, Fachportalen, Fortbildungsprogrammen, sozialer Medien und Website ermöglicht eine breite Ansprache fachlich relevanter Zielgruppen.
- Niedrigschwelliger Zugang zum Thema: Kurze Videobeiträge ermöglichen einen direkten Einstieg in zentrale Fragestellungen des Symposiums, auch für fachfremde Interessierte.
- Vielfalt der Perspektiven und persönliche Ansprache: Die Beteiligung der Referierenden stärkt die inhaltliche Authentizität und verdeutlicht die individuelle Relevanz des Themas. Die interdisziplinäre Zusammensetzung des Symposiums wird wiedergespiegelt und unterschiedliche Sichtweisen werden sichtbar.
- Erweiterte Reichweite: Die Verbreitung über soziale Medien, insbesondere durch das Teilen in den Netzwerken der Referierenden, erhöht die Sichtbarkeit in relevanten Fachkreisen.
- Kombination aus Inhalt und Format: Die Verbindung kurzer, thematisch fokussierter Aussagen mit visueller Ansprache unterstützt die Wiedererkennbarkeit und ergänzt Informationsformate wie Texte oder Programmeinträge.

7.4 Ergebnisverbreitung

Die Ergebnisverbreitung erfolgt anhand der Dokumentation des abgeschlossenen Symposiums über die Website der Veranstaltung. Die Inhalte der Vortragsreihe sind in drei Themenblöcke NACHHALTIGE BILDUNGSARCHITEKTUR, GEBAUTE REALITÄT und ZUKUNFTSWEISENDE BILDUNGSRÄUME aufgeteilt und werden mithilfe medialer Inhalte zur Verfügung gestellt. Dazu zählen gehaltene Präsentationen, Interviews und Einblicke sowie der Aufbereitung der gefilmten Vorträge.

Gründe für die Realisierung einer Website zur Ergebnisverbreitung:

- Erreichbarkeit und Reichweite (globale Verfügbarkeit, keine geografischen Grenzen, Möglichkeit zum Aufbau einer Wissensdatenbank)
- Flexibilität und Aktualisierung (Änderungen jederzeit möglich, Integration von multimedialen Inhalten)
- Interaktivität (Interaktionen, schnellere Kommunikation und Vernetzung)
- Sichtbarkeit und längerfristige Relevanz (Suchmaschinenoptimierung anhand von Keywords und Verknüpfung zu sozialen Medien)
- Datenanalyse (Einblicke in Leseaktivitäten und Traffic)

7.4.1 Internetpräsenz und Domain

Die Domain der Website lautet (Stand: September 2025):

<https://www.symposium-schulbau.com/>

Die Domain sowie die inhaltliche Verantwortung und Gestaltung der Website liegt zum Zeitpunkt der Berichterstellung bei der Technischen Universität München, TUM School of Engineering and Design, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Prof. Thomas Auer, Arcisstraße 21, 80333 München. (Stand: Oktober 2025)

Domain-Hoster: Wix.com Ltd.

Die Website wurde am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen vorbereitet und gestaltet und im Februar 2024 online gestellt. Die Plattform begleitete von Beginn an den Planungs- und Kommunikationsprozess. Während die Website vor dem Symposium als Planungs-, Ticketverkaufs-, und Werbeplattform genutzt wurde, wurde diese nach Abhaltung des Symposiums zur Ergebnisverbreitung der Inhalte, Kommunikation und Marketingzwecke verwendet. Die im Abschlussbericht erscheinenden Inhalte der Dokumentation sind der Website „Zukunftsfähiger Schulbau“ [20] und deren statistischen Auswertungen des Hosters [21] entnommen.

Der Aufbau der Website gliedert sich neben der Startseite in vier Hauptbereiche:

1. Vortragsreihe mit Themenblock I bis III
2. Referierende des Symposiums + Vorträge
3. Einblicke (Auszüge aus den Vorträgen)
4. Weitere Informationen zum Symposium und Kontakt



Abbildung 106 Website - Dokumentation des abgeschlossenen Symposiums (TUM) [20]

Die Startseite der Internetpräsenz „Zukunftsfähiger Schulbau“ beinhaltet neben der Vorstellung der Themenblöcke des Symposiums ein redaktionelles Interview mit Frau Sabine Djahanschah (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Cluster-Bau, Städtebau) zur Einführung. Ergänzt wird dies durch eine Übersicht aller Referierenden des Symposiums sowie bisher gebauten und geplanten Projekten, die in den Vorträgen vorgestellt werden. Die Veröffentlichung der professionell durch eine Content-Agentur aufbereiteten Videos erfolgte stufenweise ab Januar 2025 bis einschließlich April 2025 auf der Website des Symposiums. Aufgrund der großen Reichweite im geschäftlichen Umfeld wurde LinkedIn (weltweit größtes berufliches Netzwerk mit 930 Millionen registrierten Nutzern weltweit [22]) als weiteren Informationskanal in der Kommunikation der Inhalte des Symposiums gewählt. Dabei wurde im wöchentlichen Turnus jeweils ein neuer Teaser veröffentlicht und über den LinkedIn Kanal des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen entsprechend kommuniziert und kommentiert. Die vollständigen Videos wurden auf der Symposium-Website entsprechend platziert sowie über den YouTube-Kanal der Agentur Proesler Kommunikation veröffentlicht.

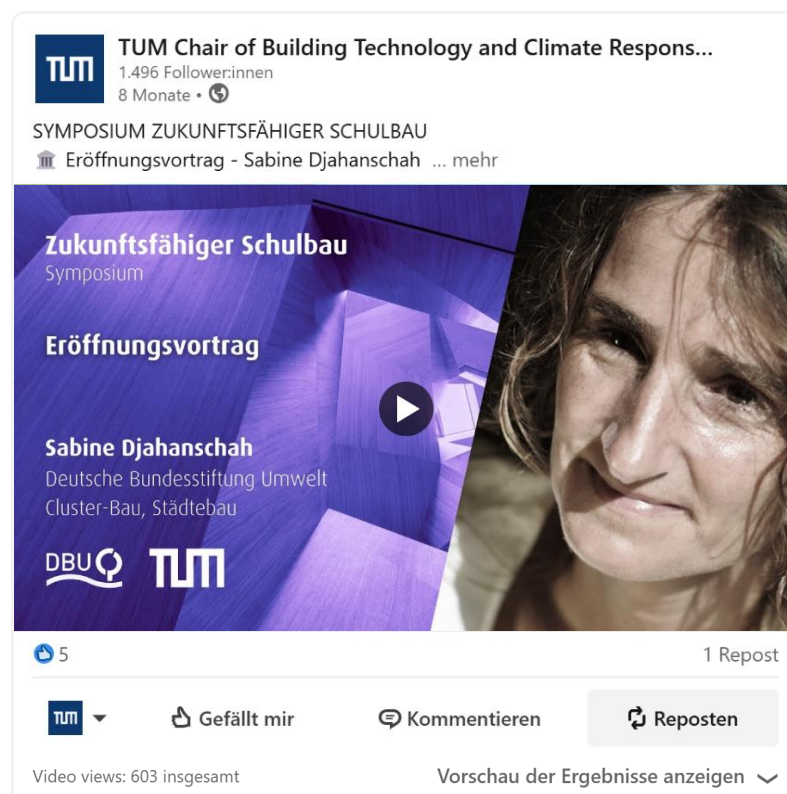


Abbildung 107: Beispiel LinkedIn Beitrag vom 05.02.2025 (TUM) [23]

7.4.2 Themenblock I bis III

Die Vortragsreihe „Zukunftsfähiger Schulbau“ präsentiert einen umfassenden Ansatz für die Bildungsarchitektur der Zukunft in drei miteinander verbundenen Blöcken. Sie beginnt mit grundlegenden Prinzipien, die pädagogische Bedürfnisse, nachhaltiges Design und ökologische Verantwortung miteinander verbinden, und geht über zu praktischen Umsetzungen, die reale Lösungen in zeitgenössischen Schulgebäuden zeigen, bevor sie in innovativen Ansätzen gipfelt, die kulturelle Sensibilität mit fortschrittlichen technischen Lösungen verbinden. Dieser Übergang von der Theorie zur Praxis und zur Innovation schafft einen ganzheitlichen Rahmen, der Flexibilität, Nachhaltigkeit und kulturelle Integration betont und gleichzeitig technische Anforderungen mit pädagogischen Bedürfnissen in Einklang bringt. Die Reihe zeigt, wie durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Bereichen Pädagogik, Architektur und Ingenieurwesen anpassungsfähige, umweltfreundliche Bildungsräume geschaffen werden können, die sowohl den heutigen Bedürfnissen als auch künftigen Generationen gerecht werden. In den Themenblöcken ist die Dokumentation der Vorträge des Symposiums zu finden.

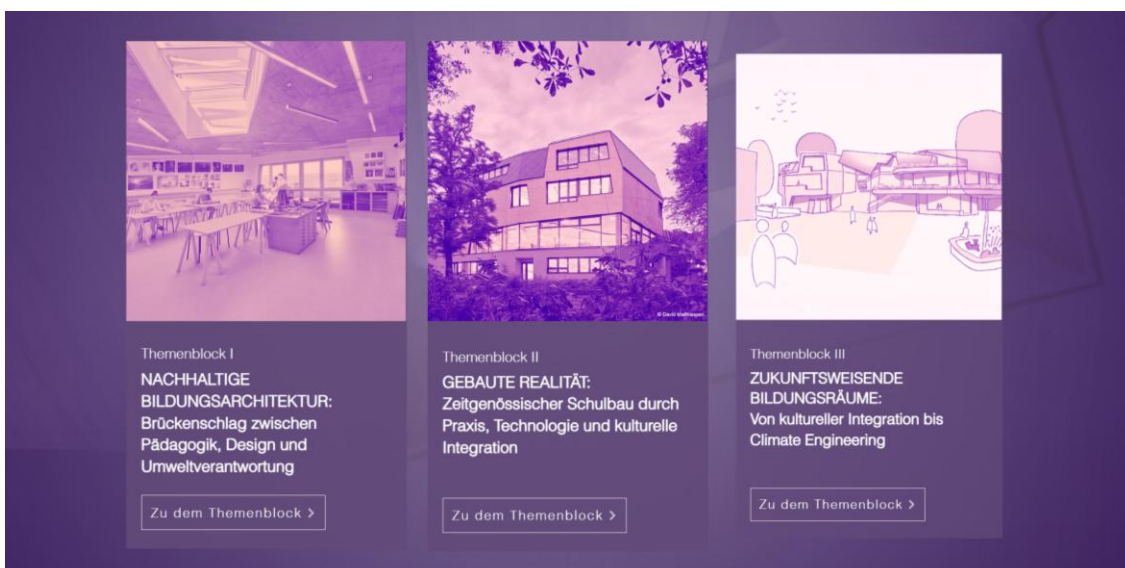


Abbildung 108 Website - Dokumentation der Themenblock I bis III (TUM) [20]

Themenblock I: NACHHALTIGE BILDUNGSARCHITEKTUR

Brückenschlag zwischen Pädagogik, Design und Umweltverantwortung

Dieser Themenblock bringt Experten aus den Bereichen Architektur, Pädagogik und ökologische Nachhaltigkeit zusammen, um die Schnittmenge zwischen modernen Bildungsbedürfnissen und nachhaltigen Baupraktiken zu untersuchen. Gemeinsam analysieren diese Vorträge, wie architektonisches Design die sich entwickelnden Bildungsbedürfnisse unterstützen und gleichzeitig die Umweltverantwortung und die Anpassungsfähigkeit für zukünftige Generationen bewahren kann.

Referierende: Sabine Djahanschah (Deutsche Bundesstiftung Umwelt), Stefan Behnisch (Behnisch Architekten), Otto Seydel (Pädagoge und Schulreformer), Barbara Pampe (Architektin, Vorständin Montag Stiftung Jugend und Gesellschaft)

Themenblock II: GEBaute REALITÄT

Zeitgenössische Schularchitektur durch Praxis, Technologie und kulturelle Integration

In diesem Themenblock werden konkrete Beispiele und technische Erkenntnisse von den Referierenden aus den Bereichen Architektur und Ingenieurwesen zu Schulbauplanung vorgestellt. In der Reihe werden innovative Schulprojekte aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet, von räumlichen Konzepten bis hin zur technischen Umsetzung. Zusammen bieten diese Vorträge einen umfassenden Blick auf die zeitgenössische Schularchitektur und betonen die Bedeutung von robustem Design, Suffizienz und technischer Innovation für die Schaffung nachhaltiger Bildungsräume.

Referierende: Jeannette Kuo (Karamuk Kuo Architects), Florian Nagler (Florian Nagler Architekten), Vera Hartmann (Sauerbruch Hutton), Elisabeth Endres (Ingenieurbüro IB Hausladen)

Themenblock III: ZUKUNFTSWEISENDE BILDUNGSRÄUME

Von kultureller Integration bis Climate Engineering

Dieser Themenblock untersucht innovative Ansätze in der Bildungsarchitektur, die kulturelle Sensibilität und technische Innovation in Einklang bringen. Diese Vorträge befassen sich mit der Frage, wie Bildungsräume den pädagogischen Anforderungen gerecht werden und gleichzeitig die kulturellen, sozialen und technischen Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung erfüllen können.

Referierende: Tobias Wulf (wulf architekten), Julian Weyer (C.F. Møller Architects), Almut Grüntuch-Ernst (Grüntuch Ernst Architekten), Thomas Auer (Transsolar, Klima Engineering)

7.4.3 Referierende

Neben der thematischen Gliederung in drei inhaltliche Blöcke mit entsprechenden Verlinkungen zu den Referierenden umfasst die Dokumentation zudem die strukturierte Darstellung über alle Referierenden des Symposiums. Alle Vorträge werden dokumentiert und auf der Website zur Verfügung gestellt. Die einzelnen Vorträge und Präsentationen wurden von einer Content-Agentur während des Symposiums live gefilmt und anschließend in einem Postproduktionsprozess professionell medial aufbereitet.



Abbildung 109: Website - Dokumentation der Referierenden (TUM) [20]

Sowohl über die Themenblöcke mit Auflistung der Vorträge als auch über die Aufstellung der einzelnen Referierenden wurde eine Weiterleitung zu den jeweiligen Vorträgen angelegt. Auf der dortigen Zielseite sind die aufbereiteten filmischen Mitschnitte eingebettet, ergänzt durch den Vortragstitel, ein Zitat aus dem Vortrag sowie eine kurze inhaltliche Beschreibung zur Einleitung.

Der Aufbau ist in Abbildung 110 beispielhaft anhand des Beitrags von Architekt Stefan Behnisch dargestellt. Auf der dazugehörigen Folgeseite (jeweils erreichbar über die Navigationspfeile rechts/links) befinden sich zudem weiterführende Informationen zur Person des Referierenden.



Abbildung 110 Website – Filmische Dokumentation Symposium (TUM) [20]

Hinweis: Das zugeschnittene Filmmaterial wurde dabei jeweils mit den dazugehörigen Präsentationsfolien ergänzt und vereint. Sensible Inhalte sowie datenschutzrelevante Passagen wurden in Abstimmung mit den Referierenden entfernt oder ausgeblendet.

7.4.4 Einblicke (Auszüge aus den Vorträgen)

Unter dem Navigationspunkt „Einblicke“ werden ausgewählte Ausschnitte aus den Vorträgen präsentiert, die zentrale Aussagen und thematische Schwerpunkte der Referierenden zusammenfassen. Die Auszüge sind jeweils mit einem Zitat, einer kurzen inhaltlichen Beschreibung sowie der Zuordnung zum jeweiligen Vortrag versehen. Sie bieten eine prägnante inhaltliche Übersicht und dienen zugleich als thematischer Einstieg in die vollständige filmische Dokumentation der Beiträge.

Die Einblicke wurden im Anschluss an das Symposium ebenfalls für die digitale Ergebnisverbreitung genutzt. Auf Grundlage eines strukturierten Redaktionsplans erfolgte über

einen Zeitraum von zwölf Wochen die Veröffentlichung wöchentlicher Beiträge auf LinkedIn, die jeweils einen Einblick hervorhoben und mit der Website verlinkten. Die Posts umfassten ein Zitat, eine Kurzbeschreibung sowie einen Direktlink zur entsprechenden Dokumentation. Durch das Teilen der Beiträge einzelner Referierende konnte die Reichweite zusätzlich gesteigert werden. Die redaktionelle Aufbereitung der Vorträge erfolgte hierbei unter Verwendung von bestimmten Keywords, sodass die Inhalte der Referierenden unter anderem auch von Suchmaschinen leichter gefunden werden können. Die fortlaufende Veröffentlichung der Einblicke trug zur Sichtbarkeit der Inhalte und zur weiteren Etablierung der Website als Dokumentationsplattform bei.

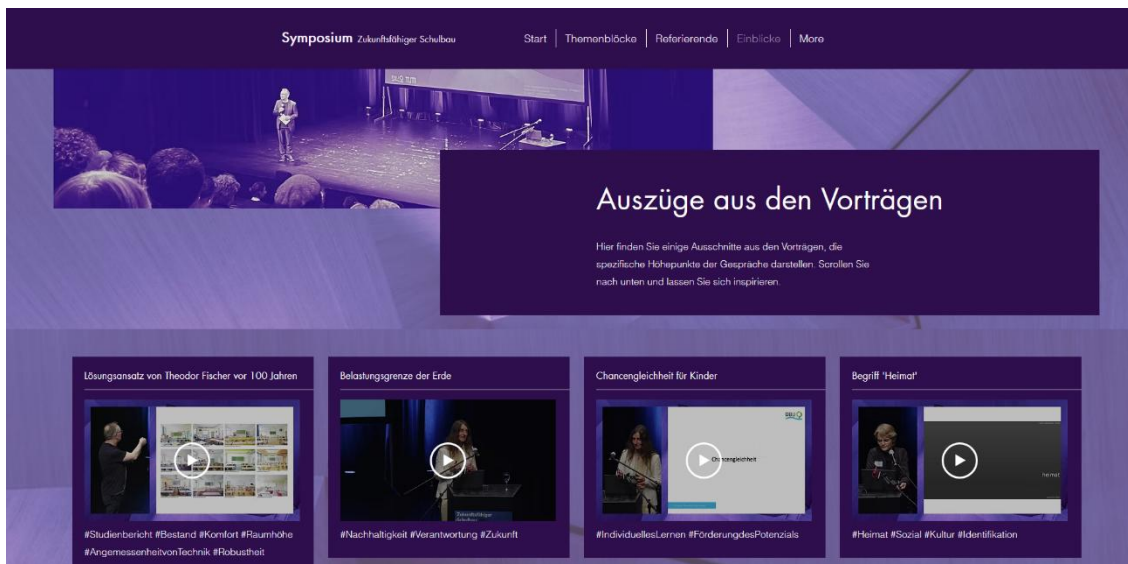


Abbildung 111: Website - Einblicke; Auszüge aus den Vorträgen (TUM) [20]

7.4.5 Weitere Informationen

Im Bereich „More“ werden zusätzlich Inhalte und Hintergrundinformationen zum abgeschlossenen Symposium „Zukunftsfähiger Schulbau“ dokumentiert. Neben allgemeinen Rahmeninformationen zum Symposium, der Agenda und Kontaktinformationen werden die am zweiten Symposiums-Tag abgehaltene Exkursion zur „Waldorfschule Uhlandshöhe“ dokumentiert und bebildert.

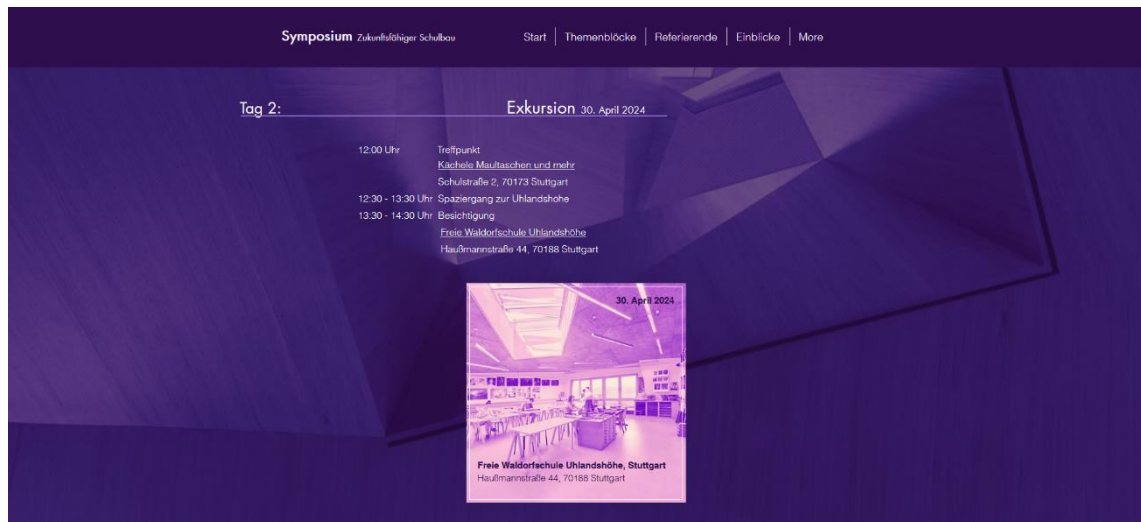


Abbildung 112: Website - Exkursion, weitere Informationen zum Symposium (TUM) [20]

7.4.6 Statistiken

Im Folgenden werden Statistikberichte der Website dokumentiert.

Hinweis: Die nachfolgenden Werte zeigen ausschließlich die Statistiken der Website des Symposiums. Wurden die dort verlinkten Videos oder Beiträge über andere Plattformen (z.B. YouTube, LinkedIn) gesehen oder angeklickt, sind diese Werte nicht über die Statistikberichte der Website ersichtlich.

Traffic nach Standort

Die nachfolgende Karte (Abbildung 113) veranschaulicht die Seitenaufrufe nach Standorten im Zeitraum Februar 2024 bis September 2025. Die meisten Seitenaufrufe erfolgten erwartungsgemäß in Deutschland, gefolgt von der Schweiz und Österreich. Zudem ist aus den Daten ersichtlich, dass die Website auch international an vielen Standorten aufgerufen wurde. Insgesamt wurde die Internetseite bisher über 8000 Mal im Zeitraum von Februar 2024 bis September 2025 aufgerufen.

Realisierung eines Nearly Zero Energy Standards für die freie Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart



Abbildung 113: Statistikbericht Stadtkarte - Traffic nach Standort im Zeitraum Februar 2024 bis September 2025 (wix.com); Maps Data: Google, Kartendaten ©2025 [21]

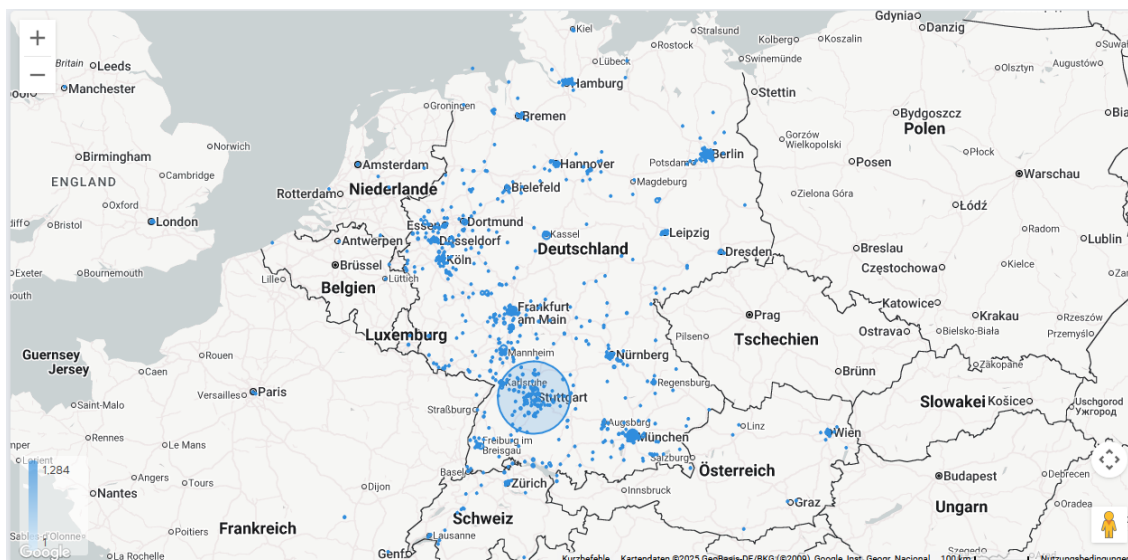


Abbildung 114: Statistikbericht Stadtkarte (Detailansicht Deutschland) - Traffic nach Standort im Zeitraum Februar 2024 bis September 2025 (wix.com); Maps Data: Google, Kartendaten ©2025 [21]

Traffic im Zeitverlauf

Das Diagramm in Abbildung 115 veranschaulicht die Seitenaufrufe im zeitlichen Verlauf im Zeitraum Februar 2024 bis Dezember 2024. Ein deutliches Besuchermaximum ist rund um den Veranstaltungstermin (29. und 30. April 2024) erkennbar.

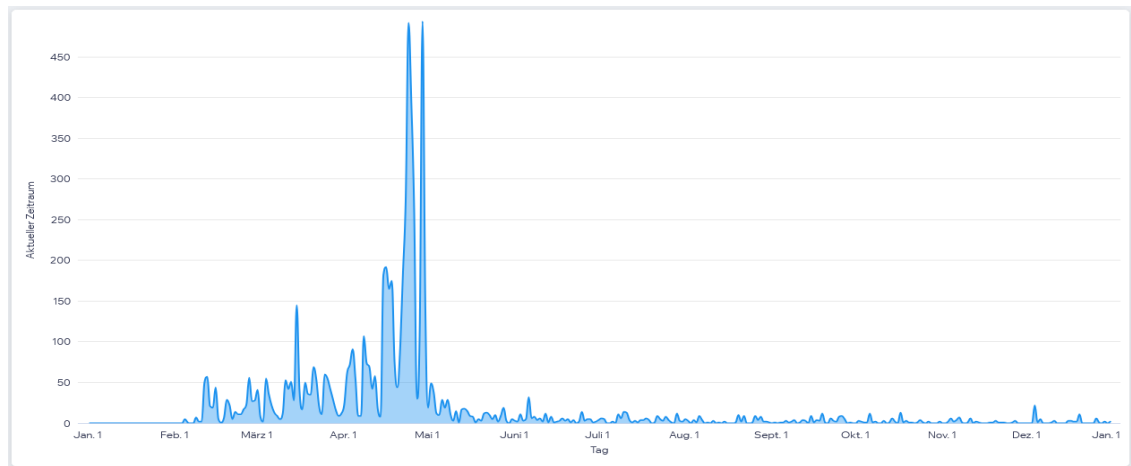


Abbildung 115: Statistikbericht Seitenaufrufe - Traffic nach zeitlichem Verlauf im Zeitraum Februar bis Dezember 2024 (wix.com) [21]

Ein detaillierter Blick auf den Zeitraum der Bewerbungsphase von Februar bis April 2024 veranschaulicht die Wirkung der Kommunikationsmaßnahmen im Vorfeld der Veranstaltung (Abbildung 116). Dabei sind wöchentliche Schwankungen sichtbar, die in Zusammenhang mit der Veröffentlichung einzelner Beiträge über soziale Medien, Fachportale sowie gedruckte und digitale Einladungen stehen. Der Ablauf der Bewerbung vor dem Symposium über Videobotschaften und soziale Medien kann dem Redaktionsplan Bewerbung im Abschnitt 7.3 entnommen werden. Die zwei Wochen vor dem Symposium verzeichnen eine deutlich erhöhte Zugriffszahl mit einem signifikanten Anstieg unmittelbar vor dem Veranstaltungstermin.

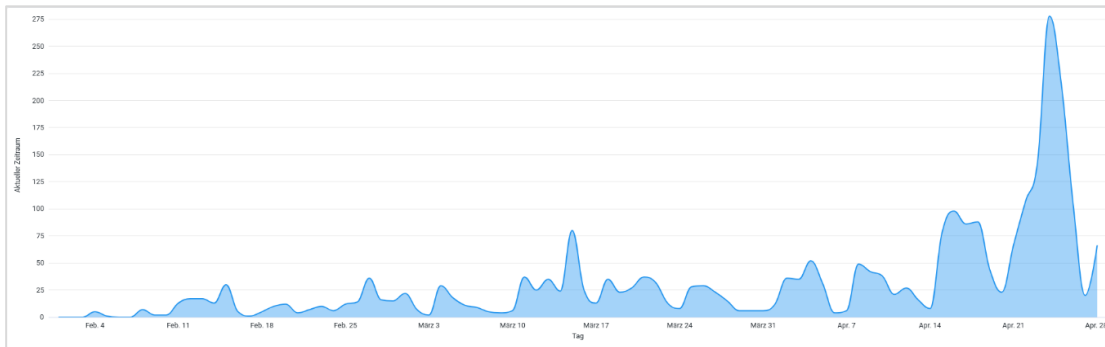


Abbildung 116 Statistikbericht Seitenaufrufe - Traffic nach zeitlichem Verlauf im Zeitraum Februar bis April 2024 (wix.com) [21]

Im Zeitraum von Januar bis April 2025 stieg die Anzahl der Seitenaufrufe pro Tag erneut an (Abbildung 117). Diese Entwicklung korreliert mit der Veröffentlichung kuratierter Videoausschnitte aus den Vorträgen, die unter dem Menüpunkt „Einblicke“ auf der Website eingebunden und über LinkedIn sukzessive verbreitet wurden, um auf die Dokumentation der Vortragsreihe auf der Website aufmerksam zu machen.

Auch in den darauffolgenden Monaten blieb durchgängig ein kontinuierlicher, punktuell auch erhöhter Seitenaufruf der Website zu beobachten, was auf eine fortschreitende aktive Nutzung der Website als Dokumentationsplattform hinweist.

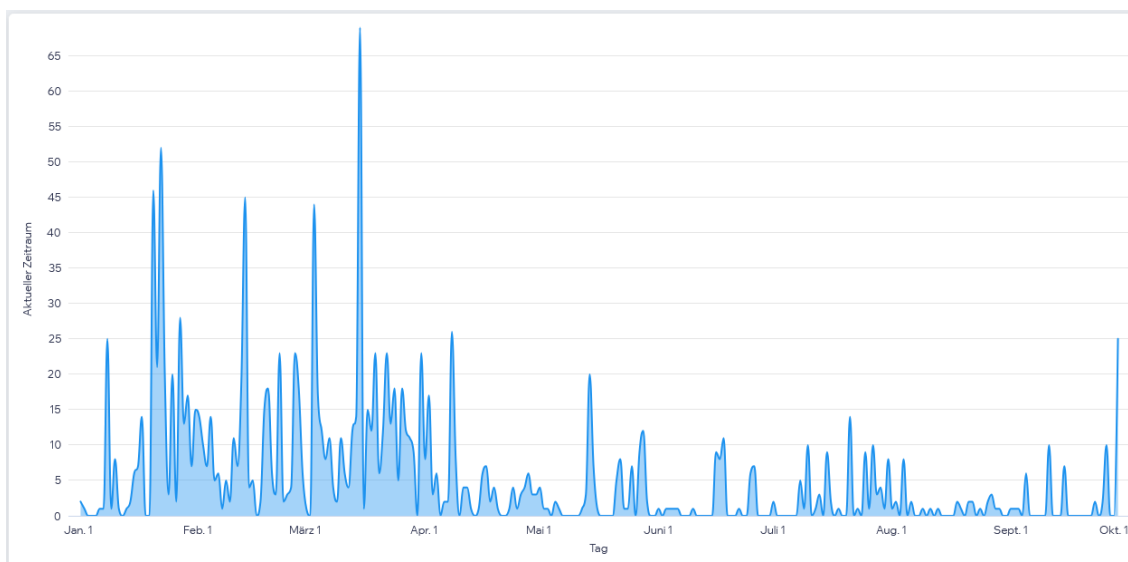


Abbildung 117: Statistikbericht Seitenaufrufe - Traffic nach zeitlichem Verlauf im Zeitraum Januar bis September 2025 (wix.com) [21]

Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Bereits im ersten Bericht in dem die Entwicklung von beispielhaften Neubaumaßnahmen auf Basis von Messungen und Analysen neugebauter Schulen untersucht wurde, konnten wichtige Rückschlüsse für die Planung des neuen Schulgebäudes für die Waldorfschule gezogen werden. Diese waren, neben anderen Parametern, für die Wahl hin zu einer mechanisch unterstützen, natürlichen Lüftung ausschlaggebend. Im neuen Gebäude der Waldorfschule kommt hierfür eine aktive Luftüberströmung aus dem Foyer sowie ein Ablüften über die Fassade zum Einsatz. Die Luft wird dabei im Foyer vorkonditioniert bevor sie in die Nutzungsbereiche der Klassenräume gelangt und so den Komfort im Vergleich zu einem klassischen Ansatz optimiert. Nach etwa sechs Jahren der Planung und Errichtung wird der Oberstufenneubau der freien Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart Anfang April 2022 von Schülerinnen und Schülern bezogen. Mit Unterstützung der DBU war es möglich ein Schulgebäude mit einem passiven, robusten, sowie klimatisch angenehmen Raumklima näher zu untersuchen.

Für das vorgeschlagene Lüftungssystem wird in einem ersten Schritt ein Mockup entwickelt. Das Mockup zeigt, dass eine dezentrale Lüftung für Klassenzimmer eine effiziente, platzsparende und geräuscharme Lösung darstellt und die Schulräume ausreichend belüftet sowie im Sommer zusätzlich zur Kühlung der Räume beitragen kann. Das Lüftungskonzept wird realisiert.

Nach Fertigstellung des Gebäudes werden Untersuchungen zur Raumluft durchgeführt und hierbei speziell auf Emissionen (VOCs) und Schadstoffe eingegangen. Die Messungen erfolgen in drei Klassenräumen. Die Messergebnisse sind im Neubau als vorbildlich zu betrachten. Hinsichtlich der Raumakustik wird gezeigt, dass für die untersuchten Klassenzimmer die Nachhallzeiten insgesamt innerhalb des empfohlenen Normbereichs liegen.

Bezüglich der Lebenszykluskosten über 50 Jahre weist der Barwert im Vergleich zu Gebäuden ähnlicher Nutzungsart einen niedrigen Wert auf. Angesichts des untersuchten Treibhausgaspotenzials ist der Neubau der Waldorfschule Uhlandshöhe mit anderen Schulneubauten, welche eine Förderung zu QNG (Qualitätssiegel Nachhaltige Gebäude) erhalten vergleichbar.

Die ökobilanzielle Betrachtung zeigt aber auch, dass das Ziel eines Nearly Zero Energy Gebäudes deutlich verfehlt wird. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass sich in der ökobilanziellen Betrachtung die Energieverbräuche auf den Energieausweis beziehen. Da dieser nach dem Berechnungsverfahren der DIN 18599 erfolgt, ist zu erwarten, dass der tatsächliche Energieverbrauch erheblich geringer sein wird. Das zeigen auch die durchgeführten thermischen Simulationen, die im Ergebnis für den Neubau zu einem deutlich geringeren Energieverbrauch kommen. Zurückzuführen ist dies auf den hybriden, dezentralen und bedarfsgerechten Lüftungsansatz, welcher so nach DIN 18599 nicht abbildbar ist. Die Betriebsphase innerhalb des Projekts war nicht mehr ausreichend, um die Werte der Simulation nachzuweisen. Es zeigt sich jedoch, dass ein Optimierungsbedarf vorhanden ist und die Zielwerte der Simulation grundsätzlich erreichbar sind.

In der Gesamtheit des Forschungsprojekts werden wichtige Erkenntnisse zum erfolgreichen Einsatz eines Lüftungskonzepts mit geringem Technisierungsgrad in Kombination mit einer hohen Aufenthaltsqualität im Schulbau gewonnen. Die Ergebnisse zeigen auch, dass Potenziale zur Optimierung des Gebäudebetriebs vorhanden sind. Jene Potenziale gilt es durch einen engagierten Betrieb weiter auszuschöpfen.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Auer, P. Vohlidka, C. Frenzel, E. Ullmer, T. Bitossi, V. Hoang, P. Ribas, S. Behnisch und M. Jäger, „Entwicklung von beispielhaften Neubaumaßnahmen für die Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart auf Basis von Messungen und Analysen neugebauter Schulen,“ Verein für freies Schulwesen, Waldorfschulverein e.V., Stuttgart, 2017.
- [2] C. Frenzel und J. Merk, „Lüftungs- und Energiekonzept Waldorfschule Uhlandshöhe Bericht zur Entwurfsplanung,“ TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Stuttgart, 2017.
- [3] C. Frenzel, C. Stettner und S. Oberecker, „Bericht Lüftungsmockup Waldorfschule Uhlandshöhe,“ Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart, 2018.
- [4] K.-H. Weinisch, W. Bothe und R. Simon, „Prüfbericht Innenraumlufthqualität,“ Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene (IQUH), Weikersheim, 19.10.2021.
- [5] AcouCheck, „AcouCheck Software,“ [Online]. Available: <http://eclim.de/AcouCheck/indexE.htm>. [Zugriff am 02.08.2023].
- [6] KNB (Harald Kürschner NACHHALTIGES BAUEN SACHVERSTÄNDIGENBÜRO), „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus (Name: 3173 WDS UHLANDHÖHE NEUBAU, Projekt: Neubau Bildungsbau) Aufgestellt 29. September 2023, Harald Kürschner,“ Finning, 2023.
- [7] KNB (Harald Kürschner NACHHALTIGES BAUEN SACHVERSTÄNDIGENBÜRO), „Ökobilanz (Name: 3173 WDS UHLANDHÖHE NEUBAU, Projekt: Neubau Bildungsbau) Aufgestellt 29. September 2023, Harald Kürschner,“ Finning, 2023.

- [8] IC-Meter , „What is IC-Meter,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.ic-meter.com/what-is-ic-meter>. [Zugriff am 18.6.2022].
- [9] „Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO₂ monitoring,“ *Indoor and Built Environment*, Bd. 31, Nr. 4, p. 1107–1126, 2022.
- [10] Umweltbundesamt, „Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden. Teil 1: Bildungseinrichtungen,“ Umweltbundesamt., Dessau-Roßlau, Germany, 2017.
- [11] B. ARCHITEKTEN, „Oberstufenneubau und Verwaltungsneubau Freie Waldorfschule Uhlandshöhe, Aussenraumkonzept Innenraum-/Materialkonzept,“ Behnisch Architekten, Stuttgart, 04.06.2018.
- [12] P. M. Bluyssen, *The Healthy Indoor Environment: How to Assess Occupants' Wellbeing in Buildings*, Routledge, 2014.
- [13] C. M. D. Da Parente, „Compared Analysis of the School Day in European Union Countries,“ *Cad. Pesqui*, Bd. 50, Nr. 175, pp. 78-94, 2020.
- [14] V. P. d. F. J. M. D. Ricardo M.S.F. Almeida, *School buildings rehabilitation : indoor environmental quality and enclosure optimization*, : Springer Cham, 2015.
- [15] S. Höfner und A. Schütze, „Air Quality Measurements and Education: Improving Environmental Awareness of High School Students.,“ *Front. Sens.* , Bd. 2, Nr. Article 657920, 2021.
- [16] Health Council of the Netherlands, „Indoor air quality in primary schools. And the value of carbon dioxide as an indicator of air quality,“ The Hague, Netherlands, 2010.
- [17] C. Vornanen-Winqvist, H. Salonen, K. Järvi, M. A. Andersson, R. Mikkola und T. e. a. Marik, „Effects of Ventilation Improvement on Measured and Perceived Indoor Air Quality in a School Building with a Hybrid Ventilation System,“ *International journal of environmental research and public health*, Bd. 15, Nr. 7, 2018.

- [18] S. Steiger und R. T. Hellwig, Hybride Lüftungssysteme für Schulen. Abschlussbericht zum Förderkennzeichen, Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP-Bericht, RKB 009/2010/291-K), 2011.
- [19] S. Djahanschah, T. Auer und F. Nagler, Zukunftsfähiger Schulbau. 12 Schulen im Vergleich, München: Detail (Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Bauband, 2), 2017.
- [20] Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, „Zukunftsfähiger Schulbau - Dokumentation des abgeschlossenen Symposiums,“ 01 Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.symposium-schulbau.com/>. [Zugriff am 02 10 2025].
- [21] Wix.com Ltd., „Zukunftsfähiger Schulbau - Dokumentation des abgeschlossenen Symposiums (Statistiken),“ 02 10 2025. [Online]. Available: <https://www.symposium-schulbau.com/>. [Zugriff am 02 10 2025].
- [22] A. Krastev, „LinkedIn,“ 05 Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/linkedin-turned-20-over-930-million-users-worldwide-here-krastev->. [Zugriff am 29 September 2025].
- [23] TUM Chair of Building Technology and Climate Responsive Design, „LinkedIn,“ 05 Februar 2025. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/company/tum-klima/>. [Zugriff am 02 10 2025].

Anhang Abschlussbericht

Anhang A1 - Belegung Klassenräume Waldorfschule Uhlandshöhe

Stundenplan Klassenzimmer 1.11 (Quelle: Waldorfschule Uhlandshöhe)

Stundenplan generiert:14.03.2022

aSc Stundenpläne

9a

Waldorfschule Uhlandshöhe, Haußmannstr. 44, Stuttgart

	Mo	Di	Mi	Do	Fr
HU 1 8:00 - 9:00	HU	HU	HU	HU	HU
HU 2 9:00 - 9:45					
1 10:05 - 10:50	RU Pl 9a	EN Ky 9a	TT Km 9a		DT Nö 9a
2 10:55 - 11:40	EN Ky 9a	RU Pl 9a	RU Pl 9a		
3 11:55 - 12:40	DT Nö 9a		EN Ky 9a	MA Kü 9a	EN Bn 9b
4 12:45 - 13:30	RU Pl 9a	FR St 10b	RU Pl 9a	EN Ky 9a	EN Bn 9b

Stundenplan Klassenzimmer 3.01 (Quelle: Waldorfschule Uhlandshöhe)

Stundenplan generiert:14.03.2022

aSc Stundenpläne

11a

Waldorfschule Uhlandshöhe, Haußmannstr. 44, Stuttgart

	Mo	Di	Mi	Do	Fr
HU 1 8:00 - 9:00	HU	HU	HU	HU	HU
HU 2 9:00 - 9:45					
1 10:05 - 10:50	EN Bt 11b	EN Bt 11a	EN Lu 11a		DT Os 11b
2 10:55 - 11:40	EN Bt 11b	RU Ek 11a	RU Ek 11a	FR Bs 12h	RL We 12h
3 11:55 - 12:40	EN Bt 11a	RU Ek 11a	RU Ge 12a	RU Ek 11a	TT Cr / Ru 11a
4 12:45 - 13:30	RU Ek 11a	MA Sg 11a	FR St 11b	RU Ek 11a	MA Sg 11a

Erläuterungen zu den Stundenplänen (Quelle: Waldorfschule Uhlandshöhe)

36 Schülerinnen und Schüler (ganze Klassen):

- HU - Hauptunterricht
- TT - Tutorienstunde

18 Schülerinnen und Schüler (halbe Klassen):

- EN - Englisch
- FR - Französisch
- RU - Russisch
- DT - Deutsch
- MA - Mathematik

Ausnahme: Klasse 11a freitags in der vierten Stunde (MA) mit 36 Schülerinnen und Schülern (ganze Klasse)

Anhang Pläne

Die Grundrisse in diesem Abschnitt ist dem Bericht zum Oberstufenneubau und Verwaltungsneubau Freie Waldorfschule Uhlandshöhe entnommen [11].

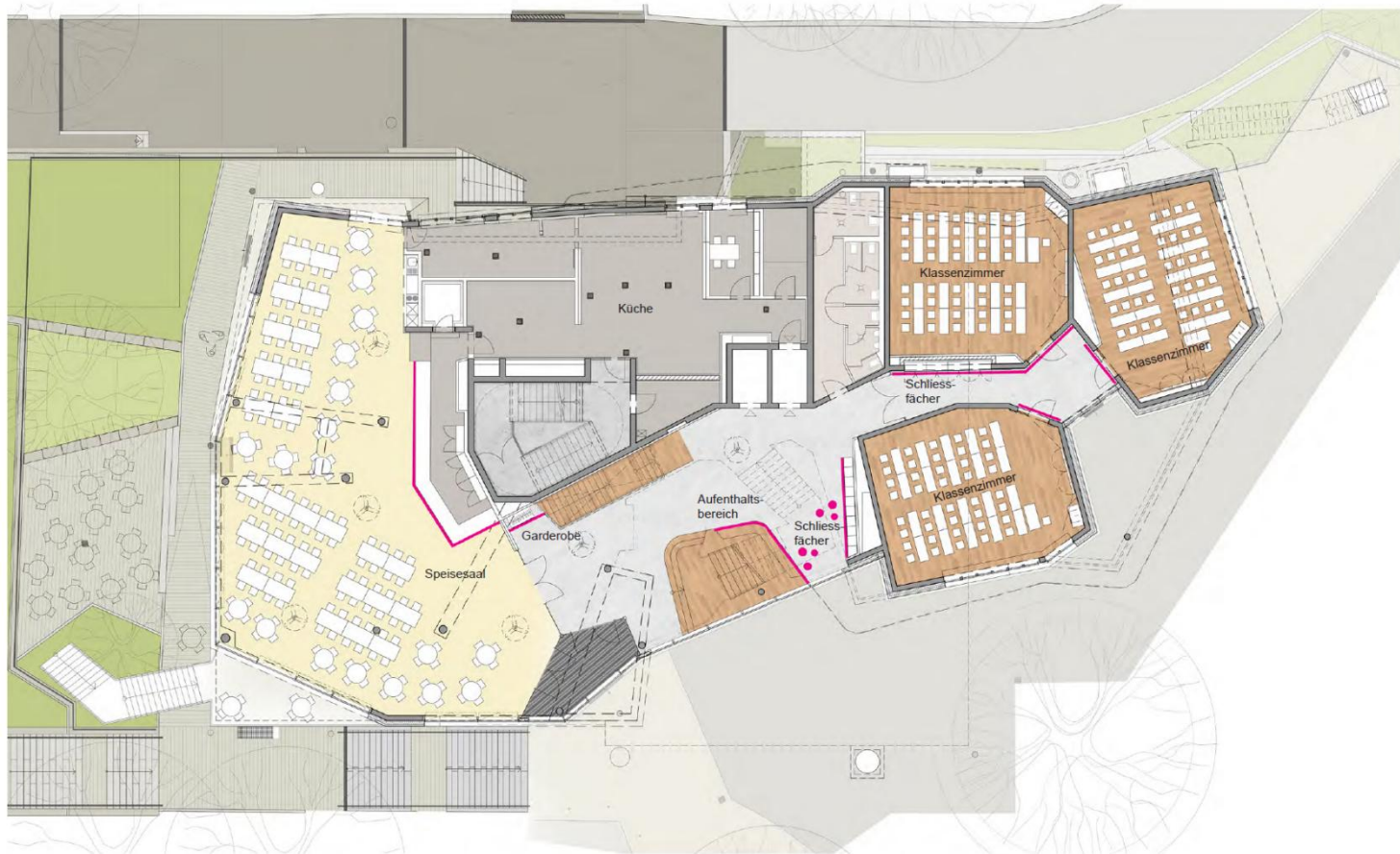
Anhang P1 - Grundrisse

BEHNISCH Architekten

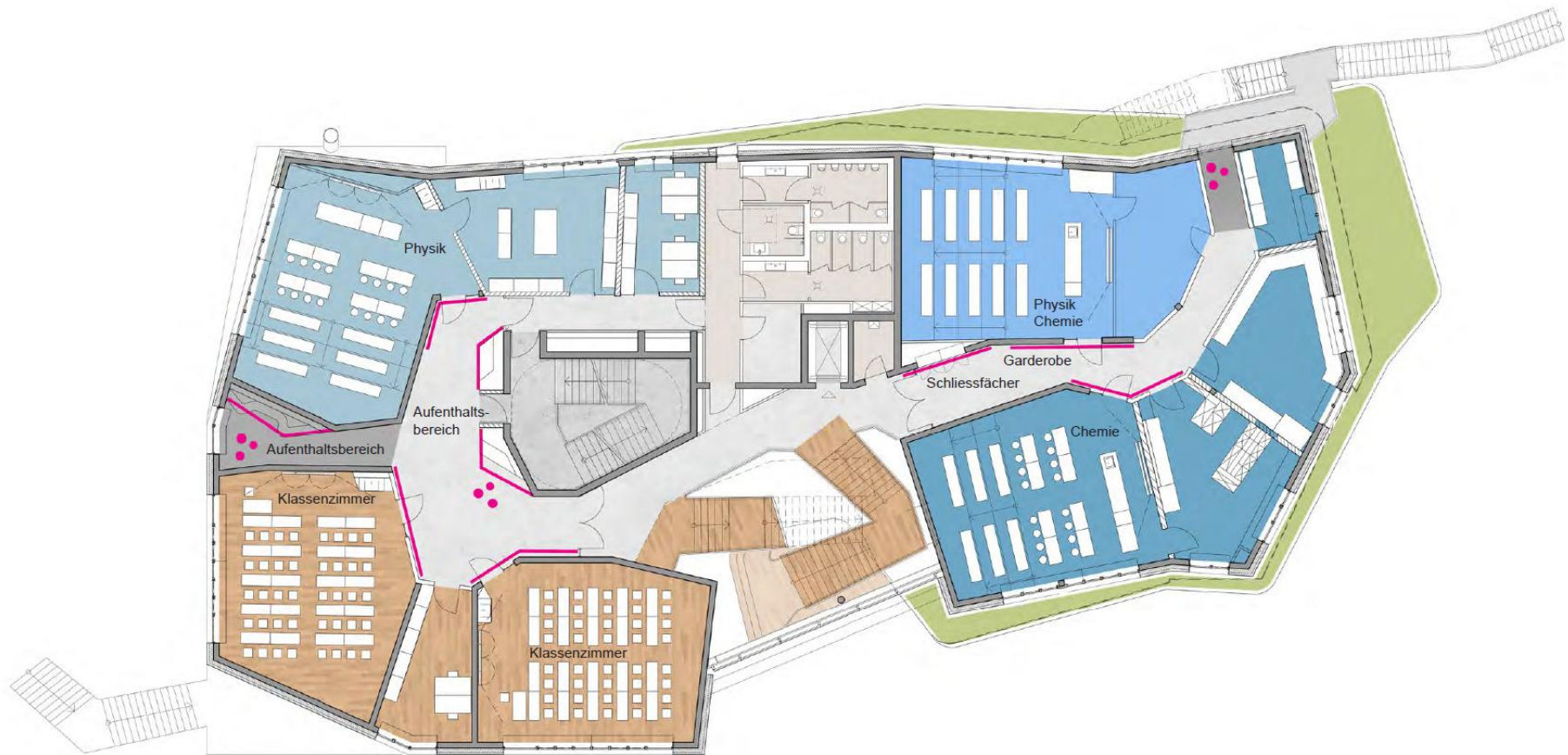
Grundriss Hofgeschoss - Innenraumkonzept

Grundriss Ebene +1 - Innenraumkonzept

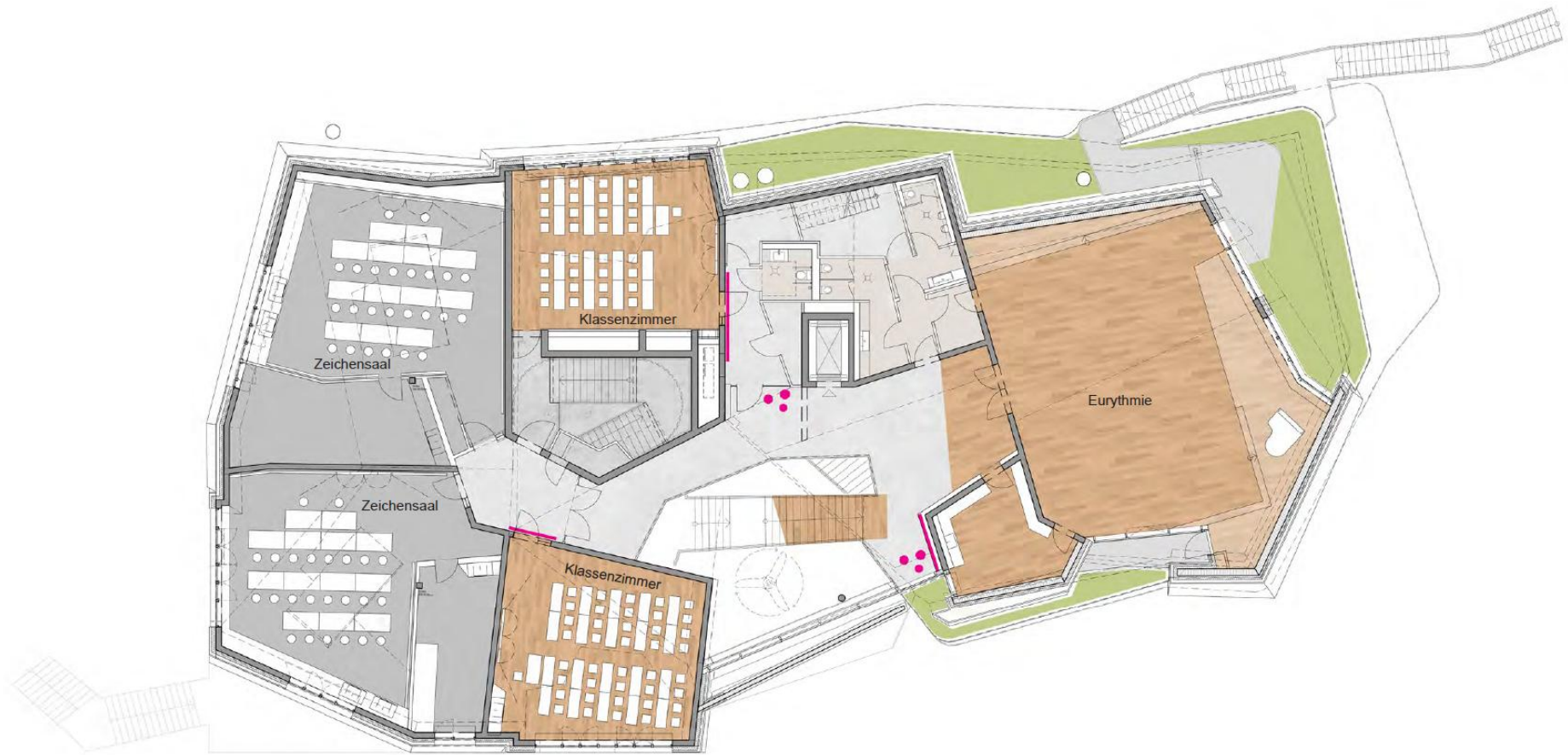
Grundriss Ebene +2 - Innenraumkonzept



Grundriss Hofgeschoss - Innenraumkonzept [11]



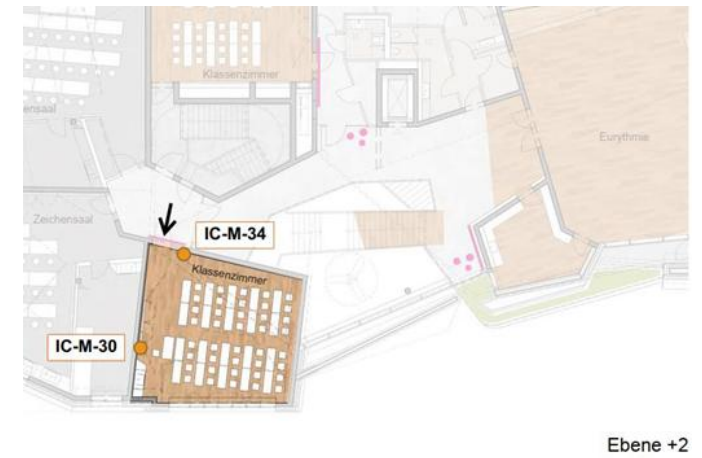
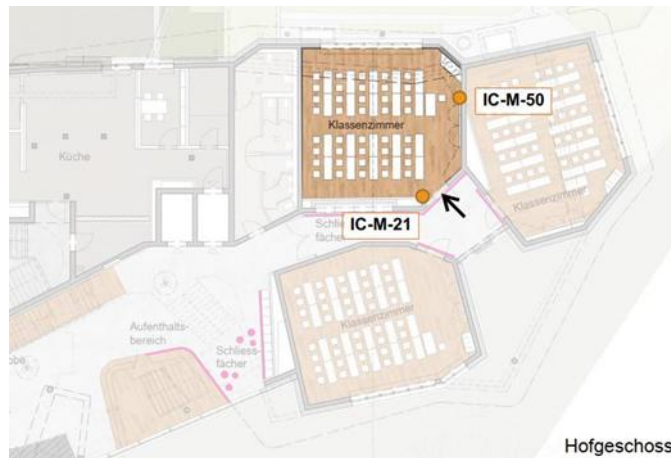
Grundriss Ebene +1 - Innenraumkonzept [11]



Grundriss Ebene +2 - Innenraumkonzept [11]

Anhang P2 - Messdatenerfassung

Oberstufenneubau Waldorfschule Uhlandshöhe - Messdatenerfassung für das DBU-Forschungsprojekt



Raum 1.11: Klassenzimmer Hofgeschoss (links), Raum 2.12: Physik/Chemie 1.OG (Mitte), Raum 3.01: Klassenzimmer 2.OG (rechts);
Pläne basierend auf Bildern von Behnisch Architekten [11]

Realisierung eines Nearly Zero Energy Standards für die freie Waldorfschule Uhlandshöhe in Stuttgart

Anhang zum Bericht Lüftungsmockup

Dieser Abschnitt ist dem Anhang zum Bericht Lüftungsmockup Waldorfschule Uhlandshöhe entnommen [3].

Anhang B1 - Bericht Akustikmessung

Bericht Akustikmessung [3]

Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH	BBi
Bürogebäude Curiestraße 2, Stuttgart-Vaihingen Bauakustische Prüfungen nach DIN EN ISO 16283-1	13. September 2018 Unser Zeichen: 18102-P Verfasser:
Auftraggeber: TRANSSOLAR Energietechnik GmbH Curiestraße 2 70563 Stuttgart	Fellbacher Straße 115 70736 Fellbach Tel. 0711/51 85 73-0 Fax 0711/51 85 73-11 e-mail: info@bbi-ig.de HRB 26 38 38 Amtsgericht Stuttgart Geschäftsführer: Dipl.-Ing. (FH) Ralf Berwein Zertifiziertes QM-System DIN EN ISO 9001:2000 durch TÜV Technische Überwachungs- organisation GmbH Böblingen
	VN 117562

Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]

		Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH	BBI
Inhaltsverzeichnis			Seite 2 von 7 18102-P 13.09.18
		Seite	
1.	Allgemeines / Aufgabenstellung	3	
2.	Messung	4	
2.1.	Messtermin	4	
2.2.	Messgeräte	4	
3.	Messmethode - Luftschall	5	
4.	Messergebnisse	6	
5.	Zusammenfassung Messergebnisse	6	
	Schlussblatt	7	

DN MS226613.DOC
VN 117562

Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]

Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH

BBI

Seite 3 von 7
18102-P
13.09.18

1. Allgemeines / Aufgabenstellung

Im Bürogebäude in der Curiestraße 2 in Stuttgart-Vaihingen soll die Luftschalldämmung eines Trennbauteils zwischen Büro und Flur – ohne und mit eingebauter Überdrucklüftungsanlage - gemessen werden.

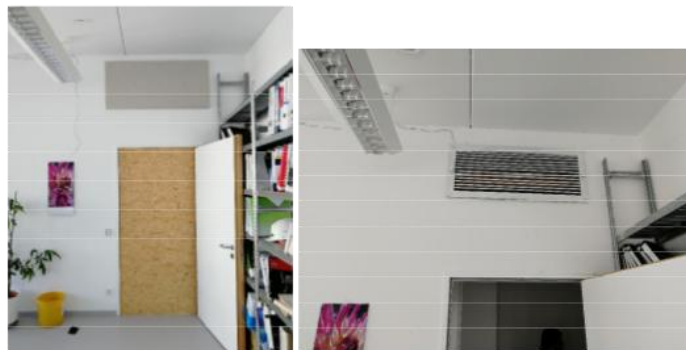


Bild links: schalldicht verschlossene Türöffnung und beidseitig abgedichteter Lüftungskanal oberhalb der Tür.

Bild rechts: mit eingebauter Lüftungsanlage oberhalb der Tür.

Am 05.09.2018 und 06.09.2018 wurde mit bauakustischen Prüfungen nach DIN EN ISO 16283-1 die vorhandene Luftschalldämmung des Trennbauteils festgestellt.

Um den Einfluss der im Trennbauteil eingebauten Tür zu minimieren, wurde diese mit einer speziell angefertigten Konstruktion schalldicht verschlossen.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen – ohne und mit eingebauter Lüftungsanlage – dokumentiert und miteinander verglichen.

DN MS226613.DOC
VN 117562

Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]

		Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH	BBI
		Seite 4 von 7 18102-P 13.09.18	
2.	Messung		
2.1.	Messtermin		
	Datum der Messung 1:	05.09.2018, in der Zeit zwischen 10.30 Uhr und 11.30 Uhr	
	Datum der Messung 2:	06.09.2018, in der Zeit zwischen 13.45 Uhr und 14.30Uhr	
	Anwesende Messingenieure:	Herr Fritz (BBI) Herr Günay (BBI)	
2.2.	Messgeräte		
	Bei den Messungen wurden folgende Geräte verwendet:		
	Empfangsteil:	Schallpegelmesser Norsonic Typ 140 Serien-Nr. 1405616 geeicht bis 2019 1/2" Kondensatormikrofon Type: 1225 Serien-Nr. 168232 Vorverstärker Type: 1209 Serien-Nr. 15530 Kalibrator Typ: 1251 Serien-Nr. 33863	
	Sendeteil Luftschall:	Verstärker Nor 280, Fa. Norsonic Serien-Nr.: 2804228 Dodekaeder-Lautsprecher Nor 276, Fa. Norsonic Serien-Nr.: 2765850	
		DN MS226613.DOC VN 117562	

Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]

Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH

BBI

Seite 5 von 7
18102-P
13.09.18

3. Messmethode - Luftschall

Die Messungen wurden nach den Vorschriften der DIN EN ISO 16283-1 – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – durchgeführt.

Als Prüfschall wurde Rauschen in Terzbandbreite 100 - 3150 Hz benutzt, das sende- und empfangsseitig mit Terzfiltern gemessen wurde. Dabei werden zwei Lautsprecherpositionen und je Lautsprecherposition sende- u. empfangsraumseitig mindestens je 5 Mikrofonpositionen gemessen. Zunächst wird aus diesen Daten das Schalldämm-Maß R'_j je Lautsprecherposition getrennt ausgewertet und daraus anschließend das Bau-Schalldämm-Maß R' energetisch gemittelt.

Schalldämm-Maß je Lautsprecherpos. $R'_j = L_{1,j} - L_{2,j} + 10 \log \frac{S}{A} \text{ dB}$

Bau-Schalldämm-Maß: $R' = -10 \lg \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{-R'_j/10}$

Dabei bedeuten:

R'_j	Schalldämm-Maß des Prüfgegenstandes je Lautsprecherposition
R'	Bau-Schalldämm-Maß des Trennbauteils
L_1	mittlerer Schalldruckpegel im Senderaum
L_2	mittlerer Schalldruckpegel im Empfangsraum
S	Fläche des Prüfobjektes
T	gemessene Nachhallzeit im Empfangsraum
T_0	Bezugs-Nachhallzeit $T_0 = 0.5 \text{ sec}$
V	Volumen des Empfangsraumes

Die Einzahlangabe der Schalldämmung wird durch Vergleich der frequenzabhängigen Schalldämm-Maße mit der Bezugskurve nach DIN EN ISO 717-1 – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – bestimmt und mit dem bewerteten Bau-Schalldämm-Maß R'_w angegeben.

DN MS226613.DOC
VN 117562

Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]

Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH

BBI

Seite 6 von 7
18102-P
13.09.18

4. Messergebnisse

Nachfolgend sind die Messergebnisse für das bewertete Schalldämm-Maß R'_w vor dem Einbau der Lüftungsanlage und nach dem Einbau der Lüftungsanlage dargestellt. Der frequenzabhängige Verlauf des Schalldämm-Maßes ist in den Anlagen 1 - 2 dargestellt.

Messung-Nr. bzw. Prüfzeugnis/-Anlage	Messräume	Bauteil	Mess-ergebnis
1	Senderraum: Flur Empfangsraum: Büro	Luftschall Trennbauteil ohne Lüftungsanlage	$R'_w = 42 \text{ dB}$
2	Senderraum: Flur Empfangsraum: Büro	Luftschall Trennbauteil mit Lüftungsanlage	$R'_w = 39 \text{ dB}$

5. Zusammenfassung Messergebnisse

Das untersuchte Trennbauteil – ohne eingebaute Lüftungsanlage – weist ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R'_w = 42 \text{ dB}$ auf.

Nach dem Einbau der Lüftungsanlage in das Trennbauteil wurde ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R'_w = 39 \text{ dB}$ gemessen.

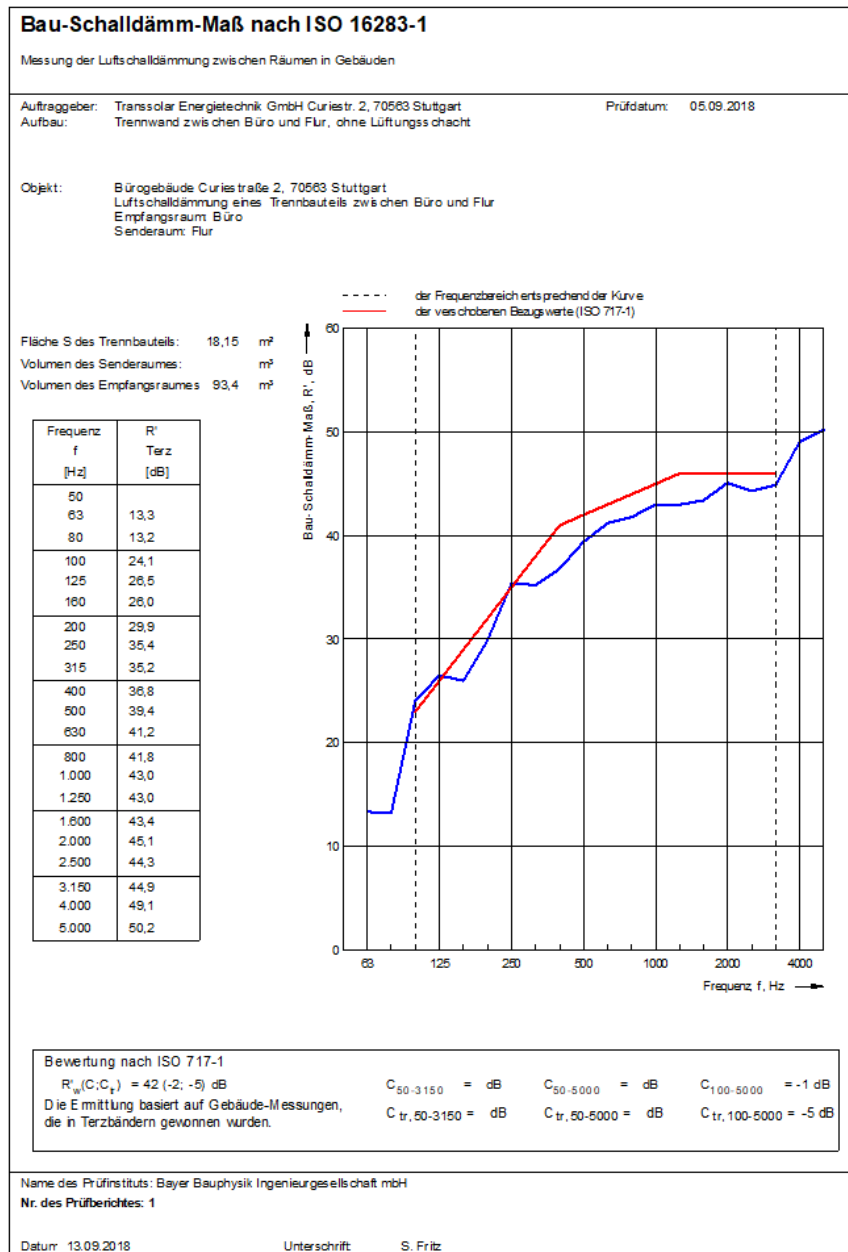
Somit kommt es durch den Einbau der Lüftungsanlage zu einer Minderung des Schalldämm-Maßes um 3 dB.

DN MS226613
VN 117562

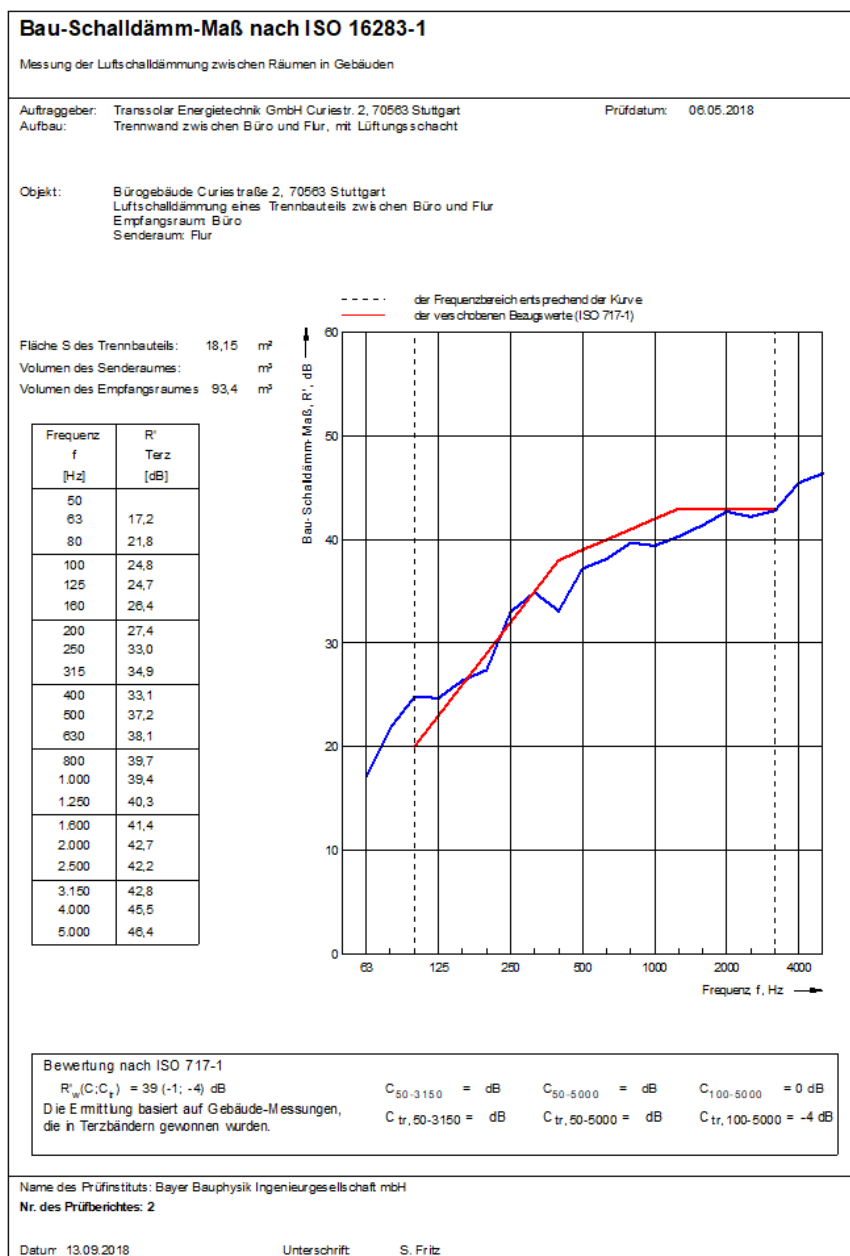
Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]

		Bayer Bauphysik Ingenieurgesellschaft mbH	BBI
Schlussblatt		Seite 7 von 7 18102-P 13.09.18	
Dieser Bericht umfasst:		7 Seiten Text 2 Anlagen	
BAYER BAUPHYSIK Ingenieurgesellschaft mbH			
Fellbach, den 13. September 2018			
		Bearbeiter:	
			
B.Sc. Stefan Fritz	Yilmaz Günay		
		DN MS226613.DOC VN 117562	

Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]



Fortsetzung Bericht Akustikmessung [3]



Anhang B2 - Strömungsgeschwindigkeitsmessergebnisse

Strömungsgeschwindigkeitsmessergebnisse [3]

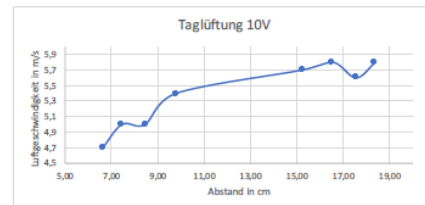
Bohrung unten

Temperatur= 24°C

Taglüftung, Einlass

10 V

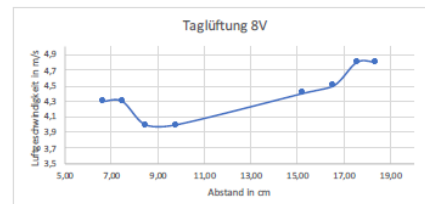
Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	4,7 m/s	0,23 m³/s	830,56 m³/h
2	7,45 cm	5 m/s	0,25 m³/s	883,57 m³/h
3	8,45 cm	5 m/s	0,25 m³/s	883,57 m³/h
4	9,79 cm	5,4 m/s	0,27 m³/s	954,26 m³/h
5	15,21 cm	5,7 m/s	0,28 m³/s	1007,27 m³/h
6	16,55 cm	5,8 m/s	0,28 m³/s	1024,94 m³/h
7	17,55 cm	5,6 m/s	0,27 m³/s	989,60 m³/h
8	18,38 cm	5,8 m/s	0,28 m³/s	1024,94 m³/h
Mittelwert		5,375 m/s	0,26 m³/s	949,84 m³/h



Taglüftung, Einlass

8 V

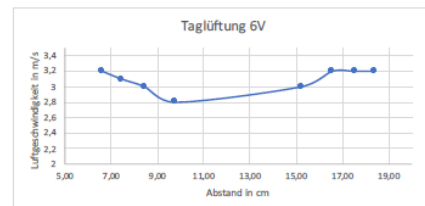
Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	4,3 m/s	0,21 m³/s	759,87 m³/h
2	7,45 cm	4,3 m/s	0,21 m³/s	759,87 m³/h
3	8,45 cm	4 m/s	0,20 m³/s	706,86 m³/h
4	9,79 cm	4 m/s	0,20 m³/s	706,86 m³/h
5	15,21 cm	4,4 m/s	0,22 m³/s	777,54 m³/h
6	16,55 cm	4,5 m/s	0,22 m³/s	795,22 m³/h
7	17,55 cm	4,8 m/s	0,24 m³/s	848,23 m³/h
8	18,38 cm	4,8 m/s	0,24 m³/s	848,23 m³/h
Mittelwert		4,3875 m/s	0,22 m³/s	775,34 m³/h



Taglüftung, Einlass

6 V

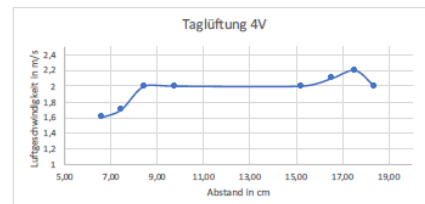
Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	3,2 m/s	0,16 m³/s	565,49 m³/h
2	7,45 cm	3,1 m/s	0,15 m³/s	547,82 m³/h
3	8,45 cm	3 m/s	0,15 m³/s	530,14 m³/h
4	9,79 cm	2,8 m/s	0,14 m³/s	494,80 m³/h
5	15,21 cm	3 m/s	0,15 m³/s	530,14 m³/h
6	16,55 cm	3,2 m/s	0,16 m³/s	565,49 m³/h
7	17,55 cm	3,2 m/s	0,16 m³/s	565,49 m³/h
8	18,38 cm	3,2 m/s	0,16 m³/s	565,49 m³/h
Mittelwert		3,0875 m/s	0,15 m³/s	545,61 m³/h



Taglüftung, Einlass

4 V

Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	1,6 m/s	0,08 m³/s	282,74 m³/h
2	7,45 cm	1,7 m/s	0,08 m³/s	300,41 m³/h
3	8,45 cm	2 m/s	0,10 m³/s	353,43 m³/h
4	9,79 cm	2 m/s	0,10 m³/s	353,43 m³/h
5	15,21 cm	2 m/s	0,10 m³/s	353,43 m³/h
6	16,55 cm	2,1 m/s	0,10 m³/s	371,10 m³/h
7	17,55 cm	2,2 m/s	0,11 m³/s	388,77 m³/h
8	18,38 cm	2 m/s	0,10 m³/s	353,43 m³/h
Mittelwert		1,95 m/s	0,10 m³/s	344,59 m³/h

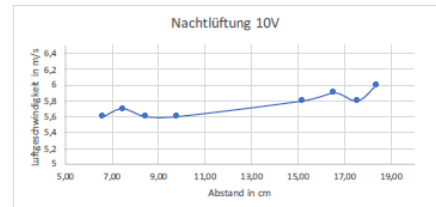


Fortsetzung Strömungsgeschwindigkeitsmessergebnisse [3]

Bohrung unten Temperatur= 24°C

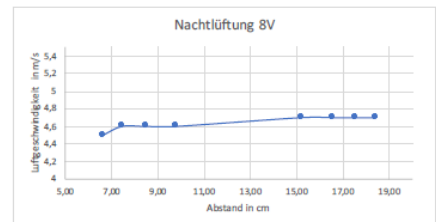
Nachtlüftung mit Lüftungsbox 10V

Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	5,6 m/s	0,27 m³/s	989,60 m³/h
2	7,45 cm	5,7 m/s	0,28 m³/s	1007,27 m³/h
3	8,45 cm	5,6 m/s	0,27 m³/s	989,60 m³/h
4	9,79 cm	5,6 m/s	0,27 m³/s	989,60 m³/h
5	15,21 cm	5,8 m/s	0,28 m³/s	1024,94 m³/h
6	16,55 cm	5,9 m/s	0,29 m³/s	1042,62 m³/h
7	17,55 cm	5,8 m/s	0,28 m³/s	1024,94 m³/h
8	18,38 cm	6 m/s	0,29 m³/s	1060,29 m³/h
Mittelwert		5,75 m/s	0,28 m³/s	1016,11 m³/h



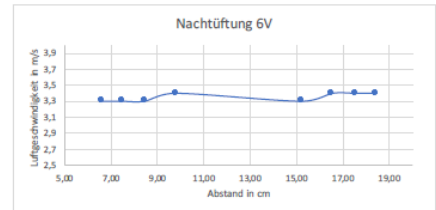
Nachtlüftung mit Lüftungsbox 8V

Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	4,5 m/s	0,22 m³/s	795,22 m³/h
2	7,45 cm	4,6 m/s	0,23 m³/s	812,89 m³/h
3	8,45 cm	4,6 m/s	0,23 m³/s	812,89 m³/h
4	9,79 cm	4,6 m/s	0,23 m³/s	812,89 m³/h
5	15,21 cm	4,7 m/s	0,23 m³/s	830,56 m³/h
6	16,55 cm	4,7 m/s	0,23 m³/s	830,56 m³/h
7	17,55 cm	4,7 m/s	0,23 m³/s	830,56 m³/h
8	18,38 cm	4,7 m/s	0,23 m³/s	830,56 m³/h
Mittelwert		4,64 m/s	0,23 m³/s	819,51 m³/h



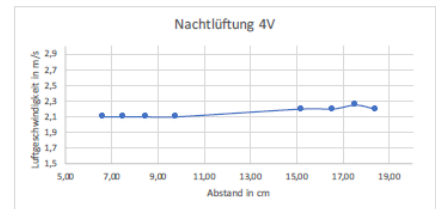
Nachtlüftung mit Lüftungsbox 6V

Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	3,3 m/s	0,16 m³/s	583,16 m³/h
2	7,45 cm	3,3 m/s	0,16 m³/s	583,16 m³/h
3	8,45 cm	3,3 m/s	0,16 m³/s	583,16 m³/h
4	9,79 cm	3,4 m/s	0,17 m³/s	600,83 m³/h
5	15,21 cm	3,3 m/s	0,16 m³/s	583,16 m³/h
6	16,55 cm	3,4 m/s	0,17 m³/s	600,83 m³/h
7	17,55 cm	3,4 m/s	0,17 m³/s	600,83 m³/h
8	18,38 cm	3,4 m/s	0,17 m³/s	600,83 m³/h
Mittelwert		3,35 m/s	0,16 m³/s	591,99 m³/h



Nachtlüftung mit Lüftungsbox 4V

Messpunkt	Höhe	Wert	Volumenstrom	
1	6,62 cm	2,1 m/s	0,10 m³/s	371,10 m³/h
2	7,45 cm	2,1 m/s	0,10 m³/s	371,10 m³/h
3	8,45 cm	2,1 m/s	0,10 m³/s	371,10 m³/h
4	9,79 cm	2,1 m/s	0,10 m³/s	371,10 m³/h
5	15,21 cm	2,2 m/s	0,11 m³/s	388,77 m³/h
6	16,55 cm	2,2 m/s	0,11 m³/s	388,77 m³/h
7	17,55 cm	2,25 m/s	0,11 m³/s	397,61 m³/h
8	18,38 cm	2,2 m/s	0,11 m³/s	388,77 m³/h
Mittelwert		2,16 m/s	0,11 m³/s	381,04 m³/h



Anhang B3 - Bedienungsanleitung

Bedienungsanleitung [3]

Bedienen der Lüftungsanlage/ Ventilation System Manual

Ist ein Ventilator auf der Stellung **AN**, schaltet er sich automatisch an, wenn die Fenster mit Fensterkontakt geöffnet/gekippt werden.

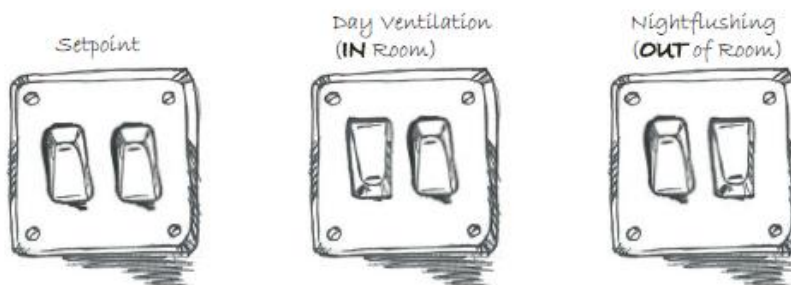
Mit dem Sollwertsteller kann die Stärke des Ventilators geregelt werden.

*If a Fanswitch is **ON**, it will automatically start when the windows with contacts are open/tipped. To regulate the intensity of the Fan, use the adjuster next to the switch.*



Um von Tag- auf Nachtlüftung umzuschalten, siehe Abbildungen unten.

To Switch from Day Ventilation to Nightflushing, see pictures below.



Der Rohrventilator ist nur eine Alternative für die Nachtlüftung und die Klappe hierfür muss manuell geöffnet werden.

The PipeFan is just another option for Nightflushing and the blonging flap must be open manually.

Rohrventilator nur anschalten, wenn seine zugehörige Klappe geöffnet ist!
Only turn on the PipeFan when his belonging Flap is open !

Anhang zum Prüfbericht Innenraumluftqualität

Dieser Abschnitt ist dem Anhang zum Prüfbericht Innenraumluftqualität entnommen [4].

Anhang C1 - Messprotokolle

Protokoll Raum 1.11 [4]

RaumLuftAnalytiX [®]		MESSTECHNIK	
		Ident.-Nr.: 290181_002A Datum: 24.09.2021	
		Messtechniker: Dipl.-Ing. (FH) Waldemar Bothe geruchsfrei ☒ unparfümiert ☒ Schutzkleidung ☒ Fotodokumentation ☒	
		Anlass Messauftrag: Raumluftmessung	
ADRESSDATEN			
Auftraggeber: König Holger - König-Jama Ute GbR			
Straße: Eschenriederstr. 65		Ort: 82194 Gröbenzell	
Objekt: Freie Waldorfschule Uhlandshöhe			
RAUMDATEN			
Straße: Haußmannstraße 44		Ort: Stuttgart	
Ort der Probenahme	Geschoss: EG	Raum: 1.11	
Lage der Probenahmestelle	in Höhe: ca. 1,50 m	Raummitte ☒	
Raumvolumen m³: ca. 295	Grundfläche m²: 75	Raumhöhe m: ca. 3,93	
Raumausstattung mit Möbel ☐ ohne Möbel ☒ Bauweise Putzputz ☐ mauerwerk ☒ leicht ☐ Holzelemente ☐ Mischform			
Gebäudedichtheit gut ☒ mittel ☐ ausreichend ☐			
Raumpflege nein ☐ ja ☒ wann was: Feinreinigung vor Querlüftung			
Ausbauarbeiten nein ☐ ja ☒ wann was: Neubau			
Beschattung nein ☐ ja ☒ von: bei Sonne automatisch Uhr bis: Uhr			
RLT-Anlage (Klima, Lüftung) nein ☐ ja ☒ Tag Einstellung an ☐ 100% seit: Uhr			
Geruch unmerklich ☒ mikrobiell ☐ chemisch ☐ faulig ☐			
Querlüftung nach DIN 18000 von: 21:11 Uhr bis: 21:27 Uhr			
Verschlusszeit von: 21:27 Uhr bis: 5:35 Uhr			
KLIMADATEN			
Lufttemperatur °C		Außen: 11,2	Innen: 22,1
Luftdruck hPa mbar (TENAX Gerät)		Außen: 986	Innen: 986
Luftfeuchte rH%		Außen: 80	Innen: 46,3
Windgeschwindigkeit m/s		Außen: gering	Innen: keine wahrnehmbar
Niederschlag: ☒		Bewölkung: keine	
© IQUH – Institut für Qualitätsmanagement und Umwelthygiene 97990 Walkersheim, Deutschordenstr. 4/3 07934-9121-0 info@iquh.de www.iquh.de			

Fortsetzung Protokoll Raum 1.11 [4]



MESSPROTOKOLL

DIN EN 16 000 ff
RL 8006 | BvBb
2

MESSZIEL | ANALYTIK

☒ NormCase (DIN EN ISO 16000 | DIN 4108)

☐ Nutzerbedingungen ☐ WorstCase

☐ TVOC (TENAX) ☐ Formaldehyd + Aldehyde (DNPH)

☐ Formaldehyd (DNPH) ☐ andere:

TENAX

PROBENAHMESYSTEM

Röhrchen-Nr.: 320243

Blindprobe: PBA

Röhrchen-Nr.: 308226

Probebezeichnung: P11

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Pumpe: INV 401111 mit Gas_Flow_Meter

Luftdrucksystem:

Anfang: 976 mbar **Ende:** 976 mbar

Flussrate:

Start: ca. l/min 0,1 **Ende:** ca. l/min 0,1

Zeitraum der Messung:

von: Uhr 5:35 **bis:** Uhr 5:55

Röhrchen-Nr.: 320158

Probebezeichnung: P11-2

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Pumpe: INV 401111 mit Gas_Flow_Meter

Luftdrucksystem:

Anfang: 976 mbar **Ende:** 976 mbar

Flussrate:

Start: ca. l/min 0,1 **Ende:** ca. l/min 0,1

Zeitraum der Messung:

von: Uhr 5:56 **bis:** Uhr 6:16

DNPH

PROBENAHMESYSTEM

Röhrchen-Nr.:

Probebezeichnung: P11-3

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Pumpe Nr.: 07 **Gesuhr:** 04

Zählerstand:

Anfang: 5736 **Ende:** 5791

Flussrate:

Start: ca. l/min 1,25 **Ende:** ca. l/min 1,25

Durchflußrate: l/min.

Luftmenge: l 55 **Dauer:** min. 44

Zeitraum der Messung:

von: Uhr 5:35 **bis:** Uhr 6:19

© IOUH - Institut für Qualitätsmanagement und Umweltdiagnostik | 97990 Weikersheim, Deutschlandstr. 4/3

07934-9121-01 info@iouh.de | www.iouh.de

TENAX 1

 Hauptprobe

TENAX 2

 Kontrolle / Reserve

Protokoll Raum 2.12 [4]

RaumLuftAnalytiX [®]		MESSTECHNIK	
		Ident.-Nr.: 290181_002A Datum: 24.09.2021	
		Messtechniker: Dipl.-Ing. (FH) Waldemar Bothe geruchsfrei ☒ ungeruchsfrei ☒ Schutzkleidung ☒ Fotodokumentation ☒	
		Anlass Messauftrag: Raumluftmessung	
ADRESSDATEN			
Auftraggeber: König Holger - König-Jama Ute GbR			
Straße: Eschenriederstr. 65		Ort: 82194 Gröbenzell	
Objekt: Freie Waldorfschule Uhlandshöhe		RAUMDATEN	
Straße: Haußmannstraße 44		Ort: Stuttgart	
Ort der Probenahme		Geschoss: 1. OG Raum: 2.12	
Lage der Probenahmestelle		in Höhe: ca. 11,50 m Raummitte ☒	
Raumvolumen m³: ca. 216		Grundfläche m²: 71,9 Raumhöhe m: ca. 3 m	
Raumausstattung mit Möbel ☒ ohne Möbel ☐ Bauweise Rohbau ☐ massiv ☒ leicht ☐ Holzständer ☐ Mischform ☐			
Gebäudedichtheit gut ☒ mittel ☐ ausreichend ☐			
Raumpflege nein ☐ ja ☒ wann was: Feinreinigung vor Querlüftung			
Ausbauarbeiten nein ☐ ja ☒ wann was: Neubau			
Beschattung nein ☐ ja ☒ von: automatisch bei Sonne bis: Uhr			
RLT-Anlage (Klima, Lüftung) nein ☐ ja ☒ an ☐ seit: Uhr			
Geruch unzufällig ☒ mikrobiell ☐ chemisch ☐ feucht ☐			
Querlüftung nach DIN 16000 von: 23:30 Uhr bis: 23:45 Uhr			
Verschlusszeit von: 23:45 Uhr bis: 07:35 Uhr			
KLIMADATEN			
Lufttemperatur °C		Aussen: 11,2 Innen: 23,5	
Luftdruck hPa mbar (TBAH Gerät)		Aussen: 986 Innen: 984	
Luftfeuchte rH%		Aussen: 85 Innen: 45,7	
Windgeschwindigkeit m/s		Aussen: gering Innen: —	
Niederschlag: kein		Bewölkung: keine	
© IQUH – Institut für Qualitätsmanagement und Umfelddiagnostik 87990 Weikersheim, Deutscherstr. 4/3 07934-9121-0 info@iquh.de www.iquh.de			

Fortsetzung Protokoll Raum 2.12 [4]



MESSPROTOKOLL

DIN EN 16 000 ff
RL 8006 | Rv8b

2

MESSZIEL | ANALYTIK

☒ NormCase (DIN EN ISO 16000 | DIN 4108)

☐ TVOC (TENAX) ☐ Formaldehyd + Aldehyde (DNPH) ☐ Formaldehyd (DNPH) ☐ andere:

☐ Nutzerbedingungen ☐ WorstCase

TENAX

PROBENAHMESYSTEM

Röhrchen-Nr.: 320191

Röhrchen-Nr.: 308292

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Luftdrucksystem: Anfang: 976 mbar Ende: 977 mbar

Flussrate: Start: ca. l/min 0,1 Ende: ca. l/min 0,1

Zeitraum der Messung: von: Uhr 07:36 bis: Uhr 07:56

Blindprobe PB12

Probebezeichnung: P12-1

Pumpe: INV 401111 mit Gas_Flow_Meter

TENAX 1

Röhrchen-Nr.: 308938

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Luftdrucksystem: Anfang: 978 mbar Ende: 980 mbar

Flussrate: Start: ca. l/min 0,1 Ende: ca. l/min 0,1

Zeitraum der Messung: von: Uhr 07:57 bis: Uhr 08:17

Probebezeichnung: P12-2

Pumpe: INV 401111 mit Gas_Flow_Meter

TENAX 2

DNPH

PROBENAHMESYSTEM

Röhrchen-Nr.:

Zählerstand: Anfang 5847 Ende 5902

Flussrate: Start: ca. l/min 1,3 Ende: ca. l/min 1,3

Durchflußrate: l/min, Luftmenge: l 55 Dauer: min. 42

Zeitraum der Messung: von: Uhr 07:35 bis: Uhr 08:17

Probebezeichnung: P12-3

Pumpe Nr.: 07 Gasuhr: 04

© IOUH – Institut für Qualitätsmanagement und Umweltdiagnostik | 97990 Weiskirchen, Deutschland | 4/3

07934-9121-01 info@iouh.de | www.iouh.de

Protokoll Raum 3.01 [4]

Raum Luft AnalytiX [®]		MESSTECHNIK	
		Ident.-Nr.: 290181_002A Datum: 24.09.2021	
		Messtechniker: Dipl.-Ing. (FH) Waldemar Bothe geruchsfrei ☒ unperfomiert ☒ Schutzkleidung ☒ Fotodokumentation ☒	
		Anlass Messauftrag: Raumluftmessung	
ADRESSDATEN			
Auftraggeber: König Holger - König-Jama Ute GbR			
Straße: Eschenriederstr. 65		Ort: 82194 Gröbenzell	
Objekt: Freie Waldorfschule Uhlandshöhe			
RAUMDATEN			
Straße: Haußmannstraße 44		Ort: Stuttgart	
Ort der Probenahme		Geschoss: 2. OG Raum: 3.01	
Lage der Probenahmestelle		in Höhe: ca. 1,50 m Raummitte: ☒	
Raumvolumen m³: ca. 256		Grundfläche m²: 71,6 Raumhöhe m: ca. 3,58	
Raumausstattung: mit Möbel ☐ ohne Möbel ☒ Bauweise: Fachbau ☐ massiv ☒ leicht ☐ Holzelemente ☐ Mischform			
Gebäudedichtheit: gut ☒ mittel ☐ ausreichend ☐			
Raumpflege: nein ☐ ja ☒ wann was: Feuchtreinigung am Vorabend			
Ausbauarbeiten: nein ☐ ja ☒ wann was: Neubau			
Beschattung: nein ☐ ja ☒ von: bei Sonneneinstrahlung Uhr: bis: Uhr:			
RLT-Anlage (Klima, Lüftung): nein ☒ ja ☐ an ☐ seit Uhr:			
Geruch: unauffällig ☒ mikrobiell ☐ chemisch ☐ feucht ☐			
Querlüftung nach DIN 16000: von: 07:30 Uhr bis: 07:40 Uhr			
Verschlußzeit: von: 07:40 Uhr bis: 08:28 Uhr (bis Ende Messung)			
KLIMADATEN			
Lufttemperatur °C:		Aussen: 12,3 Innen: 24,3	
Luftdruck hPa mbar (TENAX Gerät):		Aussen: 986 Innen: 986	
Luftfeuchte rH%:		Aussen: 82 Innen: 44,8	
Windgeschwindigkeit m/s:		Aussen: gering Innen: —	
Niederschlag: —		Bewölkung: —	
© IQUH – Institut für Qualitätsmanagement und Umfelthygiene 97090 Weikersheim, Deutschordenstr. 4/3 07954-9121-0 info@iquh.de www.iquh.de			

Fortsetzung Protokoll Raum 3.01 [4]

DIN EN 16 000 F
RL 0005 | DvBb

2

RaumLuftAnalytiX®
MESSPROTOKOLL

MESSZIEL | ANALYTIK

☐ NormCase (DIN EN ISO 16000 | DIN 4108)
☐ TVOC (TENAX)

☒ Nutzerbedingungen
☐ Formaldehyd + Aldehyde (DNPH)

☐ WorstCase
☐ Formaldehyd (DNPH)

☐ andere:

TENAX

PROBENAHMESYSTEM

Röhrchen-Nr.: 308245

Blindprobe: PB3N

Röhrchen-Nr.: 320207

Probebezeichnung: P3N1

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Pumpe: INV 401111 mit Gas_Flow_Meter

Luftdrucksystem:

Anfang: 975 mbar

Ende: 975 mbar

Flussrate

Start: ca. l/min 0,1

Ende: ca. l/min 0,1

Zeitraum der Messung

von: Uhr 08:29

bis: Uhr 08:47

Röhrchen-Nr.: 320262

Probebezeichnung: P3N2

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Pumpe: INV 401111 mit Gas_Flow_Meter

Luftdrucksystem:

Anfang: 975 mbar

Ende: 976 mbar

Flussrate

Start: ca. l/min 0,1

Ende: ca. l/min 0,1

Zeitraum der Messung

von: Uhr 08:50

bis: Uhr 09:10

DNPH

PROBENAHMESYSTEM

Röhrchen-Nr.:

Probebezeichnung: P3N3

Probenahmesystem: optisch OK ☒ dicht ☒

Pumpe Nr.: 07

Gasuhr: 04

Zählerstand

Anfang 5903

Ende 5958

Flussrate

Start: ca. l/min 1,3

Ende: ca. l/min 1,3

Durchflußrate: l/min.

Luftmenge: l 55

Dauer: min. 42

Zeitraum der Messung

von: Uhr 08:28

bis: Uhr 09:10

© IOUH – Institut für Qualitätsmanagement und Umwelthygiene | 97990 Weikersheim, Deutschlandstr. 4/3

07934-9121-0 | info@iauh.de | www.iauh.de

TENAX 1

Kontrolle

TENAX 2

Hauptprobe

Anhang C2 - Bilddokumentation

Bilddokumentation Raum 1.11 [4]

	Raum: 1.11														
 <table border="1"><thead><tr><th>Particle Size</th><th>Count</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.3um</td><td>10692</td></tr><tr><td>0.5um</td><td>3514</td></tr><tr><td>1.0um</td><td>826</td></tr><tr><td>2.5um</td><td>337</td></tr><tr><td>5.0um</td><td>67</td></tr><tr><td>10um</td><td>29</td></tr></tbody></table> AT 21.4°C RH 45.8% DP 9.9°C WB 15.4%	Particle Size	Count	0.3um	10692	0.5um	3514	1.0um	826	2.5um	337	5.0um	67	10um	29	Raum: 1.11 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 µm – 10692 1. Messpunkt
Particle Size	Count														
0.3um	10692														
0.5um	3514														
1.0um	826														
2.5um	337														
5.0um	67														
10um	29														

Bilddokumentation Raum 1.11 [4]

 A hand holds a yellow Trotec PC220 dust meter. The screen displays a list of dust particle counts for different sizes: 0.3um (10552), 0.5um (3495), 1.0um (938), 2.5um (241), 5.0um (44), and 10um (22). Environmental data at the bottom shows AT 21.4°C, RH 45.7%, DP 9.9%, and WB 15.4%.	Raum: 1.11 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 µm – 10552 2. Messpunkt
 The dust meter screen shows updated dust particle counts: 0.3um (9870), 0.5um (3600), 1.0um (734), 2.5um (271), 5.0um (54), and 10um (14). Environmental data shows AT 21.3°C, RH 45.8%, DP 9.8%, and WB 15.3%.	Raum: 1.11 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 µm – 9870 3. Messpunkt
 The dust meter screen shows the final dust particle counts: 0.3um (3871), 0.5um (1203), 1.0um (298), 2.5um (87), 5.0um (22), and 10um (13). Environmental data shows AT 21.4°C, RH 47.2%, DP 10.4%, and WB 15.6%.	Raum: 1.11 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 3871 1. Messpunkt

Bilddokumentation Raum 1.11 [4]

	Raum: 1.11 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 2573 2. Messpunkt
	Raum: 1.11 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 3233 3. Messpunkt
	Raum: 1.11 Raumluftmessung

Bilddokumentation Raum 1.11, Raum 2.12 [4]

 A digital climate measurement device (ThermalPro) is placed on a light-colored wooden surface. The device's display shows a large '534 ppm' at the top, with smaller readings for temperature (22.1) and relative humidity (46.3) below it. The device is connected to a power source by a black cable.	Raum: 1.11 Raumklimamessung Temp.: 22,1 Rel. Luftfeucht.: 46,3 %
 A digital climate measurement device (ThermalPro) is placed on a concrete base outdoors. The device's display shows a large '77' at the top, with smaller readings for temperature (11.2) and relative humidity (80) below it. The device is connected to a power source by a black cable.	Raum: 1.11 Aussenklimamessung Klimawerte (Mittelwerte) Temp.: 11,2 Rel. Luftfeucht.: 80 %
 A wooden door is shown, partially open, revealing a blue carpeted hallway. The door has two signs: a 'STOP' sign and a 'No Hand' sign. A small green sign is also visible on the right side of the door.	Raum: 2.12

Bilddokumentation Raum 2.12 [4]

	Raum: 2.12 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 μm – 6087 1. Messpunkt
	Raum: 2.12 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 μm – 6130 2. Messpunkt
	Raum: 2.12 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 μm – 7169 3. Messpunkt

Bilddokumentation Raum 2.12 [4]

	Raum: 2.12 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 3533 1. Messpunkt
	Raum: 2.12 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 3230 2. Messpunkt
	Raum: 2.12 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 3799 3. Messpunkt

Bilddokumentation Raum 2.12 [4]

	Raum: 2.12 Raumluftmessung
	Raum: 2.12 Raumklimamessung Temp.: 23,5 Rel. Luftfeucht.: 45,7 %
	Raum: 2.12 Aussenklimamessung Klimawerte (Mittelwerte) Temp.: 11,2 Rel. Luftfeucht.: 85 %

Bilddokumentation Raum 3.01 [4]

 A photograph of a wooden door to room 3.01. On the left, a sign reads 'ZUTRIFF VERBODEN' with a hand icon and 'MESSRAUMVORBEREITUNG'. On the right, a larger sign reads '3.01 Klassenraum', 'Achtung', 'Vorher Schließen (Bitte nicht lockern)', and features a red 'STOP' sign.	Raum: 3.01
 A close-up of a yellow Trotec PC220 dust meter. The screen shows a date/time of 09-29-2021 21:36 and a list of dust particle counts: 0.3um: 6866, 0.5um: 2021, 1.0um: 403, 2.5um: 175, 5.0um: 41, 10um: 18. Environmental data at the bottom shows AT: 21.9°C, RH: 47.5%, DP: 10.9°C, WB: 16.0°C.	Raum: 3.01 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 µm – 6866 1. Messpunkt
 A close-up of the same Trotec PC220 dust meter. The screen shows a date/time of 09-29-2021 21:37 and a list of dust particle counts: 0.3um: 6778, 0.5um: 2089, 1.0um: 468, 2.5um: 93, 5.0um: 19, 10um: 6. Environmental data at the bottom shows AT: 22.3°C, RH: 46.1%, DP: 10.8°C, WB: 16.2°C.	Raum: 3.01 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 µm – 6778 2. Messpunkt

Bilddokumentation Raum 3.01 [4]

	Raum: 3.01 Feinstaubmessung vor Messraumvorbereitung 0,3 µm – 6323 3. Messpunkt
	Raum: 3.01 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 3398 1. Messpunkt

Bilddokumentation Raum 3.01 [4]

	Raum: 3.01 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 3381 2. Messpunkt
	Raum: 3.01 Feinstaubmessung nach Messraumvorbereitung 0,3 µm – 2169 3. Messpunkt

Bilddokumentation Raum 3.01 [4]

	Raum: 3.01 Raumluftmessung
	Raum: 3.01 Raumklimamessung Temp.: 23,7 Rel. Luftfeucht.: 46,2 %
	Raum: 3.01 Raumluftmessung (1,5 Std.)

Bilddokumentation Raum 3.01 [4]

 A digital climate measurement device is placed on a light-colored wooden floor. The device's screen displays 'CO2 575 ppm' in large digits. Below this, it shows 'Air Temp: 24.3', 'Humidity: 44.8', and 'Pressure: 1092.4'. A black cable is connected to the side of the device.	Raum: 3.01 Raumklimamessung (1,5 Std.) Temp.: 24,3 Rel. Luftfeucht.: 44,8 %
 A digital climate measurement device is placed on the hood of a dark-colored car. The device's screen displays '84 %' in large digits, with 'DRY' and 'COMFORT' indicators. Below this, it shows '12.5 °C' and '12.2 °C'. A smaller digital display in front of it shows '81 %' and '12.2 °C'. The background shows a street scene with buildings and parked cars.	Raum: 2.12 Aussenklimamessung Klimawerte (Mittelwerte) Temp.: 12,3 Rel. Luftfeucht.: 82 %

Bilddokumentation Raum 3.01 [4]

	Aussen Feinstaubmessung 0,3 µm – 8015
	Aussen Luftdruck 986 hPa

Anhang C3 - Vorbemerkung

Vorbemerkung [4]

Das IQUH Institut – Qualitätsverbund Sachverständige und Ingenieure beschäftigt sich mit der Bewertung von Produkten, Bauteil- und Raumlufprüfungen sowie Gebäudeuntersuchungen.

In Bezug auf Innenraumlufprobenahmen, Material- und Bauteiluntersuchungen beauftragt das IQUH im Rahmen seiner Sachverständigen- und Beratertätigkeit geprüfte Messtechniker und akkreditierte Laborinstitute. Die Umweltanalysen werden gemäß den allgemein anerkannten Normen und gemäß VDI 4300ff bzw. DIN EN ISO 16000ff und den IQUH Messstrategien ausgeführt. In diesem Zusammenhang erstellt das Institut auch die Lastenhefte mit Sanierungsvorschlägen. Zudem wird eine Qualitätsüberwachung mit Kontrollmessungen am Ende von erforderlichen Sanierungsmaßnahmen generell durchgeführt.

Das IQUH bildet Handwerker, Planer und Sachverständige im Bereich der Bauschadensproblematik, der Messtechnik und der Geruchsprüfungsverfahren aus. Herr Weisnisch ist als Berater in Baurechtsverfahren als Sachverständiger tätig und moderiert streitverhindernde Lösungsansätze bei Schimmel- oder Schadstoff- Richtwertüberschreitungen im Bauwesen.

Als Vize-Präsident der Deutschen Gesellschaft für Umwelt- und Humantoxikologie e. V., Würzburg (www.dguht.de), setzt sich der Berichtsteller für eine wissenschaftlich basierte Analytik und einen präventiven Arbeits- und Verbraucherschutz ein.

Anhang C4 - Vorgang

Vorgang [4]

Auftraggeber:	Ascona Gesellschaft für ökologische Projekte König Holger - Jama Shlomo GbR Eschenriederstr. 65 82194 Gröbenzell
Ihre Auftragserteilung:	Durch Holger König
Auftragsnummer:	AG0151
Durchführung:	Dipl.-Ing. (FH) Waldemar Bothe
Fragestellung:	Untersuchung der Raumluftqualität
Labor – Analytik:	Akkreditiertes Labor Analytik Aurachtal
Termin der Messung:	24.09.2021
Anwesende beim Termin:	Waldemar Bothe, Frank Hübner

Anhang C5 - Anlagen

Vorgaben der Raumlufthygiene / Materialqualität [4]

Auszug aus „Weitere Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (BB-ZTV) für Messung der Innenraumlufthygiene“:

2.3 Messung:

Raumlufthygiene-Messung nach DIN 16000ff für Räume mit Lüftungsanlagen mit Verschlusszeiten von etwa 8 Std nach ca. 10 minütiger Querlüftung und bei nutzungsbezogenem Lüftungsbetrieb gemessen. Durchführung einer Messung folgender Substanzen:

- TVOC,
- Einzel-VOC,
- Aldehyde und
- Formaldehyd.

Zusätzlich muss eine Feinstaubkontrolle – Messung bis $0,3\ \mu\text{m}$ – vor und nach der Reinigung durchgeführt werden.

2.4 Auswertung:

Laboranalytik ist Gegenstand der Beauftragung, ebenso die Bewertung der TVOC, Einzel VOC und Formaldehydergebnisse erfolgt gemäß den Richtwerten vom „Ausschuss für Innenraumrichtwerte“ der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (IRK).

Wahrscheinlichkeit bzgl. Schadenseinschätzungen/Indizien [4]

Nicht immer sind Feststellungen bzw. Bewertungen „mit Gewissheit“ oder „mit Gewissheit nicht“ möglich. Dies ggf. auch in Abhängigkeit vom Stand der Feststellungen bzw. vom Umfang und Aufwand der Untersuchungen. Dies kann dazu führen, dass Beweisfragen (oder ggf. Teilfragen) nur unter Angabe von Wahrscheinlichkeitsgraden bewertet werden können. Für die Formulierungen bei der Beantwortung der Beweisfragen bedient sich unser Institut der Skalierung der Wahrscheinlichkeitsgrade mit einer Skalierung nach Dr. Aurnhammer:

- +6 Ursache bzw. Aussage mit Gewissheit (100%)
- +5 Ursache bzw. Aussage mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit (99%)
- +4 Ursache bzw. Aussage sehr hoch / wahrscheinlich (80%)
- +3 Ursache bzw. Aussage wahrscheinlich (60%)
- +2 Möglichkeit für Ursache wahrscheinlicher als „Nicht-Ursächlich“ (40%)
- +1 Ursache bzw. Aussage möglich (20%)
- +/- 0 Ursache technisch nicht klärbar bzw. Aussage aus technischer Sicht nicht möglich
- 1 Ursache bzw. Aussage wenig möglich (20%)
- 2 Nicht-Ursächlichkeit ist wahrscheinlicher als Möglichkeit für die Ursache (40%)
- 3 Ursache bzw. Aussage unwahrscheinlich (60%)
- 4 Ursache bzw. Aussage sehr unwahrscheinlich (80%)
- 5 Ursache bzw. Aussage mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht (99%)
- 6 Ursache bzw. Aussage mit Gewissheit nicht (100%)

Sofern die betreffenden Feststellungen bzw. Bewertungen (falls möglich) „mit Gewissheit“ oder „mit Gewissheit nicht“ beurteilt werden sollen, sind ggf. weitergehende Untersuchungen und Beweisverfahren erforderlich.

Sofern die betreffenden Feststellungen bzw. Bewertungen (falls möglich) „mit Gewissheit“ oder „mit Gewissheit nicht“ beurteilt werden sollen, sind ggf. weitergehende Untersuchungen und Beweisverfahren erforderlich.

Richtwerte UBA/AIR für Innenraumluft 2021 [4]

Verbindung	Richtwert II ²⁾	Richtwert I ²⁾	Einheit	Jahr der Festlegung
Aceton (CAS-Nr. 67-64-1)	160	53	mg/m ³	2021
Methylmethacrylat (CAS-Nr. 80-62-6)	2,1	1,1	mg/m ³	2021
Benzothiazol (CAS-Nr. 95-16-9)	nicht abgeleitet	15 (v)	µg/m ³	2020
Stickstoffdioxid (NO ₂ , CAS-Nr. 10102-44-0)	0,25 (60 Min-Wert)	0,080 (60 Min-Wert)	mg/m ³	2018
2-Phenoxyethanol (CAS-Nr. 122-99-6)	0,10	0,030	mg/m ³	2018
Tetrachlorethen (CAS-Nr. 127-18-4)	1,0	0,10	mg/m ³	2017
Propan-1,2-diol (CAS-Nr. 57-55-6)	0,60	0,060	mg/m ³	2017
C ₇ -C ₈ -Alkylbenzole (Summenrichtwert Toluol, Xylol und Ethylbenzol)	Siehe Erläuterungen im Text			2016
Toluol (CAS-Nr. 108-88-3) ³⁾	3,0	0,30	mg/m ³	2016
Formaldehyd (CAS-Nr. 50-00-0)	nicht abgeleitet	0,10	mg/m ³	2016
Xylol Summe (CAS-Nr. 95-47-6; 108-38-3; 106-42-3; 1330-20-7) ³⁾	0,80	0,10	mg/m ³	2015
Butanonoxim (CAS-Nr. 96-29-7)	60	20	µg/m ³	2015
2-Chlorpropan (CAS-Nr. 75-29-6)	8,0	0,80	mg/m ³	2015
Ethylacetat (CAS-Nr. 141-78-6)	6,0	0,60	mg/m ³	2014
1-Methyl-2-pyrrolidon (CAS-Nr. 872-50-4)	1,0	0,10	mg/m ³	2014
1-Butanol (CAS-Nr. 71-36-3)	2,0	0,70	mg/m ³	2014
2-Ethylhexanol (CAS-Nr. 104-76-7)	1,0 (v)	0,10 (v)	mg/m ³	2013
Ethylenglykolmonomethylether (EGME, CAS-Nr. 109-86-4)	0,20 [= 0,050 ppm]	0,020 [= 0,050 ppm]	mg/m ³	2013
Diethylenglykolmethylether (DEGME, CAS-Nr. 111-77-3)	6,0 (v) [= 1,0 ppm]	2,0 (v)	mg/m ³	2013
Diethylenglykoldimethylether (DEGDME, CAS-Nr. 111-96-6)	0,30 [= 0,060 ppm]	0,030	mg/m ³	2013
Ethylenglykolmonoethylether (EGEE, CAS-Nr. 110-80-5)	1,0 [= 0,40 ppm]	0,10	mg/m ³	2013
Ethylenglykolmonoethylether-acetat (EGEEA, CAS-Nr. 111-15-9)	2,0 (v) [= 0,40 ppm]	0,20 (v)	mg/m ³	2013
Diethylenglykolmonoethylether (DEGEE, CAS-Nr. 111-90-0)	2,0 (v) [= 0,40 ppm]	0,70 (v)	mg/m ³	2013
Ethylenglykolbutylether (EGBE, CAS-Nr. 111-76-2)	1,0 [= 0,30 ppm]	0,10	mg/m ³	2013

Fortsetzung Richtwerte UBA/AIR für Innenraumluf 2021 [4]

Ethylenglykolbutyletheracetat (EGBEA, CAS-Nr. 112-07-2)	2,0 (v) [= 0,30 ppm]	0,20 (v)	mg/m ³	2013
Diethylenglykolbutylether (DEGBE, CAS-Nr. 112-34-5)	1,0 (v) [= 0,20 ppm]	0,40 (v)	mg/m ³	2013
Ethylenglykolhexylether (EGHE, CAS-Nr. 112-25-4)	1,0	0,10	mg/m ³	2013
2-Propylenglykol-1-methylether (2PG1ME, CAS-Nr. 107-98-2)	10	1,0	mg/m ³	2013
Dipropylenglykol-1-methylether (D2PGME, CAS-Nr. 34590-94-8; 13429-07-7; 20324-32-7; 13588-28-8; 55056-71-2)	7,0 (v) [=1,0 ppm]	2,0 (v)	mg/m ³	2013
2-Propylenglykol-1-ethylether (2PG1EE, CAS-Nr. 1569-02-4)	3,0 [=0,50 ppm]	0,30	mg/m ³	2013
2-Propylenglykol-1-tertbutylether (2PG1tBE, CAS-Nr. 57018-52-7)	3,0 [=0,50 ppm]	0,30	mg/m ³	2013
Default-Wert: Glykoether mit unzureichender Datenlage	50 (v) [=0,050 ppm]	5,0 (v) [=0,0050 ppm]	µl/m ³	2013
Naphthalin und Naphthalin-ähnliche Verbindungen	30 (v)	10 (v)	µg/m ³	2013
Acetaldehyd (CAS-Nr. 75-07-0)	1,0	0,10	mg/m ³	2013
Methylisobutylketon (CAS-Nr. 108-10-1)	1,0	0,10	mg/m ³	2013
Ethylbenzol (CAS-Nr. 100-41-4) ³⁾	2,0	0,20	mg/m ³	2012
Alkylbenzole, C ₉ -C ₁₅	1,0	0,10	mg/m ³	2012
Kresole	50	5,0	µg/m ³	2012
Phenol (CAS-Nr. 108-95-2)	0,20	0,020	mg/m ³	2011
2-Furaldehyd (CAS-Nr. 98-01-1)	0,10	0,010	mg/m ³	2011
Zyklische Dimethylsiloxane D ₃ -D ₆ (Summenrichtwert)	4,0	0,40	mg/m ³	2011
Benzaldehyd (CAS-Nr. 100-52-7)	0,20 (v)	0,020 (v)	mg/m ³	2010
Benzylalkohol (CAS-Nr. 100-51-6)	4,0	0,40	mg/m ³	2010
Monozyklische Monoterpene (Leitsubstanz d-Limonen)	10	1,0	mg/m ³	2010
Aldehyde, C ₄ bis C ₁₁ (gesättigt, azyklisch, aliphatisch)	2,0	0,10	mg/m ³	2009
dioxinähnliche PCB	Siehe Erläuterungen im Text			2007
C ₉ -C ₁₄ -Alkane / Isoalkane (aromatenarm)	2,0	0,20	mg/m ³	2005
Terpene, bicyclisch (Leitsubstanz α-Pinen)	2,0	0,20	mg/m ³	2003
Tris(2-chlorethyl)phosphat (TCEP)	50	5,0	µg/m ³	2002

Fortsetzung Richtwerte UBA/AIR für Innenraumluft 2021 [4]

Diisocyanate	Siehe Erläuterungen im Text			2000
Quecksilber (als metallischer Dampf)	0,35	0,035	µg/m ³	1999
Styrol (CAS-Nr. 100-42-5)	0,30	0,030	mg/m ³	1998
Dichlormethan (CAS-Nr. 75-09-2)	2,0 (24 h)	0,20	mg/m ³	1997
Pentachlorphenol (PCP) (CAS. Nr. 87-86-5)	1,0	0,10	µg/m ³	1997

¹⁾ Die Werte entsprechen den AIR-Rundungsregeln für Richtwerte vom März 2020

²⁾ Üblicherweise handelt es sich um Langzeitwerte. Davon abweichende Mittelungszeiträume sind in Klammern angegeben, z. B. 24 Stunden (h).

³⁾ Als Gesamtrichtwert C₁₀-Alkylbenzole

(v) vorläufig

Quelle: Umweltbundesamt

Leitwerte für die Innenraumluft [4]

Unter einem Leitwert versteht die Ad-hoc-Arbeitsgruppe einen hygienisch begründeten Beurteilungswert eines Stoffes oder einer Stoffgruppe. Leitwerte werden festgelegt, wenn systematische praktische Erfahrungen vorliegen, dass mit steigender Konzentration die Wahrscheinlichkeit für Beschwerden oder nachteilige gesundheitliche Auswirkungen zunimmt, der Kenntnisstand aber nicht ausreicht, um toxikologisch begründete Richtwerte abzuleiten. Leitwerte wurden bisher festgelegt für Kohlendioxid in der Innenraumluft, für die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (Total Volatile Organic Compounds TVOC) und für Feinstaub (Particulate Matter - PM 2,5).

Leitwerte für Kohlendioxid in der Innenraumluft

Leitwerte für Kohlendioxid (2008)		
CO ₂ -Konzentration (ppm)	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
< 1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1000–2000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raums prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

Quelle: Umweltbundesamt

Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft

Da die Innenraumluft viele organische Verbindungen enthält und Richtwerte nur für relativ wenige Einzelverunreinigungen zur Verfügung stehen, hat die Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der IRK/AOLG Maßstäbe zur Beurteilung von flüchtigen organischen Verbindungen in der Innenraumluftqualität mit Hilfe der TVOC-Werte erarbeitet. Zur Verdeutlichung der Unsicherheiten, die bei der Ableitung vorlagen, wurden nicht einzelne Zahlenwerte, sondern Konzentrationsbereiche angegeben. Für die Bewertung von TVOC-Werten wurden 5 Stufen definiert und für die einzelnen Stufen wurden bestimmte Maßnahmen empfohlen.

Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft (2007):

Stufe	Konzentrationsbereich [mg TVOC/m ³]	Hygienische Bewertung
1	≤0,3mg/m ³	Hygienisch unbedenklich
2	>0,3-1 mg/m ³	Hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen
3	>1-3 mg/m ³	Hygienisch auffällig
4	>3-10 mg/m ³	Hygienisch bedenklich
5	>10 mg/m ³	Hygienisch inakzeptabel

Quelle: Umweltbundesamt

Quellen [4]

1. ad-hoc-Arbeitsgruppe aus Mitgliedern der Innenraumlufthygiene-Kommission des UBA und Vertretern der Arbeitsgemeinschaft der Obersten Landesgesundheitsbehörden (AOLG) 1996: Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema. Bundesgesundheitsblatt 39 (11): 422-426.
2. Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB) (2003): Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) aus Bauprodukten. Stichwortsuche „AgBB“. <http://www.umweltdaten.de/daten/bauprodukte/agbb-bewertung-schema2004.pdf>
3. AGÖF-Orientierungswerte für Inhaltsstoffe von Raumluft und Hausstaub, Umwelt & Gesundheit 1/2004, S. 6-13 und in umwelt-medizin-gesellschaft 3/2004, S. 195 – 206.
4. Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Technische Richtkonzentrationen (TRK) für gefährliche Stoffe, TRGS 102, <http://www.baua.de/prax/ags/trgs102.pdf>
5. Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB) (2003): Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) aus Bauprodukten. <http://www.umweltbundesamt.de/search.htm> ; Stichwortsuche „AgBB“.
6. Bauproduktengesetz – BauPG: Gesetz über das Inverkehrbringen von und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten zur Umsetzung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte und anderer Rechtsakte der Europäischen Gemeinschaften (Bauproduktengesetz - BauPG) vom 10. August 1992, in der Fassung vom 28. April 1998 (BGBl. 1 S. 812).
7. Bauproduktengesetz: Gesetz über das Inverkehrbringen von und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten zur Umsetzung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte. Bundesgesetzblatt I, Nr. 39 vom 14.08.1992, 1495-1501; Novellierung 1998: Bekanntmachung der Neufassung des Bauproduktengesetzes vom 28. April 1998. Bundesgesetzblatt I, Nr. 25 vom 08.05.1998, 812-819
8. Biozidgesetz: Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 98/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Februar 1998 über das Inverkehrbringen von Biozid-Produkten (Biozidgesetz) vom 20. Juni 2002. Bundesgesetzblatt I, Nr. 40 vom 27. Juni 2002
9. Bossenmayer H.-J.: Eurocodes und Bauprodukte – Stand der europäischen Harmonisierung, DIBt Mitteilungen 5/2003, S. 125 – 140.
10. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesministerium für Gesundheit, jeweils Referat Öffentlichkeitsarbeit, Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit, Juni 1999
11. Bundesverband Die Verbraucher Initiative e.V., Schadstoffe in Innenräumen, info Nr. 55 A45195, August 2002
12. Chemikaliengesetz: Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (ChemG). Bundesgesetzblatt 1, Nr. 40 vom 27. Juni 2002

13. Chemikalien-Verbotsverordnung: Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz in der Fassung vom 13. Juni 2003 (BGBl. 1 Nr. 26 vom 25.06.2003 S. 867), zuletzt geändert am 25. Februar 2004 durch Artikel 1 der Achten Verordnung zur Änderung chemikalienrechtlicher Verordnungen (BGBl. I Nr. 9 vom 04.03.2004 S. 328)
14. DIBt-Merkblatt „Erarbeitung harmonisierter Normen nach der Richtlinie des Rates vom 21.12.1988 über Bauprodukte 89/106/EWG (Bauproduktenrichtlinie) und ihre Umsetzung in das nationale Regelwerk“. 2004 herausgegeben vom DIBt und über das DIN an alle Normungsmitarbeiter verteilt.
15. ECA (1991a): European Collaborative Action „Indoor Air Quality and its Impact on Man“: Guideline for the Characterisation of Volatile Organic Compounds Emitted from Indoor Materials and Products Using Small Test Chambers. Report Na. 8, EUR 1593 EN, European Commission, Joint Research Centre, Environment Institute
16. ECA (1991b): European Collaborative Action „Indoor Air Quality and its Impact on Man“: Effects of Indoor Air Pollution on Human Health. Report Na. 10, EUR 14086 EN, European Commission, Joint Research Centre, Environment Institute
17. ECA (1993): European Collaborative Action „Indoor Air Quality and its Impact on Man“: Determination of VOCs emitted from indoor materials and products - Interlaboratory comparison of small chamber measurements. Report Na. 13, EUR 15054 EN, European Commission, Joint Research Centre, Environment Institute
18. EC (1994): European Commission: Mitteilung der Kommission über die Grundlagendokumente. Amtsblatt EG, C 62/1 vom 28.2.1994
19. ECA (1995): European Collaborative Action „Indoor Air Quality and its Impact on Man“: Determination of VOCs emitted from indoor materials and products - Second interlaboratory comparison of small chamber measurements. Report No. 16, EUR 16284 EN, European Commission, Joint Research Centre, Environment Institute
20. ECA (1997) European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man": Evaluation of VOC Emissions from Building Products – Solid Flooring Materials. Report No. 18, EUR 17334 EN, European Commission, Joint Research Centre, Environment Institute.
21. ECA (1997) European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man". Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality
22. Investigations. Report No. 19, EUR 17675 EN, European Commission, Joint Research Centre, Environment Institute.
23. ECA (1999): European Collaborative Action
24. Indoor Air Quality and its Impact on Man": Sensory Evaluation of Indoor Air Quality. Report Na. 20, EUR 18676 EN, European Commission, Joint Research Centre, Environment Institute
25. EG-Richtlinie 67/548/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe vom 27. Juni 1967 (ABl. EG vom 16.08.1967 Nr. L 196 S. 1), zuletzt geändert am 29. April 2004 durch Artikel 1 der Richtlinie 2004/73/EWG der Kommission zur

neunundzwanzigsten Anpassung der Richtlinie 67/548/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe an den technischen Fortschritt (ABl. EU vom 30.04.2004 Nr. L 152 S.1)

26. EG-Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG) - Bauproduktenrichtlinie - Amtsblatt c EG Nr. L 40 S. 12-26; geändert durch die Richtlinie des Rates 93/68/EWG vom 22. Juli 1993;
27. EG-Bauproduktenrichtlinie - Leitpapiere, verfasst von Vertretern der Mitgliedstaaten und der Dienste der Europäischen Kommission. In der englischen Fassung im Internet erhältlich unter <http://europa.eu.int/comm/enterprise/construction/internal/guidpap/guidpap.htm>. Alle Leitpapiere in aktueller Fassung siehe Kiehne, Hinrich; bearbeitet von Lutz, Holger und Springborn, Matthias: Bauproduktengesetz Materialsammlung. Loseblattsammlung, Grundwerk 1992, Beuth Verlag
28. EG- Richtlinie 98/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über das Inverkehrbringen von Biozid-Produkten vom 16. Februar 1998 (Biozid-Richtlinie) (ABl. EG vom 24.04.1998 Nr. L 123 S. 1;ABl. EG vom 08.06.2002 Nr. L 150: S. 71) zuletzt geändert am 29. September 2003 durch Anhang II Nr. 26 u Anhang III Nr. 76 der Verordnung (EG) Nr. 1882/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Anpassung der Bestimmungen über die Ausschüsse zur Unterstützung der Kommission L der Ausübung von deren Durchführungsbefugnissen, die in Rechtsakten vorgesehen sind, für die das Verfahren des Artikels 251 des EG-Vertrags gilt, an den Beschluss 1999/468/EG des Rates (ABl. EU vom 31.10.2003 Nr. L 284 S. 1)
29. Europäisches Parlament, Ausschuss für Umweltfragen, Volksgesundheit und Lebensmittelsicherheit, Dokument: Vorläufig 2004/2132(INI) - PR\545962DE.doc- PE349.889 vom 27. Oktober 2004)
30. Europäische Kommission, „Europäische Strategie für Umwelt und Gesundheit“ (SCALE-Initiative), KOM (2003) 338, und „Der Europäische Aktionsplan Umwelt und Gesundheit“ 2004-2010, KOM (2004) 416
31. Fischer J., Englert N. und Seifert B (1998): Luftverunreinigungen und geruchliche Wahrnehmungen unter besonderer Berücksichtigung von Innenräumen. WaBoLu- Hefte 1/1998. Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Berlin. 1 10 S. ISSN 0175-421 1
32. Heinzow B (2003), FLUGS-Fachinformationsdienst – Seminar „Konfliktfeld Umwelt und Gesundheit. Risikokommunikation – Dialog oder Akzeptanzbeschaffung?“, 9. 12. 2003, Berlin. Im Internet unter <http://www.umweltbundesamt.de>.
33. Hippelein M (2003) Erhebung und Diskussion von Referenzdaten der TVOC- Konzentration in Innenräumen. Umed Forsch Prax 8 (2): 87-89.
34. Konzeption der Bundesregierung zur Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen, Hrsg. Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bundesumweltministerium, September 1992; 35. in Ergänzung zur Konzeption: Bericht über den Stand der Umsetzung der Maßnahmenvorschläge, Bericht für das Bundeskabinett, Februar 1996 (nicht veröffentlicht)
36. Krause C et al. (1991) Umwelt-Survey: Messung und Analyse von Umwelt- belastungsfaktoren in der Bundesrepublik Deutschland - Umwelt und Gesundheit. Band III c: Wohn-Innenraum: Raumluft. WaBoLu-Heft 4. Bundesgesundheitsamt, Berlin, 1991.

37. Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden, Umweltbundesamt, Juni 2000
38. Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen, Umweltbundesamt, Dezember 2002, und zugehörige Kurzfassung mit dem Titel „Hilfe! Schimmel im Haus“.
39. Leitfaden „Angriff des schwarzen Staubes – das Phänomen ‚schwarze Wohnungen‘ – Ursachen- Wirkungen – Abhilfe“ („Fogging-Leitfaden“), Umweltbundesamt 2002
40. Lux et al. (2001) Belastung der Raumluft privater Neubauten mit flüchtigen organischen Verbindungen. Bundesgesundheitsbl-Gesundheitsforsch-Gesundheitschutz 44: 619-624.
41. Maroni, M., Seifert, B. und T. Lindvall (1995): Indoor Air Quality, A Comprehensive Reference Book; Air Quality Monographs - Vol 3. Elsevier Amsterdam
42. Mølhave L (1991) Volatile organic compounds. Indoor Air 4: 357-376. 43. Musterbauordnung, Fassung November 2002
44. Oppl R et al. (2000) Innenraumluft und TVOC: Messung, Referenz- und Zielwerte, Bewertung. Bundesgesundheitsbl-Gesundheitsforsch-Gesundheitschutz 43:513-518.
45. Oppl R et al.(2002) Emissionskontrollierte, lösemittelfreie Verlegetechnikwerkstoffe für Bodenbeläge und Parkett. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 62 Nr.4: 173-176.
46. Rat der Europäischen Gemeinschaften (1989): Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG). Amtsblatt der EG Nr. L 40/12-26.
47. Salthammer T (1999) Indoor air pollution by release of VOCs from wood-based furniture. In: Salthammer T (Hrsg) Organic indoor air pollutions. Wiley-VCH Verlag Weinheim, 203-218.
48. Salthammer T (2000) Verunreinigungen der Innenraumluft durch reaktive Substanzen – Nachweis und Bedeutung von Sekundärprodukten. In Moriske HJ und Turowski E (Hrsg): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. Ecomed Verlag, Landsberg, Kapitel III-6.4.2, 1-16.
49. Schleibinger H et al. (2001) VOC-Konzentrationen in Innenräumen des Großraums Berlin im Zeitraum von 1988-1999. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 61 Nr.1/2: 26- 38.
50. Seifert B. (1999): Richtwerte für die Innenraumluft: TVOC. Bundesgesundheitsblatt 42 (3), 270-278 51. Springborn M (2004): Die Koordinierungsstelle für die harmonisierte europäische Normung im DIBt – Merkpunkte für die Mitarbeit in der Normungsarbeit, SIBt Mitteilungen 4/2004, S. 106 – 116.
52. Szewzyk R, Umweltbundesamt, Dienstreisebericht vom 13. 02. 2004 über die Internationale Tagung „Healthy Buildings“ in Singapur, 7.-11.12. 2003.
53. TRGS 900: Technische Regeln für Gefahrstoffe. Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz "Luftgrenzwert". Fortlaufende Aktualisierung im Bundesarbeitsblatt.
54. WHO Weltgesundheitsorganisation (1998) Indoor air quality: organic pollutants. EURO Reports and Studies No.111, Copenhagen.

55. WHO World Health Organization (2000) Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. WHO Regional Publications, European Series, No. 91. World Health Organization Regional Office for Europe. Copenhagen.
56. Wilke O et al. (2003) Untersuchung und Ermittlung emissionsarmer Klebstoffe und Bodenbeläge, UBA-Texte27/03, Umweltbundesamt Berlin.
57. Witten J, Hessisches Sozialministerium, Vorsitzende des Ausschusses zur Gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB), Vortrag „Gesundheitliche Bewertung der Emissionen von VOC aus Bauprodukten – Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB)“. Normenverzeichnis
58. DIN EN 717-1: Holzwerkstoffe - Bestimmung der Formaldehydabgabe - Teil 1: Formaldehydabgabe nach der Prüfkammer-Methode E DIN EN 13419-1, Januar 2003: Bauprodukte - Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen - Teil I: Emissionsprüfkammer-Verfahren. Ausgabe August 2002
59. DIN 1946-6: Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen; Anforderungen, Ausführung, Abnahme (VDI-Lüftungsregeln). Ausgabe Oktober 1998
60. DIN (Deutsches Institut für Normung) DIN EN 13419- Teil 1 bis 3: Bauprodukte - Bestimmung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Teil 1.: Emissionsprüfkammer- Verfahren – Deutsche Fassung prEN 13419-1:2002; Teil 2: Emissionsprüfzellen-Verfahren – Deutsche Fassung prEN 13419-2:2002; Teil 3: Verfahren zur Probenahme, Lagerung der Proben und Vorbereitung der Prüfstücke. Deutsche Fassung prEN 13419-3:2002.
61. DIN ISO 16000-3: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen; Probenahme mit einer Pumpe. Ausgabe August 2003
62. DIN/ISO 16000-6:2002-09 Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern - Probenahme auf TENAX TA, thermische Desorption und Gaschromatographie.
63. ISO 16000-6: Indoor air - Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling an Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID. Ausgabe März 2004
64. DIN 1946-6: Raumluftechnik, Teil 6: Lüftung von Wohnungen, Anforderungen, Ausführung, Abnahme (VDI-Lüftungsregeln). Deutsches Institut für Normung, Berlin, Sept. 1994.

Anhang zum Bericht zur Entwurfsplanung

Dieser Abschnitt ist dem Anhang zum Bericht zur Entwurfsplanung [2] des Lüftungs- und Energiekonzepts Waldorfschule Uhlandshöhe entnommen.

Zusammenfassung OSN [2]

OSN Gesamtfläche	2063,89 m ²
PV-Fläche	456 m ²
Solare Einstrahlung hor.	1093 kWh/m ² ·a
PV-Kollektoreffizienzgrad	0,1735
PV-Umwandlungseffizienz	0,95

	Simulation	Klassenraum	Simulation	Zeichnen	Simulation	Eurythmie	Vorbereitung	Simulation	Spezialsaal	SIA 2024	Küche/Ausgabe	Atrium	Simulation	SIA 2024	SIA 2024	Sonderflächen
	Chemie															
Grundfläche	m ²	76	71	93	178	23	276	159	451	17.12	101.06					
Gesamte Zonenfläche	m ²	349	516	189	178	258	276	159	451	186.83	101.06					
Skulpturenparktor	-	4.6	7.3	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	10.9	1					
Lüftungst.	Überstromelement	nein	Überstromelement	Überstromelement	Überstromelement	Fensterlüftung	Zwund Abtürgelät	Zwund Abtürgelät	Zwund Erdklima	Abtürgelät	Zwund Abtürgelät					
WBG	jähren	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	3	ja					
spez. Luftvolumenstrom	ml/h/person	20	20	20	20	20	2780	16000	10500	60	152					
abs. Luftvolumenstrom	ml/h/Raum	800	835	310	583	20	2780	16000	10500	1140	152					
Luftmengenerhalt	ml/h	3074	6071	630	583		2780	16000	10500							

[illegible]

Gesamtwerte		
Heizwärmebedarf	MWh/a	103,66 kWh/(m²·a)
Strombedarf Lüftung	MWh/a	0,59 kWh/(m²·a)
Strombedarf Licht	MWh/a	22,24 kWh/(m²·a)
Strombedarf Sonstiges	MWh/a	40,46 kWh/(m²·a)
Stromerzeugung PV	MWh/a	-82,16 kWh/(m²·a)
Wärmeleistungsbedarf	kW	207,86 W/m²
Wärmeleistungsbedarf	kW	78,03

Gebäude gesamt	m³/h	18912
Luftmenge mit WRG	m³/h	11040
Luftmenge ohne WRG	m³/h	10500
Luftmenge Überstromelement	m³/h	
gesamt	m³/h	30552

Primärenergie		
Heizwärmebedarf	81,22 MWh/a	34,24 kWh/(m²·a)
Strombedarf Lüftung	17,27 MWh/a	0,48 kWh/(m²·a)
Strombedarf Licht	40,04 MWh/a	15,03 kWh/(m²·a)
Strombedarf Sonstiges	72,81 MWh/a	27,33 kWh/(m²·a)
Stromerzeugung PV	-147,87 MWh/a	-55,51 kWh/(m²·a)

Anhang D2 - Randbedingungen für die therm. Simulation des OSN

Randbedingungen für die thermische Simulation des OSN [2]

Randbedingungen für die thermische Simulation des OSN

			Chemie 1. OG Süd (L18)	Klassenraum 2.OG Süd (L28)	Zehnhnen 2.OG Süd-West (L28W)
Allgemein					
A	Grundfläche	m ²	76,0	71,0	93,0
B	Gesamte Zonenfläche	m ²	349,0	516,0	189,0
C	Skalierungsfaktor	-	4,6	7,3	2,0
D	Nettovolumen	m ³	232,0	282,0	391
E	max. Belegungsdichte	m ² /p	1,9	1,7	6,0
F	Orientierung		S	S	SW
G	Wetterdatensatz		TRY 12X -2010 - Mannheim	TRY 12X -2010 - Mannheim	TRY 12X -2010 - Mannheim
Geometrie/Material					
Wand außen	1	Aufbau	Keine exp. Masse		
	2	ges. U-Wert opakes Bauteil (inkl. Wärmebrücken)	W/m ² K	0,23	0,23
Fenster	3	Fensterfläche	m ²	16,00	25,60
	4	Verglasungstyp		3-fach Glas	3-fach Glas
	5	Verglasung - Center-of-Glass U-Wert	W/m ² K	0,7	0,7
	6	Verglasung - g-Wert		0,5	0,5
	7	Verglasung - visuelle Transmission		0,64	0,64
		Rahmenanteil		0,2	
	8	Rahmen - U-Wert	W/m ² K	1,5	1,5
	9	Typ Verschattungssystem		außen liegender SoSchutz	außen liegender SoSchutz
	10	Abminderungsfaktor Sonnenschutz f _{sc}		0,20	0,20
Decke	11	U-Wert	W/m ² K	0,22	0,22
	12	Anteil abgehängter Decke	%	40%	40%
	13	Anteil exponierter thermischer Masse	%	60%	60%
Boden	14	Aufbau (von Oben nach Unten)	in cm		
	15	U-Wert	W/m ² K	0,92	0,92
Komfort Bedingungen					
Komfortgrenzen	16	Operative Temperature Winter - min/max	°C / °C	20/26	20/26
	17	Operative Temperature Sommer - min/max	°C / °C	gleitend	gleitend
Innere Wärmequellen					
Nutzungszeit	18	Typischen Nutzung (Mo-Fr)		8-17 Uhr wochentags	8-17 Uhr wochentags
	19	Wochenendnutzung		-	-
Interne Gewinne Personen	20	sensibel	W/p	75	75
	21	latent	g/h/p	110	110
Interne Gewinne Licht	22	installierte Kunstlichtleistung	W/m ²	10	10
	23	Standby-Verbrauch	%		
	24	Soll Beleuchtungsstärke	lx	500	500
	25	Regelung Beleuchtung		AN/AUS, keine Dimmung	AN/AUS, keine Dimmung
	26	Beleuchtung Zeitplan		8-17 Uhr wochentags	8-17 Uhr wochentags
Interne Gewinne, sonst.	27	Gewinne durch Geräte	W	400	400
	28	Stand-by Geräte (24/7), flächenspezifisch	W/m ²	1,5	1,5
		Geräte Zeitplan		8-17 Uhr wochentags	8-17 Uhr wochentags
Heizen / Kühlen					
	29	Art der Heizung		Konvektoren	Konvektoren
	30	Art der Kühlung		-	-
	31	Heizung / Kühlung	ja/-	ja/-	ja/-
	32	Temperaturregelung auf		Top	Top
	33	Solltemperatur Heizen	°C	21	21
	34	min. Kühlvorlauftemp	°C	-	-
	35	Massenstrom Flächenkühlung / -heizung	kg/(h*m ²)	-	-
Mechanische Lüftung					
Frischlufstrom	36	spez. Luftvolumenstrom	m ³ /h/Person	20,0	20,0
	37	abs. Luftvolumenstrom	m ³ /h	800	835
	38	Befeuchtung auf max. Zulufttaupunkt	°C	-	-
	39	Entfeuchtung auf max. Zulufttaupunkt	°C	-	-
	40	Soll-Zulufttemperatur Winter/Sommer	°C / °C	-	-
	41	Rückwärmmzahl (latent/sensibel)	% / %	-	-
	42	Effizienz adiabatische Abluftbefeuchtung		-	-
	43	Lüftung Zeitplan		bedarfsgerregelt	bedarfsgerregelt
	44	zusätzliche Regelung		-	-
	45	Spez. Lüfterstrombedarf Zu- + Abluft	W/m ² h	0,04 (nur Zuluft dp max + 50Pa)	0,04 (nur Zuluft dp max + 50Pa)
	46	Lüftungsquerschnitt Fassade-Ablüften (mit Sensor)		0,37	0,39
Natürliche Lüftung					
	47	Infiltration	1/h	0,05	0,05
	48	Frischluf über Fensterlüftung	m ³ /h/Person		
	49	Ablüften / Nachlüften (ja/nein)	ja / ja	ja / ja	ja / ja
	50	Regelstrategie Ablüften		Top > 23°C; Tzone>Tamb;	Top > 23°C; Tzone>Tamb;
	51	Regelstrategie Nachlüften		Top > 21°C; Tzone>Tamb; Tamb > 10°C	Top > 21°C; Tzone>Tamb; Tamb > 10°C
	52	Frischluf Zeitplan			
	53	max. Luftwechselrate (Tag/Nacht)	1/h	3/5	3/5
	54	Ablüften Zeitplan			
	55	Lüftungsquerschnitt Zuluft	m ²	2,50	2,43
	56	Lüftungsquerschnitt Abluft	m ²	2,50	2,43

Fortsetzung Randbedingungen für die thermische Simulation des OSN [2]

				Eurymie 2.00 Oct (L2E)	Speisezeit (REBT)	Nebenflächen/Vorbereitung
Allgemein						
A	Grundfläche	m²		178	276	23
B	Gesamte Zonenfläche	m²		178	276	258
C	Skalierungsfaktor	-		1.0	1.0	11.3
D	Nettovolumen	m³		645	1273	91
E	max. Belagungsdichte	m²/p		6	2	23
F	Orientierung			SO	S	S
G	Wetterdatensatz			TRY 12X-2010 - Mannheim	TRY 12X-2010 - Mannheim	TRY 12X-2010 - Mannheim
Geometrie/Material						
Wand außen						
1	Aufbau					
2	ges. U-Wert opakes Bauteil (inkl. Wärmebrücken)	W/m²K		0.23	0.23	0.23
Fenster						
3	Fensterfläche	m²		66	152	777
4	Verglasungstyp			3-fach Glas	3-fach Glas	3-fach Glas
5	Verglasung - Center-of-Glass U-Wert	W/m²K		0.7	0.7	0.7
6	Verglasung - g-Wert			0.5	0.5	0.5
7	Verglasung - visuelle Transmission			0.64	0.64	0.64
8	Rahmenanteil					
9	Rahmen - U-Wert	W/m²K		1.5	1.5	1.5
10	Typ Verschattungssystem			außen liegender SoSchutz	außen liegender SoSchutz	außen liegender SoSchutz
11	Abschattungsfaktor Sonnenschutz f _s			0.20	0.20	0.20
Decke						
12	U-Wert	W/m²K		0.22		
13	Anteil abgehängter Decke	%		40%	100%	40%
14	Anteil exponierter thermischer Masse	%		60%		60%
Boden						
15	Aufbau (von Oben nach Unten)	in cm			exponierter Boden	
16	U-Wert	W/m²K		0.92	0.92	0.92
Komfort Bedingungen						
Komfortgrenzen						
17	Operative Temperatur Winter - min/max	°C / °C		20/26	20/26	20/26
18	Operative Temperatur Sommer - min/max	°C / °C		gleitend	gleitend	gleitend
Innere Wärmequellen						
Nutzungszeit						
19	Typischen Nutzung (Mo-Fr)			8-17 Uhr wochentags	9-23 Uhr Mo-So	8-17 Uhr wochentags
20	Wochenendnutzung			-	9-23 Uhr Mo-So	-
Interne Gewinne Personen						
21	sensibel	W/p		75	75	75
22	latent	g/h/p		110		
Interne Gewinne Licht						
23	installierte Kunstlichtleistung	W/m²		10	10	10
24	Standby-Verbrauch	%		500	300	500
25	SoSt Beleuchtungsstärke	lx		AN/AUS, keine Dimmung	AN/AUS, keine Dimmung	AN/AUS, keine Dimmung
26	Regelung Beleuchtung			8-17 Uhr wochentags	9-14 Uhr + 18-23 Uhr	8-17 Uhr wochentags
Interne Gewinne, sonst.						
27	Gewinne durch Geräte	W		-	-	-
28	Stand-by Geräte (24/7), flächenspezifisch	W/m²		1.5	1.5	1.5
	Geräte Zeitplan			8-17 Uhr wochentags	-	-
Heizen / Kühlen						
29	Art der Heizung			Konvektoren	Fußbodenheizung	Konvektoren
30	Art der Kühlung			Wandelemente, frei Kühlung über Erdkollektoren	Deckenlüfter	
31	Heizung / Kühlung	ja/ja		ja/-	ja/-	ja/-
32	Temperaturregelung auf			Top	Top	Top
33	SoSt Temperatur Heizen	°C		21	21	21
34	min. Kühlvorlauftemp	°C		16 (+ Taupunktregelung)	-	-
35	Massenstrom Flächenkühlung /-heizung	kg/(h*m²)		12	12	
Mechanische Lüftung						
Frischlufstrom						
36	spez. Luftvolumenstrom	m³/h/Person		30.0	20	
37	abs. Luftvolumenstrom	m³/h		593	2760	
38	Befeuchtung auf max. Zulufttaupunkt	°C		-		
39	Erdfuchtung auf max. Zulufttaupunkt	°C		-		
40	SoSt-Zulufttemperatur Winter/Sommer	°C / °C		-		
41	Rückwärmszahl (latent/sensibel)	% / %		-	0/75	
42	Effizienz adiabatische Abluftbefeuchtung			-		
43	Lüftung Zeitplan			bedarfs geregelt	bedarfs geregelt	
44	zusätzliche Regelung			-		
45	Spez. Lüfterstrombedarf Zu. + Abluft	W/m².h		0.04 (nur Zuluft dp max + 50Pa)	0.5	
46	Lüftungsquerschnitt Fassade-Ablüften (mit Sensor)			0.27	1.28	
Natürliche Lüftung						
47	Infiltration	1/h		0.05	0.1	0.1
48	Frischluf über Fensterlüftung	m³/h/Person				20
49	Ablüften / Nachtlüften (ja/nein)			ja / ja	ja / ja	ja / ja
50	Regelstrategie Ablüften			Top > 23°C; Tzone>Tamb;	Top > 23°C; Tzone>Tamb;	Top > 23°C; Tzone>Tamb;
51	Regelstrategie Nachtlüften			Top > 21°C; Tzone>Tamb; Tamb > 10°C	Top > 21°C; Tzone>Tamb; Tamb > 11°C; Tzone>Tamb; Tamb >	
52	Frischluf Zeitplan					
53	max. Luftwechselrate (Tag/Nacht)	1/h		3/5	3/5	
54	Ablüften Zeitplan					
55	Lüftungsquerschnitt Zuluft	m²		6.17	10.67	
56	Lüftungsquerschnitt Abluft	m²		6.17	10.67	

Fortsetzung Randbedingungen für die thermische Simulation des OSN [2]

			Atrium 2.OG (AT1)	Atrium 1.OG (AT2)	Atrium EG (AT3)
Allgemein					
A	Grundfläche	m ²	107	164	180
B	Gesamte Zonenfläche	m ²	107	164	180
C	Skalierungsfaktor	-	1.0	1.0	1.0
D	Nettovolumen	m ³	786	630	765
E	max. Belegungsdichte	m ² /p	4	6	4
F	Orientierung				
G	Wetterdatensatz		TRY 12X -2010 - Mannheim	TRY 12X -2010 - Mannheim	TRY 12X -2010 - Mannheim
Geometrie/Material					
Wand außen	1 Aufbau				
	2 ges. U-Wert opakes Bauteil (inkl. Wärmebrücken)	W/m ² K	0.23	0.23	0.23
Fenster	3 Fensterfläche	m ²			
	4 Verglasungstyp		3-fach SSG	3-fach SSG	3-fach SSG
	5 Verglasung - Center-of-Glass U-Wert	W/m ² K	0.7	0.7	0.7
	6 Verglasung - g-Wert		0.5	0.5	0.5
	7 Verglasung - visuelle Transmission		0.64	0.64	0.64
	8 Rahmen - U-Wert	W/m ² K	1.5	1.5	1.5
	9 Typ Verschattungssystem		feste Lamellen	feste Lamellen	kein Sonnenschutz
	10 Abminderungsfaktor Sonnenschutz f _{sc}		-		
Decke	11 U-Wert	W/m ² K			
	12 Anteil abgehängter Decke	%	100%		
	13 Anteil exponierter thermischer Masse	%			
Boden	14 Aufbau (von Oben nach Unten)	in cm			
	15 U-Wert	W/m ² K	0.92	0.92	0.92
Komfort Bedingungen					
Komfortgrenzen	16 Operative Temperature Winter - min/max	°C / °C	20/26	20/26	20/26
	17 Operative Temperature Sommer - min/max	°C / °C	gleitend	gleitend	gleitend
Innere Wärmequellen					
Nutzungszeit	18 Typischen Nutzung (Mo-Fr)		8-17 Uhr	8-17 Uhr	8-17 Uhr
	19 Wochenendnutzung		-	-	-
Interne Gewinne Personen	20 sensibel	W/p	75	75	75
	21 latent	g/h/p			
Interne Gewinne Licht	22 installierte Kunstlichtleistung	W/m ²	6	6	6
	23 Standby-Verbrauch	%	-	-	-
	24 Soll Beleuchtungsstärke	lx	100	100	100
	25 Regelung Beleuchtung		AN/AUS, keine Dimmung	AN/AUS, keine Dimmung	AN/AUS, keine Dimmung
	26 Beleuchtung Zeitplan		8-17 Uhr	8-17 Uhr	8-17 Uhr
Interne Gewinne, sonst.	27 Gewinne durch Geräte	W	-	-	-
	28 Stand-by Geräte (24/7), flächenspezifisch	W/m ²	-	-	-
	Geräte Zeitplan		-	-	-
Heizen / Kühlen					
	29 Art der Heizung		Konvektoren	Konvektoren	Fußbodenheizung
	30 Art der Kühlung		Deckenlüfter	-	Deckenlüfter
	31 Heizung / Kühlung		ja/-	ja/-	ja/-
	32 Temperaturregelung auf		Top	Top	Top
	33 Solltemperatur Heizen	°C	21	21	21
	34 min. Kühlvorlauftemp	°C	-	-	-
	35 Massenstrom Flächenkühlung /-heizung	kg/(h*m ²)			12
Mechanische Lüftung					
Frischlüftstrom	36 spez. Luftvolumenstrom	m ³ /h/Person			
	37 abs. Luftvolumenstrom	m ³ /h			
	38 Befeuchtung auf max. Zulufttaupunkt	°C	-	-	-
	39 Entfeuchtung auf max. Zulufttaupunkt	°C	-	-	-
	40 Soll-Zulufttemperatur Winter/Sommer	°C / °C	-	-	-
	41 Rückluftrmzahl (latent/sensibel)	% / %	-	-	-
	42 Effizienz adiabatische Abluftbefeuchtung		-	-	-
	43 Lüftung Zeitplan		-	-	-
	44 zusätzliche Regelung		-	-	-
	45 Spez. Lüfterstrombedarf Zu- + Abluft	W/m ³ h			
	46 Lüftungsquerschnitt Fassade-Ablüften (mit Sensor)				
Natürliche Lüftung					
	47 Infiltration	1/h	0.1	0.1	0.1
	48 Frischluft über Fensterlüftung	m ³ /h/Person			
	49 Ablüften / Nachtlüften (ja/nein)		ja / ja	ja / ja	ja / ja
	50 Regelstrategie Ablüften		Top > 23°C; Tzone>Tamb; Top > 23°C; Tzone>Tamb; Top > 23°C; Tzone>Tamb;		
	51 Regelstrategie Nachtlüften		Top > 21°C; Tzone>Tamb; Tamb > 10°C Top > 21°C; Tzone>Tamb; Tamb > 10°C		
	52 Frischluft Zeitplan				
	53 max. Luftwechselrate (Tag/Nacht)	1/h			
	54 Ablüften Zeitplan				
	55 Lüftungsquerschnitt Zuluft	m ²	0	0	5.67
	56 Lüftungsquerschnitt Abluft	m ²	5.67	0	0

