

Landkreis Ansbach Gebietskörperschaft des
öffentlichen Rechts



**„Zusätzliche Simulationsberechnungen
und Evaluationen im Bereich einer optimierten
Heizungs- und Lüftungstechnik am Plusenergie-
gebäude Staatliches Berufliches Schulzentrum
Ansbach“**


Abschlussbericht über eine Projekt gefördert unter dem
Az: 29725
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Von:

Pia Regner, Dipl.-Ing.(FH), ING+ARCH Partnerschaft
Birte Lamprecht, B. Eng., ING+ARCH Partnerschaft

Ansbach, 10. August 2015

Projektkennblatt

<small>06/02</small> Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt					
Az	29725	Referat	25	Fördersumme	38.980,00 €
Antragstitel	Zusätzliche Simulationsberechnungen und Evaluationen im Bereich einer optimierten Heizungs- und Lüftungstechnik am Plusenergiegebäude Staatliches Berufliches Schulzentrum Ansbach				
Stichworte	Optimierung Anlagentechnik				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
3 Jahre + 5 Monate	07.12.2011	31.05.2015	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Landkreis Ansbach, Landrat Rudolf Schwemmbauer		Tel	0981 468 6000	
			Fax	0981 468 6209	
			Projektleitung		
			C. Deuter-Klein		
	Crailsheimstr. 1 91522 Ansbach		Bearbeiter		
			ING+ARCH, P. Regner		
Kooperationspartner					
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Ziel dieses Projekts ist der Nachweis, dass durch den Verzicht auf einen Großteil der Heizkörper im Passivhaus-Schulgebäude Investitionskosten eingespart werden, ohne die Laufzeiten der Lüftungsanlage bedeutend zu erhöhen. Durch diesen Nachweis können Gebäude mit hohen Nutzerzahlen wie Schulen, Kindergärten, etc. wirtschaftlich im Passivhaus-Standard realisiert werden. Hierdurch kann die flächendeckende Durchsetzung des Passivhausstandards bei Neubauten und, unter Umständen, in Teilbereichen auch bei Sanierungen unterstützt werden. Anlass des Antrags ist der Bau des Plusenergiegebäudes Staatliches Berufliches Schulzentrum Ansbach.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Im Zuge der Entwurfsplanung wurde ein Regelungskonzept erstellt um den Jahreszeitabhängigen Betrieb der Lüftungsanlage, der Fensterlüftung, der Raffstore und der Heizungsanlage festzulegen. Die Bauteilaufbauten und die Anlagentechnik wurden optimiert. Eine umfangreiche Simulation mit Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde durchgeführt um die Vorgaben für das Regelungskonzept feiner justieren zu können und um dem Planungsteam vor allem dem Ingenieurbüro für Heizung, Lüftung, Sanitär die Laufzeiten der Lüftungsanlage unterschiedlicher Ansätze aufzeigen zu können. Simuliert wurde mit dem Programm IDA ICE 4.2 (Indoor Climate and Energy). Untersucht wurden drei unterschiedliche Szenarien 1. Variante und Bezugsvariante war die komplette Beheizung der Passivhaussschule mit Heizkörpern und das Einbringen der Frischluft über eine Lüftungsanlage mit WRG. Bei Variante 2 übernimmt die Lüftungsanlage in den meisten Klassenzimmern die Wärmeverteilung. In Variante 3 waren nur in den Fluren noch Heizkörper eingerechnet. Sie Simulationsergebnisse wurden hinsichtlich Energieverbrauch, Behaglichkeit in den Klassenräumen, CO₂ Gehalt der Raumluft und Anteil der unzufriedenen Personen ausgewertet und analysiert. Betrachtet wurde ein Winterhalbjahr, hinterlegt mit den regionalen Klimadaten und den vorgesehenen Nutzungszeiten und Internen Wärmeeinträgen durch Geräte (Abschätzung) und Personen.</p> <p>Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, Betrachtungszeitraum 20 Jahre wurde mit der Liquiditätsmethode (Software Carsten Grobe Energiekostenberater) durchgeführt</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bismarckstr. 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de</small>					

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Variante 2 zeigen, dass eine Reduzierung der Heizkörper in den Klassenzimmern zu keiner nennenswerten Laufzeiterhöhung der Lüftungsanlage führt, um den notwendigen Heizenergiebedarf bereitzustellen. In Variante 3 ist zu erkennen, dass selbst beim Verzicht auf Radiatoren in den Vorbereitungsräumen ohne Belegung die geforderte Soll-Raumlufttemperatur in der Regel erzielt wird. Die Behaglichkeitsbetrachtungen haben bestätigt, dass die Komfortkriterien für Schulneubauten (Kategorie II, DIN EN 15251:2012-12) während der Nutzungszeiten in allen betrachteten Varianten erfüllt werden.

Die Variante 3 verdeutlicht, dass die fassadenweise geregelte Zulufttemperatur über die Lüftungsanlage insbesondere bei Nichtbelegung von Räumen intelligente Lüftungs-Regelungskonzepte erfordert und sich die Regelung an dem Raum mit dem höchsten Bedarf orientieren muss. Dies führt zu längeren Laufzeiten und damit zu einem erhöhten Energiebedarf. „Überströmkonzepte“, bei denen die Abluft von Räumen mit hoher Personenzahl zur Erwärmung von Räumen mit geringer Belegungsdichte genutzt wird, können zur Optimierung des Energiebedarfs Anwendung finden.

Zur evtl. notwendigen Trocknung der Außenluftfilter und zum Erreichen der geforderten Raumluftqualität vor Unterrichtsbeginn genügen geringe Vorlaufzeiten der Lüftungsanlage. Bei Laufzeitverlängerung zur Raumluft erwärmung ist es deshalb sinnvoll die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zu diesen Zeiten im Umluftbetrieb laufen zu lassen. Durch den geringeren Temperaturhub zur Nacherwärmung der Raumluft im Vergleich zur Anhebung der kälteren Außenfrischluft kann der Heizenergiebedarf minimiert werden.

Der Zeitraum im Jahr, an dem zur Versorgung der Räume mit Frischluft zusätzlich Wärme über die Zuluft eingebracht werden muss, beschränkt sich im Wesentlichen auf die Monate Januar und Februar. Eine morgendliche ein- bis zweistündige Aufheizphase über die Nacherwärmung der Zuluft ist abgesehen von wenigen Ausnahmetagen ausreichend.

Dies führt dazu, dass in der Gesamtkostenbetrachtung die Variante 3 mit der weitgehendsten Heizkörperreduzierung sich als die wirtschaftlichste darstellt.

In Hinsicht auf die Nachhaltigkeit ist Variante 2 mit geringerem Endenergiebedarf gegenüber Variante 3 überzeugend. Die Vertretbarkeit der Installation von Heizkörpern in Räumen mit geringer Nutzung ist in diesem Zusammenhang bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit gegenüber Variante 1 gegeben.

Alternativ können in diesen kritischen Räumen Elektroheizkörper installiert oder Nachheizregister in die Zuluft eingebaut werden, um kostenintensive Heizwärmeverteilungen zu vermeiden. Der Energieträger Strom ist aufgrund des höheren Primärenergiefaktors für die Nachhaltigkeitsbetrachtung jedoch schlechter zu bewerten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Herangehensweise, Simulation und Ergebnisse wurden an der Internationalen Passivhaus-Tagung 2014 in Aachen, auf der „Bau Innovativ“ 2013 in Fürstfeldbruck und anderen Tagungen vorgestellt. Zusätzlich erfolgten Veröffentlichungen in Zeitschriften und einem Plusenergie-Nichtwohngäudebuch des WEKS Verlags.

Fazit

Mit den untersuchten Varianten des Passivhaus-Berufsschulzentrums in Ansbach wird aufgezeigt, dass die Anlagentechnik bei Niedrigenergiegebäuden, die hohe Belegungsdichten aufweisen, minimiert werden kann. Eine Reduzierung der Konvektoren im Bereich der Klassenzimmer bzw. der Verzicht auf Heizkörper in allen Klassenräumen erfolgt ohne Komfortverlust und erweist sich als wirtschaftlichste Herangehensweise. Die Erhöhung des Endenergieverbrauchs Strom durch die geringfügig längeren Laufzeiten der Lüftungsanlage beträgt bei einem intelligenten Steuerungskonzept der Lüftungsanlagen auch bei einem Verzicht auf alle Heizkörper in den Klassenräumen maximal 10%.

Inhaltsverzeichnis

PROJEKTKENNBLETT	2
INHALTSVERZEICHNIS	4
ANLAGENVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS.....	7
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	8
ZUSAMMENFASSUNG.....	9
1 EINLEITUNG.....	10
2 SIMULATIONSGRUNDLAGEN BSZ ANSBACH	14
2.1 Annahmen für die Heizperiode.....	14
2.1.1 Raum-/Zonenübersicht	14
2.1.2 Bauteile	18
2.1.3 Anlagentechnik	20
2.1.4 Regelungswerte.....	20
2.1.5 Nutzung.....	21
2.1.6 Interne Wärmegewinne	22
2.1.7 Klima.....	22
2.1.8 Infiltration/Luftdichtheit.....	22
2.1.9 Wärmebrücken.....	22
2.2 Variantenbeschreibung für Heizperiode	23
2.2.1 Variante 1: Heizkörper in jedem Raum	23
2.2.2 Variante 2: Reduzierte Heizkörperanordnung.....	24
2.2.3 Variante 3: Keine Heizkörper in Klassenzimmern und Vorbereitungsräumen	26
3 GRUNDLAGEN WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG.....	27
3.1 Annahmen.....	27
4 SIMULATIONSERGEBNISSE.....	28
4.1 Heizperiode.....	28
4.1.1 Variante 1: Heizkörperanordnung in jedem Raum	30
4.1.2 Variante 2: Reduzierte Heizkörperanordnung in Klassenzimmern	32
4.1.3 Variante 3: Keine Heizkörper in allen Klassenzimmern und Vorbereitungsräumen	38
4.2 Endenergiebedarf und Wirtschaftlichkeit	40
4.2.1 Monatlicher Variantenvergleich Endenergiebedarf Strom	40
4.2.2 Monatlicher Variantenvergleich Heizendenergiebedarf.....	43
4.2.3 Endenergie und Primärenergie	45
4.2.4 Gesamtenergiebedarf und Softwaregrenzen	48

4.2.5	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	49
5	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	52
6	FAZIT	53
	LITERATURVERZEICHNIS.....	53
	ANHANG.....	54
	Ergebnistabellen Heizperiode	54
A 1	Variante 1: Heizkörperanordnung in jedem Raum	54
A 2	Variante 2: reduzierte Heizkörperanordnung in den Klassenzimmern	60
A 3	Variante 3: Keine Heizkörper in Klassen- und Vorbereitungsräumen	71

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Variante 1 – Raumluf- und operative Temperaturen, 7. Jan., D-2-005.....	54
Anlage 2: Variante 1 – Bauteiloberflächentemperaturen, 7. Jan., D-2-005.....	55
Anlage 3: Variante 1 – Wärmeströme in Bauteiloberflächen, 7. Jan., D-2-005	56
Anlage 4: Variante 1 – Wärmebilanz, 7. Jan., D-2-005	57
Anlage 5: Variante 1 – Raumlufqualität, 7. Jan., D-2-005.....	58
Anlage 6: Variante 1 – Fangers Komfortindex, 7. Jan., D-2-005	59
Anlage 7: Variante 2 – Raumluf- und operative Temperaturen, 16. Jan., D-2-006	60
Anlage 8: Variante 2 – Bauteiloberflächentemperaturen, 16. Jan., D-2-006	61
Anlage 9: Variante 2 – Wärmebilanz, 16. Jan., D-2-006.....	62
Anlage 10: Variante 2 – Raumluf- und operative Temperaturen, 7. Jan., D-2-006	63
Anlage 11: Variante 2 – Bauteiloberflächentemperaturen, 7. Jan., D-2-006	64
Anlage 12: Variante 2 – Wärmeströme in Bauteiloberflächen, 7. Jan., D-2-006.....	65
Anlage 13: Variante 2 – Wärmebilanz, 7. Jan., D-2-006.....	66
Anlage 14: Variante 2 – Raumlufqualität, 7. Jan., D-2-006	67
Anlage 15: Variante 2 – Fangers Komfortindex, 7. Jan., D-2-006.....	68
Anlage 16: Variante 2 – Raumluf- und operative Temperaturen, 30. Jan., D-2-006	69
Anlage 17: Variante 2 – Raumluf- und operative Temperaturen, 30. Jan., D-2-009	70
Anlage 18: Variante 3 – Vergleich Zuluft-Volumenströme, 7. – 13. Jan., D-2-008	71
Anlage 19: Variante 3 – Raumlufqualität, 7. – 13. Jan., D-2-008	72
Anlage 20: Variante 3 – Raumluf- und operative Temperaturen, 7. Jan., D-2-005	73
Anlage 21: Variante 3 – Wärmebilanz, 7. Jan., D-2-005.....	74
Anlage 22: Variante 3 – Raumlufqualität, 7. Jan., D-2-005	75
Anlage 23: Variante 3 – Fangers Komfortindex, 7. Jan., D-2-005.....	76
Anlage 24: Variante 3 – Temperaturvergleich, 7. – 13. Jan., D-2-008 und D-E-011.....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Raum-/Zonenübersicht.....	15
Tabelle 2: Bauteilübersicht.....	18
Tabelle 3: Interne Massen.....	19
Tabelle 4: Fenster.....	19
Tabelle 5: Gebäudetechnik.....	20
Tabelle 6: Übersicht Regelungssollwerte	21
Tabelle 7: Übersicht Nutzungszeiten.....	21
Tabelle 8: Interne Wärmegewinne.....	22
Tabelle 9: Wärmebrücken.....	23
Tabelle 10: Variante 1 - Lüftungsanlagenregelung	23
Tabelle 11: Variante 2 - Lüftungsanlagenregelung	24
Tabelle 12: Variante 2 – Regelungskonzept in der kältesten Woche bei nichtbelegter Klasse.....	24
Tabelle 13: Variante 3 - Heizkörperregelung in den Fluren.....	26
Tabelle 14: Variante 3 - Lüftungsanlagenregelung	26
Tabelle 15: Parameter Wirtschaftlichkeitsberechnung	27
Tabelle 16: Energiepreisannahmen und Preissteigerungen.....	27
Tabelle 17: Zonenzusammenfassung D-2-005 (Klasse 10 mit HK)	30
Tabelle 18: Zonenzusammenfassung D-2-006 (Klasse 11 ohne HK).....	32
Tabelle 19: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 80 % Belegung.....	41
Tabelle 20: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 100 % Belegung	42
Tabelle 21: Monatliche Heizendenergiebedarfsdeckung über Heizkörper	44
Tabelle 22: Monatliche Heizendenergiebedarfsdeckung über nacherwärmte Zuluft.....	44
Tabelle 23: Endenergiebedarf über den Simulationszeitraum	46
Tabelle 24: Primärenergiebedarf über den Simulationszeitraum.....	48
Tabelle 25: Gesamtkostenvergleich über 20 Jahre bei 80 % Belegung.....	50
Tabelle 26: Gesamtkostenvergleich über 20 Jahre bei 100 % Belegung.....	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtsplan BSZ Ansbach mit hervorgehobenem Neubauteil D.....	12
Abbildung 2: Ansicht West, Bauteil D.....	12
Abbildung 3: Schnitt Bauteil D mit hervorgehobener thermischer Hülle	13
Abbildung 4: Gebäudemodell für thermische Simulation	14
Abbildung 5: Grundriss EG	16
Abbildung 6: Grundriss 1. OG	16
Abbildung 7: Grundriss 2. OG	17
Abbildung 8: Grundriss EG mit Zonierung (Variante 2).....	25
Abbildung 9: Grundriss 1.OG mit Zonierung (Variante 2)	25
Abbildung 10: Grundriss 2.OG mit Zonierung (Variante 2).....	25
Abbildung 11: Grundriss 2. OG mit hervorgehobenen Räumen der Ergebnisdarstellung	28
Abbildung 12: Variante 1 - Temperaturverlauf Nov. bis April, Raum D-2-005.....	30
Abbildung 13: Variante 1 - Temperaturverlauf 31. Dez. - 06. Jan., Raum D-2-005.....	31
Abbildung 14: Variante 1 - Temperaturverlauf 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-005	31
Abbildung 15: Variante 1 - Wärmebilanz 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-005	32
Abbildung 16: Variante 2 - Temperaturverlauf Nov. bis April, Raum D-2-006.....	33
Abbildung 17: Variante 2 - Temperaturverlauf 16. Jan. (Regelbetrieb), Raum D-2- 006.....	34
Abbildung 18: Variante 2 - Wärmebilanz 16. Jan. (Regelbetrieb), Raum D-2-006	34
Abbildung 19: Variante 2 - Temperaturverlauf 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-006	35
Abbildung 20: Variante 2 - Wärmebilanz 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-006	35
Abbildung 21: Variante 2 - Temperaturverlauf 30. Jan. (kältester Tag im Jahr), Raum D-2-006 und D-2-009	37
Abbildung 22: Variante 3 - Temperaturverlauf 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-005	38
Abbildung 23: Variante 2 - Wärmebilanz 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-006	39
Abbildung 24: Variante 3 - Temperaturverlauf 07. bis 13. Januar (erster Woche nach Ferien), Raum D-E-011	40
Abbildung 25: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 80 % Belegung.....	41
Abbildung 26: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 100 % Belegung.....	42
Abbildung 27: Monatliche Heizendenergiebedarfsdeckung über Heizkörper	43
Abbildung 28: Endenergiebedarf über den Simulationszeitraum.....	46
Abbildung 29: Primärenergiebedarf über den Simulationszeitraum	47
Abbildung 30: Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten bei 80 % Belegung.....	50
Abbildung 31: Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten bei 100 % Belegung.....	51

Zusammenfassung

Im Rahmen des Neubaus des Erweiterungsbaus des Beruflichen Schulzentrum Ansbach in Passivhausbauweise wurden Simulationen durchgeführt um zu untersuchen wie sich der Verzicht auf Heizkörper in Klassenräumen und die Wärmeverteilung über die Lüftungsanlage auf den Energiebedarf, die Behaglichkeit und die Wirtschaftlichkeit des Gebäudes auswirkt.

Die Ergebnisse der Variante 2 mit einem teilweisen Verzicht auf Heizkörper in den Klassenräumen zeigen, dass eine Reduzierung der Heizkörper in den meisten Klassenzimmern zu keiner nennenswerten Laufzeiterhöhung der Lüftungsanlage führt, um den notwendigen Heizenergiebedarf bereitzustellen. In Variante 3 ist zu erkennen, dass selbst bei einem zusätzlichem Verzicht auf Radiatoren in den Vorbereitungsräumen und Eckklassenräumen die geforderte Soll-Raumlufttemperatur in der Regel erzielt wird. Bei einer intelligenten Steuerung der Lüftungsanlage kann der Endenergiemehrverbrauch gegenüber der Variante mit kompletter Beheizung über Heizkörper auf 10% beim Stromverbrauch und 13 % beim Heizenergieverbrauch beschränkt werden.

Die Behaglichkeitsbetrachtungen haben bestätigt, dass die Komfortkriterien für Schulneubauten (Kategorie II, DIN EN 15251:2012-12) während der Nutzungszeiten in allen betrachteten Varianten erfüllt werden.

Der Zeitraum im Jahr, an dem zur Versorgung der Räume mit Frischluft zusätzlich Wärme über die Zuluft eingebracht werden muss, beschränkt sich im Wesentlichen auf die Monate Januar und Februar. Eine morgendliche ein- bis (selten) zweistündige Aufheizphase über die Nacherwärmung der Zuluft ist abgesehen von wenigen Ausnahmetagen ausreichend.

Dies führt dazu, dass in der Gesamtkostenbetrachtung die Variante 3 mit der weitgehendsten Heizkörperreduzierung sich als die wirtschaftlichste darstellt.

In Hinsicht auf die Nachhaltigkeit ist Variante 2 mit geringerem Endenergiebedarf gegenüber Variante 3 überzeugend. Die Vertretbarkeit der Installation von Heizkörpern in Räumen mit geringer Nutzung ist in diesem Zusammenhang bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit gegenüber Variante 1 gegeben.

Alternativ können in diesen kritischen Räumen Elektroheizkörper installiert oder Nachheizregister in die Zuluft eingebaut werden, um kostenintensive Heizwärmeverteilungen zu vermeiden. Der Energieträger Strom ist aufgrund des höheren Primärenergiefaktors für die Nachhaltigkeitsbetrachtung jedoch schlechter zu bewerten.

Mit den untersuchten Varianten des Passivhaus-Berufsschulzentrums in Ansbach wird aufgezeigt, dass die Anlagentechnik bei Niedrigstenergiegebäuden, die hohe Belegungsdichten aufweisen, minimiert werden kann. Eine Reduzierung der Konvektoren im Bereich der Klassenzimmer bzw. der Verzicht auf Heizkörper in allen Klassenräumen erfolgt ohne Komfortverlust und erweist sich als wirtschaftlich.

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt AZ: 29725 gefördert.

1 Einleitung

Die Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden fordert in Artikel 9 die Gewährleistung der Mitgliedstaaten, dass bis zum 31. Dezember 2020 alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude sind. Die Definition hierzu lautet: „Der Ausdruck Niedrigstenergiegebäude bezeichnet ein Gebäude, das eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen... gedeckt werden.“ [1]

Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass dann nur noch Passiv- und Nullenergie-Neubauten umgesetzt werden dürfen. Notwendiger Bestandteil zum Erreichen des Passivhaus-Standards ist neben einer sehr guten Wärmedämmung der kompletten Gebäudehülle und anderen Energieeffizienzkriterien, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

Lüftungsanlagen sind mittlerweile häufig auch in Schulen notwendiger und gewünschter Standard, um die Gesundheit und Konzentrationsfähigkeit der Schüler- und LehrerInnen zu verbessern und um Bauschäden durch Feuchtigkeit abzuwenden. Zur Zeit ist es in Deutschland in Passivhaus-Schulen Stand der Technik, dass zwei mögliche Wärmeverteilungssysteme, sowohl Lüftungsanlage(n), als auch eine komplette Heizungsverteilung in Passivhaus-Schulen eingebaut werden. Dies verursacht zusätzliche Investitionskosten und verschlechtert die Wirtschaftlichkeit des Passivhaus-Standards gegenüber Schulen ohne Lüftungsanlagen.

Wird bei schlechter gedämmten Gebäuden auf ein herkömmliches Heizverteilungssystem verzichtet, benötigt die Wärmeverteilung über die Lüftung in der Regel ein vielfaches mehr an Hilfsenergie als die Wärmeverteilung über ein herkömmliches Heizwärmeverteilungssystem z. B. über Heizkörper. Aufgrund der höheren Energiekosten und weil der hohe Strombedarf aus Nachhaltigkeitsgründen nicht vertretbar ist, kommt es in der Regel zu der Entscheidung, dass kostenintensive Lüftungs- und Heizwärmeverteilungen parallel in Schulen eingebaut werden.

Um die Wirtschaftlichkeit des Passivhausstandards bei Neubauten und, unter Umständen, in Teilbereichen auch bei Sanierungen zu verbessern, soll untersucht werden, in welchen Bereichen die Heizwärmeverteilung über Heizkörper minimiert werden kann, ohne dass sich der Strombedarf im Bereich Lüftungsanlage deutlich erhöht.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Verhalten des Gebäudes und die Konsequenzen unterschiedlicher anlagentechnischer Konzepte in der Heizperiode.

Ziel der Untersuchung ist, den Nachweis zu erbringen, dass durch den Verzicht auf einen Großteil der Heizkörper im Passivhaus-Schulgebäude Investitionskosten eingespart werden können, ohne die Laufzeiten der Lüftungsanlage bedeutend zu erhöhen.

Durch diesen Nachweis wäre es möglich, Gebäude mit hohen Nutzerzahlen wie Schulen oder Kindergärten wirtschaftlicher im Passivhaus-Standard zu realisieren.

Die vergleichende Darstellung des Gebäudes erfolgt mit folgenden anlagentechnischen Szenarien:

1. mit einer Heizwärmeverteilung durch Heizkörper in allen Räumen,
2. einer reduzierten Heizwärmeverteilung im Bereich der Klassenzimmer
3. ohne Heizkörper im Bereich der Klassenzimmer und Vorbereitungsräume

Die Betrachtung erfolgt mittels einer dynamisch thermischen Simulation für ein Winterhalbjahr von Anfang November bis Ende April.

Anhand der Simulation wurde die Entscheidung des Bauherrn in den meisten Klassenräumen und Vorbereitungsräumen auf die Heizkörper zu verzichten bekräftigt. Für die Simulation wurden die Anlagentechnischen Kennwerte und Angaben zu den Kosten vom Ingenieurbüro für Anlagentechnik erstellt.

Während der Planungsphase wurden Detailoptimierungen und Wärmebrückenberechnungen durchgeführt sowie ein Regelungskonzept erstellt. Gewerkeweise Vorgaben mit den wichtigsten Daten für den Energieeffizienten Bau des Gebäudes wurden in Berichtsform übermittelt und die wesentlichen Ausschreibungsunterlagen kontrolliert.

Während der Bauphase wurden stichpunktartige Kontrollen zu den Zeiten durchgeführt die für den Energiestandard des Gebäudes und die Luftdichtheit wesentlich sind. Berichte an den Bauleiter zeigten Mängel auf oder Bestätigten die Korrektheit der Bauausführung. Fotografische Dokumentationen der Bauteilaufbauten und Ausführungsqualität wurden in Berichtsform übergeben.

Ein Blower Door Test wurde vor Ort koordiniert und die Einhaltung der Luftdichtheitsvorgaben aus dem Phpp konnte im Wesentlichen für das Gebäude bestätigt werden. Die Thermographie-Aufnahme finden im ersten Winter nach Inbetriebnahme statt. Der EnEV Nachweis wird dem Bauherrn übergeben.

Die Monitoringphase beginnt im Juni 2015, die Abstimmungsgespräche mit dem IB. für die GLT-Anlage und der zuständigen Fachfirma wurden auf Basis des Steuerungskonzepts erstellt. Die Monitoring-Kontrollen erfolgen vierteljährig und werden jeweils mit einem Vergleich des Energie-Verbrauchs zum Bedarf und Bericht mit Hinweisen zu notwendigen Änderungen unterlegt.

In Vorträgen und Veröffentlichungen werden die Ergebnisse dem Fach-Publikum vorgestellt.

Beschreibung Bauvorhaben: Das Staatliche Berufliche Schulzentrum Ansbach (BSZ Ansbach) in der Brauhausstraße 9b erhält einen Neubau (Bauteil D) in Passivhausbauweise zur Erweiterung der Unterrichtsräume. Entworfen wurde der Anbau vom Architekturbüro Dömges Architekten AG. Der neu entstehende L-förmige Gebäudeteil schließt als außen gedämmter Stahlbetonbau im Westen an das bestehende Schulgebäude an. Der Baukörper besteht aus Untergeschoss, Erdgeschoss, erstem sowie zweitem Obergeschoss. Über der obersten Geschossdecke schließt ein kalter natürlich belüfteter Dachraum an, der ein Satteldach mit 5° Neigung aufweist. Die Dämmung verläuft entlang der Außenwände, an der Decke der natürlich belüfteten Tiefgarage im Untergeschoss und über der obersten Geschossdecke. Sie bildet eine weitgehend geschlossene thermische Hülle mit Ausnahme von konstruktiv bedingten Wärmebrücken im Bereich der Tiefgaragenstützen sowie der über den eigentlichen Baukörper hinaus kragenden Tiefgaragendecke.

Im Erdgeschoss sind Küche und Cafeteria im Osten, sowie Klassenzimmer und Gymnastikraum im Westen untergebracht. Eine Durchfahrt von der Brauhausstraße ermöglicht die Zufahrt zum innenliegenden Pausenhof.

Im ersten Obergeschoss sind weitere Klassenzimmer, Lehrerzimmer und Sanitärräume untergebracht. Im zweiten Obergeschoss befinden sich neben den Sanitärräumen ausschließlich Klassenzimmer.

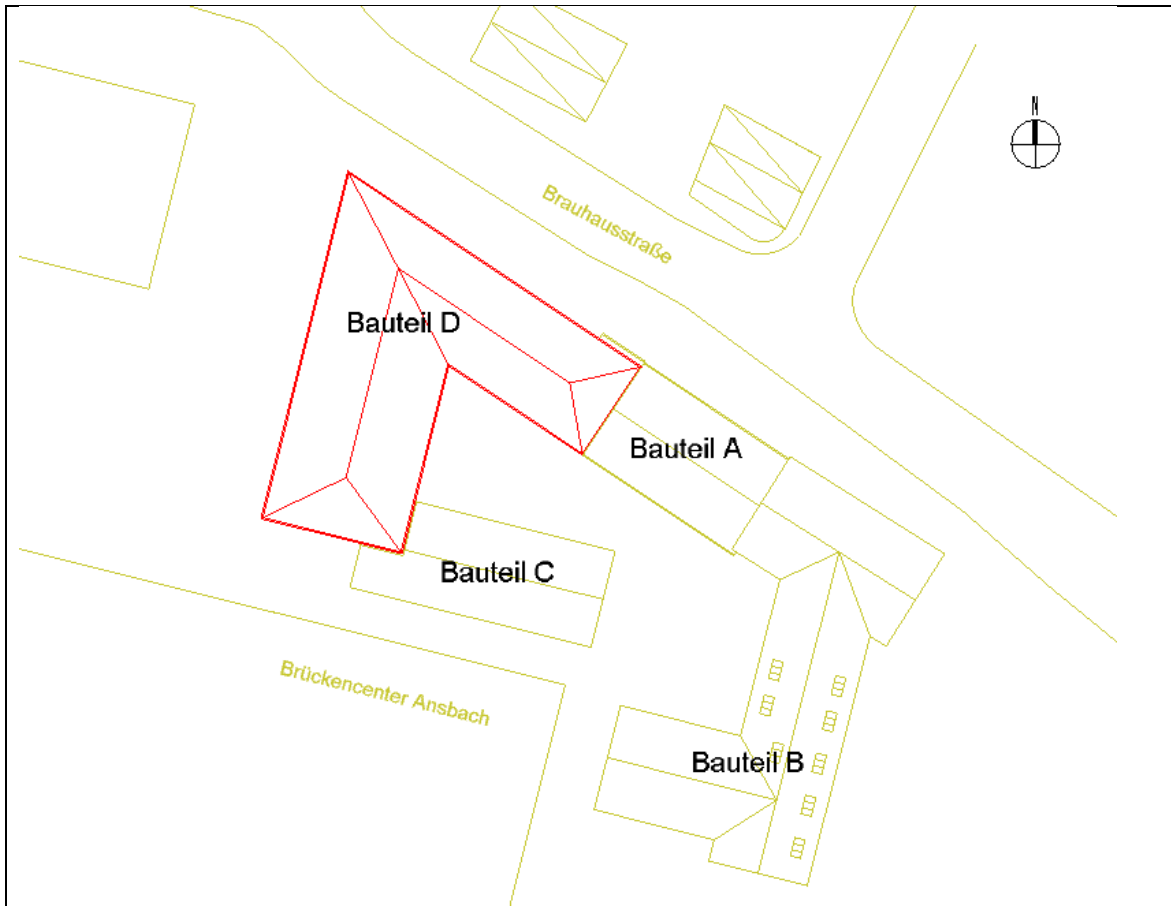


Abbildung 1: Übersichtsplan BSZ Ansbach mit hervorgehobenem Neubauteil D

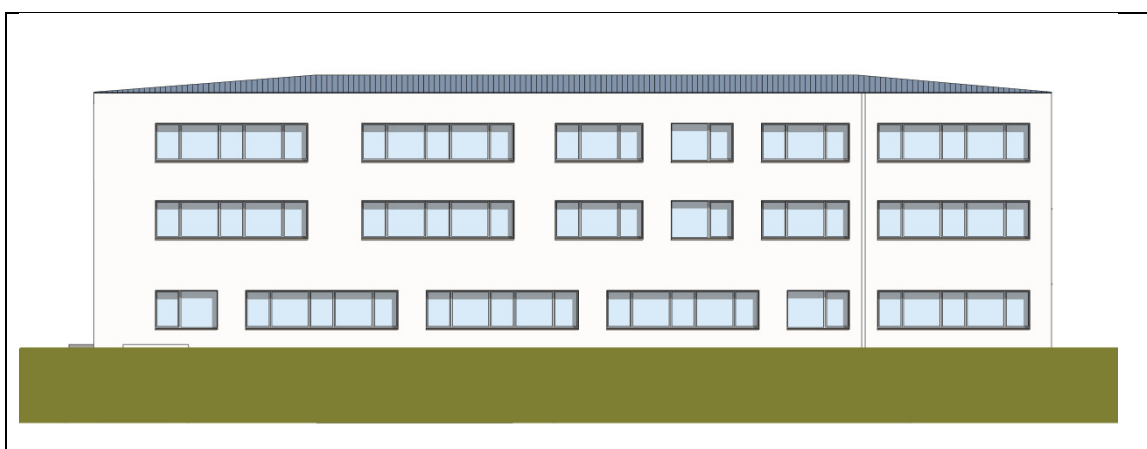


Abbildung 2: Ansicht West, Bauteil D

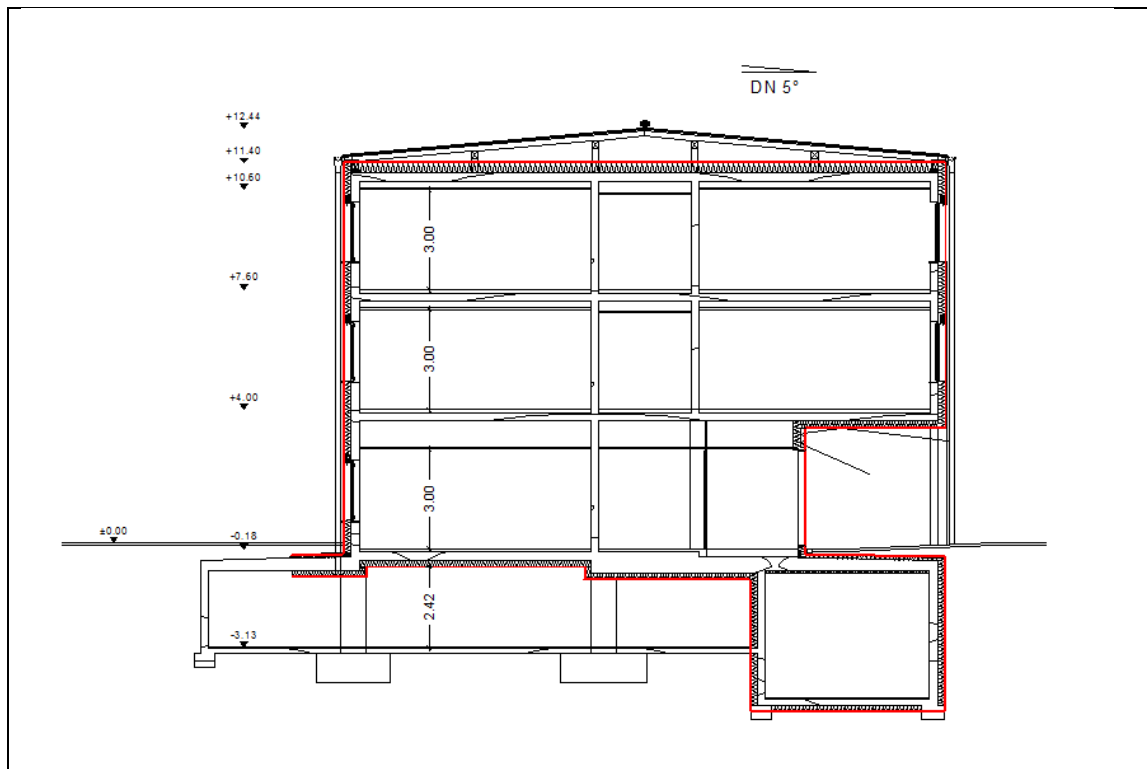


Abbildung 3: Schnitt Bauteil D mit hervorgehobener thermischer Hülle

Eine zentrale Lüftungsanlage mit 87% Wärmebereitstellungsgrad versorgt die Klassenzimmer mit Frischluft. Die Wärmerückgewinnung erfolgt über Rotationswärmetauscher mit Feuchterückgewinnung.

Das Gerät ist innerhalb der thermischen Hülle im Untergeschoss untergebracht.

Zur Steuerung der Lüftung werden CO₂- sowie Temperaturfühler in den Klassenzimmern installiert. Dadurch wird eine bedarfsgerechte Volumensteuerung der Lüftungsanlage ermöglicht. Über Nachheizregister, die mit dem wasserführenden Heizsystem gekoppelt sind kann die Zuluft nacherwärmt werden. Die Regelung der Nacherwärmung erfolgt fassadenweise. Die Lüftungsanlage ist im Winter in Betrieb und soll im Sommer überwiegend ausgeschaltet sein. Bei sehr hohen Temperaturen kann die Lüftungsanlage zur Unterstützung der nächtlichen Auskühlung des Gebäudes eingesetzt werden.

Die Sanitärräume als auch die Küche/Cafeteria erhalten jeweils separate Lüftungsgeräte. Die Wärmerückgewinnung der Küchenanlage wird als Kreislaufverbundsystem realisiert, während für die WC-Räume ein Plattenwärmetauscher vorgesehen ist, um die Übertragung von Gerüchen oder Verschmutzungen komplett auszuschließen.

Der Gasbrennwertkessel des gesamten Schulkomplexes mit einer Leistung von 310 kW deckt die Heizlast des Neubaus (ca. 28 KW) mit ab. Die Heizwärmeübergabe erfolgt über Röhrenradiatoren entsprechend der Variantenbetrachtung.

2 Simulationsgrundlagen BSZ Ansbach

2.1 Annahmen für die Heizperiode

Mit Hilfe der Simulation soll eine Aussage über die notwendige Anordnung von Heizkörpern in den Klassenzimmern gemacht werden und eine Abschätzung der notwendigen Lüftungsanlagen-Laufzeit erfolgen. Für die realistische Abbildung, insbesondere der Auswirkung der Weihnachtsferien, werden die Monate von November bis einschließlich April simuliert. Aufgrund der fassadenweisen Regelung zur Nacherwärmung der Zuluft der Lüftungsanlage und der baulich vorgegebenen Anordnung der Klassenzimmer bezieht sich die Simulation im Wesentlichen auf den westlichen Gebäudetrakt. Einzelne Klassenzimmer befinden sich im 2. Obergeschoss auf der nordöstlich bzw. östlich orientierten Gebäudeseite und im 1. Obergeschoss sind zwei Klassen gen Osten ausgerichtet.

2.1.1 Raum-/Zonenübersicht

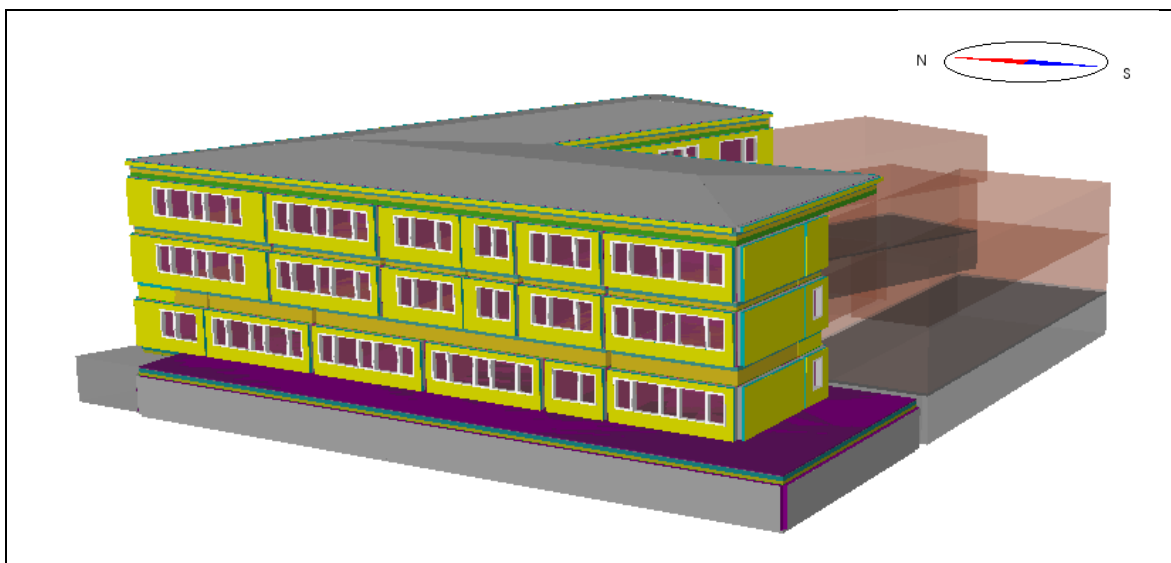


Abbildung 4: Gebäudemodell für thermische Simulation

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht der Räume die im Simulationsmodell abgebildet sind und innerhalb der thermischen Hülle liegen. Neben der Nettogrundfläche sind die Rohbauflächen der Fenster sowie die geplante Personenbelegung der einzelnen Räume aufgeführt. Die in Klammern geschriebene Personenanzahl ist die der Simulation für die Heizperiode zugrunde gelegte Anzahl, die eine Abwesenheit von ca. 20% berücksichtigt. Die Zonen im Erdgeschoss grenzen an die kalte Tiefgarage an und das zweite Obergeschoss an den hinterlüfteten kalten Dachraum.

Tabelle 1: Raum-/Zonenübersicht

Geschoss	Raum- nummer	Raum/Zonen- bezeichnung	Grund- fläche [m²]	Orien- tierung	Fenster- fläche [m²]	Belegung [Personen- anzahl]
EG	D-E-011	Vorbereitung 01	30,82	West	5,55	0
	D-E-010	Klassenzimmer 01	56,48	West	13,32	25 (20)
	D-E-009	Klassenzimmer 02	55,76	West	13,32	25 (20)
	D-E-008	Klassenzimmer 03	55,71	West	13,32	25 (20)
	D-E-007	Vorbereitung 02	26,90	West	5,55	0
	D-E-006	Klassenzimmer 04	56,19	West	13,32	25 (20)
	D-E-FL1	Flur EG	133,70	-	44,84	0
1. OG	D-1-013	Klassenzimmer 05	67,68	West	13,32	25 (20)
	D-1-012	Klassenzimmer 06	56,04	West	13,32	25 (20)
	D-1-011	Pflege und Betreuung	39,99	West	7,77	15 (10)
	D-1-010	Vorbereitung 03	24,56	West	4,44	0
	D-1-009	Pflege und Betreuung	38,07	West	7,77	15 (10)
	D-1-008	Klassenzimmer 07	56,39	West	13,32	25 (20)
	D-1-FL1	Flur 1.OG	255,90	-	25,86	0
	D-1-003/004	Klassenzimmer 08/09	98,48	Ost	22,20	2 x 25 (20)
2. OG	D-2-005	Klassenzimmer 10	67,68	West	13,32	25 (20)
	D-2-006	Klassenzimmer 11	56,04	West	13,32	25 (20)
	D-2-007	Pflege und Betreuung	39,99	West	7,77	15 (10)
	D-2-008	Vorbereitung 04	24,56	West	4,44	0
	D-2-009	Pflege und Betreuung	38,07	West	7,77	15 (10)
	D-2-010	Klassenzimmer 12	56,39	West	13,32	25 (20)
	D-2-FL1	Flur 2.OG	256,00	-	23,64	0
	D-2-014	Klassenzimmer 14	48,79	Ost	11,10	25 (20)
	D-2-015	Klassenzimmer 13	48,51	Ost	11,10	25 (20)
	D-2-002/003/004	Klassenzimmer 15/16/17	220,7	Nordost	35,52	3 x 25 (20)
Summe			1909,40		358,52	485 (380)

Die im Simulationsmodell berücksichtigten Räume sind in den folgenden Grundrissen farblich hervorgehoben dargestellt:



Abbildung 5: Grundriss EG



Abbildung 6: Grundriss 1. OG



Abbildung 7: Grundriss 2. OG

2.1.2 Bauteile

Die Aufbauten der Bauteile, internen Massen sowie Fenster und Sonnenschutz sind den folgende Tabellen zu entnehmen.

Tabelle 2: Bauteilübersicht

Bauteil	Aufbau (von innen nach außen)	Dicke [m]	Wärmeleit- fähigkeit [W/(mK)]	Dichte [kg/m³]	Kapazität [J/(kgK)]	U-Wert [W/(m²K)]
Oberste Geschoss- decke	Innenputz	0,015	0,700	1400	1000	0,11
	Stahlbeton	0,240	2,300	2300	1000	
	Dämmung	0,300	0,035	25	1450	
Decke EG abgehängt	Gipskartonplatte	0,0125	0,250	900	1000	0,40
	Lattung/Dämmung	0,040	0,044	56	1720	
	Luftschicht	0,780	4,780	1,2	1006	
	Stahlbeton	0,240	2,300	2300	1000	
	Trittschalldämmung	0,030	0,035	25	1450	
	Zement-Estrich	0,070	1,400	2000	1000	
Decke 1.OG abgehängt	Gipskartonplatte	0,0125	0,250	900	1000	0,40
	Lattung/Dämmung	0,040	0,044	56	1720	
	Luftschicht	0,200	1,220	1,2	1006	
	Stahlbeton	0,240	2,300	2300	1000	
	Trittschalldämmung	0,030	0,035	250	1000	
	Zement-Estrich	0,070	1,400	2000	1000	
Oberste Geschoss- decke ab- gehängt	Gipskartonplatte	0,0125	0,250	900	1000	0,10
	Lattung/Dämmung	0,040	0,044	56	1720	
	Luftschicht	0,200	1,220	1,2	1006	
	Stahlbeton	0,240	2,300	2300	1000	
	Dämmung	0,300	0,035	25	1450	
Außenwand	Innenputz	0,015	0,700	1400	1000	0,17
	Stahlbeton	0,240	2,300	2300	1000	
	Dämmung	0,200	0,035	125	1000	
	Außenputz	0,015	0,700	1900	1000	
Innenwand (Flur)	Innenputz	0,015	0,700	1400	1000	2,46
	Stahlbeton	0,240	2,300	2300	1000	
	Innenputz	0,015	0,700	1400	1000	
Trocken- bauwand (Klassen)	Gipskartonplatte	0,0125	0,250	900	1000	0,39
	Luftschicht	0,032	0,170	1,2	1006	
	Dämmung	0,060	0,035	250	1000	
	Luftschicht	0,032	0,170	1,2	1006	
	Gipskartonplatte	0,0125	0,250	900	1000	
Boden an Tiefgarage /Durchfahrt	Zement-Estrich	0,070	1,400	2000	1000	0,16
	Trittschalldämmung	0,030	0,035	250	1000	
	Stahlbeton	0,240	2,300	2300	1000	
	Dämmung	0,180	0,035	25	1450	
	Außenputz	0,010	0,700	1900	1000	

Tabelle 3: Interne Massen

Möbel	Fläche [m ²]	Konvektive Wärmeübertragung [W/(m ² K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Dichte [kg/m ³]	Wärmekapazität [J/(kgK)]
Klasse	30	6,0	0,13	1.000	1.300
Pflege	20	6,0	0,13	1.000	1.300
Vorbereitung	10	6,0	0,13	1.000	1.300

Tabelle 4: Fenster

	U _g -Wert [W/m ² K]	g-Wert	τ _e	τ _v	U _f -Wert [W/m ² K]	Rahmenanteil [%]
Fenster	0,6	0,5	0,42	0,72	0,8	30
Festverglasung	0,6	0,5	0,42	0,72	0,8	15

τ_e Strahlungstransmissionsgrad

τ_v Lichttransmissionsgrad

2.1.3 Anlagentechnik

Bei der volumenstromgeregelten Zu- und Abluftanlage ist ein maximaler Volumenstrom mit $30\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Person})$ angesetzt. Die damit erzielten Luftwechselraten betragen je nach Klassenraum 2,6 bis $3,6\text{ h}^{-1}$. Die Regelung ist sowohl temperatur- als auch CO_2 -abhängig gesteuert

Die Nacherwärmung der Zuluft übernimmt die wassergeführte Heizungsanlage.

Als maximale Heizleistung für das Bauteil D sind 40 kW hinterlegt mit einem Nutzungsgrad von 0,9.

Tabelle 5: Gebäudetechnik

	Wärmebereitstellungsgrad [%]	Wirkungsgrad Nacherhitzer [%]	Wirkungsgrad Ventilator [%]	Spezifische Ventilatorleistung [kW/(m ³ /s)]	Temperaturanstieg [°C]
Lüftungsanlage	87	95	60	1,31	1

	Max. Volumenstrom [m ³ /(h*Person)]	Regelung			
Lüftungsanlage	30	Temperatur und CO ₂			

	Max. Leistung [W]	Höhe [m]	Vorlauftemperatur [°C]	Rücklauftemperatur [°C]	Regler
Heizkörper	1500 bzw. 1000 (Vorbereitung)	2,2	55	45	proportional

	Max. Heizleistung [kW]	Nutzungsgrad [%]	Wirkungsgrad Pumpe [%]	Nominaler Druckkopf [Pa]	Pumpenleistung [W]
Heizkessel	40	90	50	80.000	165

2.1.4 Regelungswerte

In Anlehnung an die Empfehlungen der DIN EN 15251(2007-08) für den Neubau von Schulen (Kategorie II) soll die minimale Raumtemperatur zu Unterrichtsbeginn 20 °C betragen. Außerhalb der Nutzungszeiten ist mit dem Nutzer eine Absenkttemperatur von 16 °C vereinbart. Der Grenzwert für die maximale Temperatur liegt bei 26 °C.

Um konzentriertes Arbeiten im Klassenraum zu gewährleisten wird ein maximaler CO_2 -Gehalt der Raumluft von 1.000 ppm angestrebt. Dieser steht in Abhängigkeit zu den tatsächlichen Luftwechselraten, die wiederum durch die Volumenstromauslegungen bestimmt werden [2].

Die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz ist für Klassenräume entsprechend DIN EN 12464-1(2011-08) mit 300 bis 500 Lux ausgelegt und bei den Fluren mit 100 bis 200 Lux berücksichtigt [3].

Die individuellen Regelungskonzepte für die Lüftungsanlage werden jeweils unter den anlagentechnischen Varianten beschrieben.

Tabelle 6: Übersicht Regelungswerte

	Min.	Max.	Einheit
Temperatur	20 (16)	26	[°C]
rel. Luftfeuchtigkeit	20	80	[%]
CO₂-Gehalt	700	1000	[ppm]
Beleuchtungsstärke Klassenzimmer	300	500	[Lux]
Beleuchtungsstärke Flur	100	200	[Lux]

2.1.5 Nutzung

Die Unterrichtszeiten in der Berufsschule sind von Montag bis Donnerstag von 8:00 bis 16:30 Uhr sowie am Freitag von 8:00 bis 12:45 Uhr. Montag bis Donnerstag sind zwei Pausen am Tag vorgesehen. Diese sind von 10:15 bis 10:35 Uhr sowie von 12:45 bis 13:30 Uhr.

Um das Verhalten ungenutzter Unterrichtsräume abzubilden, ist für das Klassenzimmer 11 (D-2-006) im 2. Obergeschoss keine Belegung während der kältesten Woche im Jahr (letzte Januarwoche) vorgesehen. Um den Raum spontan für Unterrichtszwecke nutzen zu können, wird geprüft, ob eine Raumtemperatur von ca. 19 °C gewährleistet werden kann.

Tabelle 7: Übersicht Nutzungszeiten

Montag bis Donnerstag [h]	Pausen ohne Belegung [h]	Freitag [h]	Pause ohne Belegung [h]	Wochenende
7:45 – 16:30	10:15 – 10:35 12:45 – 13:30	7:45 – 12:45	10:15 – 10:35	Keine Belegung

Weihnachtsferien ohne Belegung	Winterferien ohne Belegung	Osterferien ohne Belegung		Klasse D-2-006 ohne Belegung
24.12.2012 bis 06.01.2013	11.02.2013 bis 15.02.2013	25.03.2013 bis 07.04.2013		28.01.2013 bis 01.02.2013

2.1.6 Interne Wärmegewinne

Interne Wärmegewinne werden auf Basis der anwesenden Personen, der Beleuchtungsdauer und -stärke sowie auf Basis der Laufzeiten, der vorhandenen Geräte angesetzt.

Tabelle 8: Interne Wärmegewinne

	Aktivitätsgrad [met]	Wärmestromdichte [W/m ²]	Kleidung [clo]
Personen	1,2	70	0,85 ± 0,25

	Klasse [W/m ²]	Vorbereitung [W/m ²]	Flur [W/m ²]
Beleuchtungsleistung	10	8,5	4,6

	Anzahl pro Raum mit Belegung	Abgegebene Wärme [W]	
Geräte	1	450	

2.1.7 Klima

Ansbach liegt in der Testreferenz-Zone 13 im Schwäbisch-fränkische Stufenland weshalb dieser Datensatz bei der Simulation hinterlegt ist. Das BSZ Ansbach liegt auf einer Höhe von 408 m und die Einwohnerzahl Ansbachs beträgt ca. 40.000. Die Aufprägung der Höhe und Einwohnerzahl führt zu keinem nennenswerten Temperaturanstieg.

2.1.8 Infiltration/Luftdichtheit

In Anlehnung an den Entwurf der DIN 4108-2, der für Nichtwohngebäude eine Infiltrationsrate von 0,24 h⁻¹ vorsieht, ist dieser Wert in der Berechnung berücksichtigt worden.

2.1.9 Wärmebrücken

Das BSZ Ansbach ist weitgehend wärmebrückenfrei realisiert worden. Erhöhte Wärmebrücken treten allerdings im Anschluss zur Tiefgarage auf und sind mit einem Wärmebrückenverlustkoeffizient (Psi-Wert) von 0,154 W/(mK) in der Berechnung berücksichtigt. Zur Minimierung der Wärmebrücken im Fensteranschlussbereich werden die Fenster in der Dämmebene montiert und sitzen zur Abtragung der vertikalen Eigenlasten bis zu 50 mm auf der Außenwand auf.

Tabelle 9: Wärmebrücken

	Fenstereinbau	Dach an Außenwand	Tiefgarage an Außenwand
Psi-Wert [W/(mK)]	0,02	0,01	0,15

2.2 Variantenbeschreibung für Heizperiode

Um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der geplanten Heizkörperreduzierung zu machen, werden drei Varianten untersucht.

Variante 1 stellt die bisher gängige Praxis dar, parallel zur Lüftungsanlage mit WRG eine komplette Heizsystemverteilung mit Heizkörpern in jedem Klassenraum zu installieren.

Die Variante 2 weist eine reduzierte Installation von Radiatoren auf. Abgesehen von den Eckklassenzimmern wird in den Klassenräumen auf Heizkörper verzichtet.

In Variante 3 werden nur noch die Flure über Konvektoren mit Wärme versorgt. Alle Klassen- und Vorbereitungsräume sind nicht mit Heizkörpern versehen.

2.2.1 Variante 1: Heizkörper in jedem Raum

Die benötigte Wärmemenge zur Einhaltung der vorgeschriebenen minimalen Raumtemperatur von 20 °C zu Nutzungszeiten wird über die Wärmeverteilung mittels Heizkörper bereitgestellt. Die mechanische Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung dient in dieser Variante in erster Linie zur Frischluftversorgung und somit zur Einhaltung des CO₂-Grenzwertes der Raumluft.

30 Minuten vor Unterrichtsbeginn läuft die Lüftungsanlage mit einem 3-fachen Luftwechsel und einer Zulufttemperatur von 20 °C an, um die Raumluft zu erneuern und evtl. Feuchte im Außenluftfilter zu trocknen.

Tabelle 10: Variante 1 - Lüftungsanlagenregelung

	Lüftungsanlagen- laufzeit [h]	Zuluft-temperatur Nov. – Feb.	Zuluft-temperatur März – April
Montag - Donnerstag	7:30 – 17:00	20 °C (30 min), sonst 18 °C	18 °C
Freitag	7:30 – 13:30	20 °C (30 min), sonst 18 °C	18 °C
1. Tag nach Weihnachts- und Winterferien (Mo 07.01. und 18.02.) sowie 1. Tag nach kältester Woche im Jahr (04. 02.)	7:30 – 17:00	21 °C (bis 10:15), sonst 18 °C	-
Ferien und Wochenende	-	-	-

2.2.2 Variante 2: Reduzierte Heizkörperanordnung

In Variante 2 ist in den Klassenzimmern außer bei den Eckklassenräumen auf die Heizkörper verzichtet worden. Vorbereitungsräume und Flure sind entsprechend der Variante 1 mit Konvektoren bestückt.

Die im Anschluss abgebildeten Grundrisse der drei Geschosse veranschaulichen die beschriebene Situation.

Die Lüftungsanlage trägt über die Zuluft-Nacherwärmung einen Teil zur Heizwärmeversorgung bei, so dass der Zeitpunkt für die Absenkttemperatur in dieser Variante in den Klassenzimmern erst eine Stunde vor Unterrichtsbeginn endet. Die Regelung für die Flure und Vorbereitungsräume bleibt davon unberührt und entspricht den Vorgaben aus der Bezugsvariante. Während der Ferienzeiten ist die Lüftungsanlage ausgeschaltet.

Tabelle 11: Variante 2 - Lüftungsanlagenregelung

	Lüftungsanlagenlaufzeit [h]	Zulufttemperatur Nov. – Dez.	Zulufttemperatur Jan. – Feb.	Zulufttemperatur März – April
Montag - Donnerstag	6:45 – 17:00	1. h 25 °C, sonst 18 °C	1. h 35 °C, sonst 18 °C	18 °C
Freitag	6:45 – 13:30	1. h 25 °C, sonst 18 °C	1. h 35 °C, sonst 18 °C	18 °C

	Laufzeit [h]	Zulufttemperatur [°C]		
1. Tag nach Weihnachtsferien (Mo 07.01.)	4:45 – 17:00	35 °C (3:45 - 7:45)	25 °C (7:45 - 10:35)	21 °C (10:35- 13:30) sonst 18 °C
1. Tag nach kältester Woche im Jahr (04. 02.) und 1. Tag nach Winterferien (Mo 18.02.)	5:45 – 17:00	35 °C (5:45 - 7:45)	22 °C (7:45 - 10:35)	sonst 18 °C
Ferien und Wochenende	-	-	-	-

Eine gesonderte Regelung der Lüftungsanlage erfolgt in der kältesten Woche im Jahr bei Betrachtung des Raumes D-2-006, wenn dieser ohne Belegung auf 19 °C Raumlufttemperatur gehalten werden soll.

Tabelle 12: Variante 2 – Regelungskonzept in der kältesten Woche bei nichtbelegter Klasse

	Montag bis Freitag [h]	Montag bis Freitag [h]	Montag bis Donnerstag [h]
Raum D-2-006 1 Woche ohne Belegung (28.01. – 01.02.)	6:45 – 7:45 (35 °C Zuluft)	10:15 – 10:35 (35 °C Zuluft)	12:45 – 13:00 (35 °C Zuluft)
Andere Räume (28.01. – 01.02.)	6:45 – 7:45 (35 °C Zuluft)	-	-

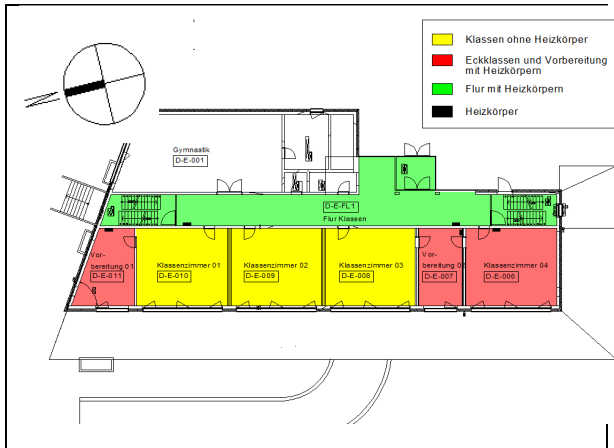


Abbildung 8: Grundriss EG mit Zonierung (Variante 2)

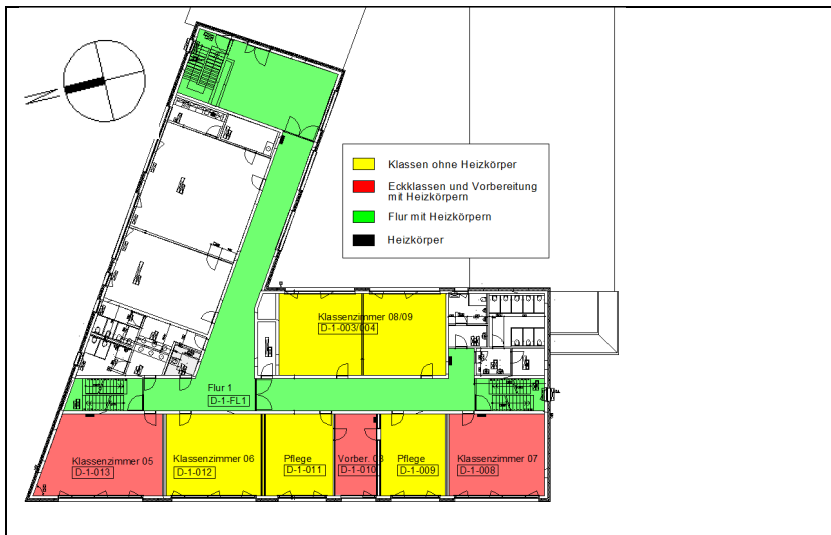


Abbildung 9: Grundriss 1.OG mit Zonierung (Variante 2)

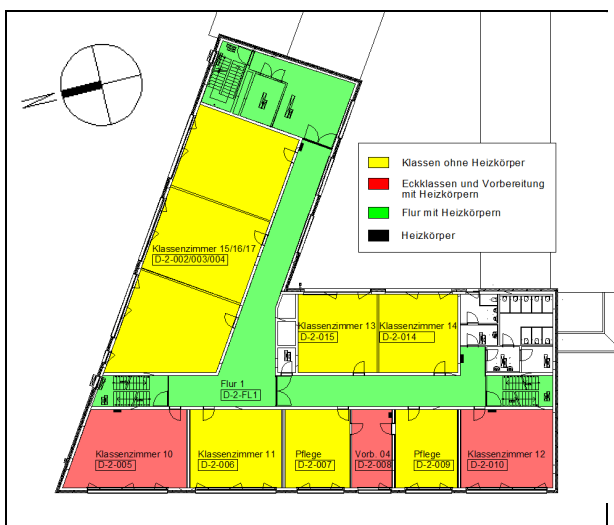


Abbildung 10: Grundriss 2.OG mit Zonierung (Variante 2)

2.2.3 Variante 3: Keine Heizkörper in Klassenzimmern und Vorbereitungsräumen

In dieser Variante weisen nur noch die Flure auf, so dass neben der eigentlichen Heizkörpereinsparung auch ein Großteil der Verteilleitungen entfällt. Zu untersuchen ist, in wie weit alle Räume ohne Konvektoren ausreichend über die Lüftungsanlage mit Wärme versorgt werden können.

Ausschlaggebend, ob diese minimierte Anlagentechnik sich in der Praxis bewährt, sind die Räume ohne oder mit nur geringer Nutzeranzahl und damit ohne nennenswerte interne Wärmeeinträge.

Im Regelbetrieb werden die Vorlaufzeiten der Lüftungsanlage um 45 Minuten erhöht.

Tabelle 13: Variante 3 - Heizkörperregelung in den Fluren

	Radiatoren im Regelbetrieb (20 °C) [h]	Radiatoren im Absenkbetrieb (16 °C) [h]
Montag - Donnerstag	6:00 – 16:30	16:30 – 6:00 (Folgetag)
Freitag	6:00 – 13:30	13:30 – 6:00 (Folgetag)

Tabelle 14: Variante 3 - Lüftungsanlagenregelung

	Lüftungsanlagenlaufzeit [h]	Zulufttemperatur Nov. – Dez.	Zulufttemperatur Jan. – Feb.	Zulufttemperatur März – April
Montag - Donnerstag	6:00 – 17:00	1. h 25 °C, sonst 20 °C	1. h 35 °C, sonst 20 °C	18 °C
Freitag	6:00 – 13:30	1. h 25 °C, sonst 20 °C	1. h 35 °C, sonst 20 °C	18 °C

	Lüftungsanlagenlaufzeit [h]	Zulufttemperatur [°C]		
1. Tag nach Weihnachtsferien (Mo 07.01.)	0:00 – 17:00	35 °C (0:00 - 7:45)	25 °C (7:45 - 10:35) (12:45 - 13:30)	sonst 20 °C
1. Woche nach Weihnachtsferien (08.01. – 11.01.)	4:45 – 17:00	35 °C (4:45 - 7:45),		sonst 20 °C
1. Tag nach Winterferien (18. 02.) sowie nach Wochenende in der kältesten Woche (04. 02.)	4:45 – 17:00	35 °C (4:45 - 7:45)		sonst 20 °C
Ferien und Wochenende	-	-	-	-

3 Grundlagen Wirtschaftlichkeitsberechnung

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die drei Varianten der Heizperiodenbetrachtung bezüglich Strom- und Heizenergiebedarf gegenübergestellt.

Als Investitionskosten sind der Berechnung ausschließlich die Kosten für die Heizflächen zugrunde gelegt.

Die Kostenberechnung der Varianten wurden vom Ingenieurbüro iPG GmbH Herzner und Schröder zusammengestellt (Stand: 19.12.2012).

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt mit der Software „Energiekostenberater 3.0“ mittels Liquiditätsmethode. Es wird der absolute Kostenverlauf unter Berücksichtigung von Zinsen (Finanzierung und Tilgung) und Energiekosten ermittelt.

3.1 Annahmen

Tabelle 15: Parameter Wirtschaftlichkeitsberechnung

	Variante 1 mit HK	Variante 2 HK red.	Variante 3 ohne HK
Investitionskosten	58.400,00 €	38.850,00 €	23.585,00 €
Betrachtungszeitraum	20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre
Fremdfinanzierung	100 %	100 %	100 %
Tilgungzinssatz	5,0 %	5,0 %	5,0 %
Zinssatz Darlehen	3,75 %	3,75 %	3,75 %

Die Energiepreise für Strom (18,70 Cent/kWh) und Erdgas (6,40 Cent/kWh) wurden von der Stadt Ansbach übermittelt. Ein Vergleich mit den Preisentwicklungen der letzten 5 des Statistischen Bundesamtes (Stand Nov. 2012) zeigt, dass der Erdgaspreis 2012 für Haushalte (6,40 Cent/kWh) mit der Vorgabe der Stadt Ansbach übereinstimmt. Beim Strompreis der Stadt Ansbach handelt es sich hingegen um einen Sondertarif, der ein Mittel aus dem Strompreis für Haushalte und Industrie darstellt.

Die Preissteigerungsraten sind für alle Varianten zum einen mit einer moderaten Steigerung von jährlich 4 % sowohl für Strom als auch Erdgas angenommen. Zum anderen ist eine dynamische Preissteigerung von 6 % für Strom bzw. 8 % für Erdgas berücksichtigt worden.

Die folgende Tabelle und die Grafiken veranschaulichen die Energiepreise und ihre Entwicklung.

Tabelle 16: Energiepreisannahmen und Preissteigerungen

	Bruttopreis [Cent/kWh]	moderate Preissteigerung [%]	dynamische Preissteigerung [%]
Strom	18,70	4,0	6,0
Erdgas	6,40	4,0	8,0

4 Simulationsergebnisse

4.1 Heizperiode

Zur Darstellung der Ergebnisse werden exemplarisch die Räume an der Westfassade im 2. Obergeschoss herangezogen. Für Variante 1 mit Heizkörperanordnung in jedem Raum ist insbesondere der nördliche Eckklassenraum (D-2-005) aufgrund der größeren Außenwandfläche hervorzuheben.

In Variante 2 mit reduzierter Heizkörperanordnung in den Klassenräumen ist das nördliche Klassenzimmer (D-2-006) ohne Heizkörper von Bedeutung.

In Variante 3 ohne Heizkörper sowohl in den Klassen- als auch Vorbereitungsräumen ist der Raum D-2-008 als Vorbereitungsraum ohne kontinuierliche Belegung ausschlaggebend für das Regelungskonzept der Lüftungsanlage.

Die folgende Abbildung stellt die betrachteten Räume grafisch dar.

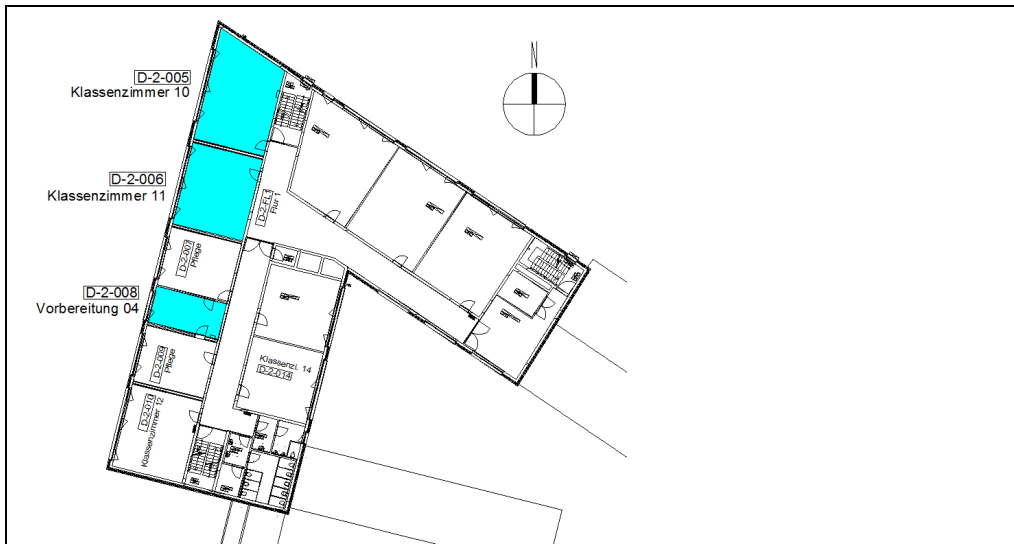


Abbildung 11: Grundriss 2. OG mit hervorgehobenen Räumen der Ergebnisdarstellung

Analysiert werden folgende Szenarien:

11.1.1 Variante 1: Heizkörperanordnung in jedem Raum

- ➔ Raum D-2-005 (Eckklassenzimmer 10)
 - Temperaturverlauf während der gesamten Simulationszeit
 - Letzte Woche der Weihnachtsferien (Nicht-Nutzungszeit) mit Aufheizphase:
 - Raum- und Bauteiloberflächentemperaturen
 - Erster Tag nach Weihnachtsferien:
 - Raumtemperaturen
 - Wärmebilanz
 - Bauteiloberflächentemperaturen (Anlage 2)
 - Bauteil-Auf-/Entladung (Anlage 3)
 - Raumluftqualität und Komfortindex (Anlage 5 + 6)

11.1.2 Variante 2: reduzierte Heizkörperanordnung in Klassenzimmern

- ➔ Raum D-2-006 (Klassenzimmer 11)
 - Temperaturverlauf während der gesamten Simulationszeit
 - Temperaturen bei Regelbetrieb der Lüftungsanlage (Mitte Januar)
 - Erster Tag nach Weihnachtsferien:
 - Raumtemperaturen
 - Wärmebilanz
 - Bauteiloberflächentemperaturen (Anlage 11)
 - Bauteil-Auf-/Entladung (Anlage 12)
 - Raumluftqualität und Komfortindex (Anlage 14+15)
 - Regelbetrieb 16. Jan. (Klasse ohne Belegung)
 - Raumtemperaturen
 - Wärmebilanz
 - Bauteiloberflächentemperaturen (Anlage 8)
 - Kältester Tag im Jahr (Klasse ohne Belegung)
 - Raumtemperaturen

11.1.3 Variante 3: Keine Heizkörper in Klassen- und Vorbereitungsräumen

- ➔ Raum D-2-005 (Eck-Klassenzimmer 10)
 - Erster Tag nach Weihnachtsferien:
 - Raumtemperaturen
 - Wärmebilanz (Anlage 21)
 - Raumluftqualität und Komfortindex (Anlage 22+23)
- ➔ Raum D-E-011 (Vorbereitung 01)
 - Erste Woche nach Weihnachtsferien:
 - Raumtemperaturen
 -

Die Ergebnisse werden anhand von Grafiken dargestellt und erläutert. Die zugehörigen Tabellenwerte sind im Anhang aufgeführt. Aufgeführt Punkte, bei denen die Anlagennummern aufgeführt sind werden nur im Anhang tabellarisch dokumentiert.

4.1.1 Variante 1: Heizkörperanordnung in jedem Raum

Die Raumlufttemperaturen liegen über dem Behaglichkeitskriterium von 20 °C. Über die Radiatoren wird auch in den Nichtnutzungszeiten die minimale Raumlufttemperatur mit 16,6 °C gehalten die hinterlegte Absenkttemperatur von 16°C nicht unterschreitet. Die tatsächliche Heizperiode beschränkt sich weitestgehend auf die Monate Januar und Februar.

Im Folgenden werden die Aufheizphase zu Ende der Weihnachtsferien und der erste Tag nach den Ferien als kritischster Tag für diese Variante genauer betrachtet.

Die folgende Tabelle fasst die relevanten Simulationsergebnisse für das Klassenzimmer 10 (D-2-005) zusammen:

Tabelle 17: Zonenzusammenfassung D-2-005 (Klasse 10 mit HK)

Zonenzusammenfassung: D-2-005 (Klasse 10 mit HK)			
min. Temperatur [°C]	max. Temperatur [°C]	min. operative Temperatur [°C]	max. operative Temperatur [°C]
16,6	25,7	16,5	25,6
max. Wärmezufuhr über Konvektoren [W/m2]	max. Zuluftvolumenstrom [l/(s.m2)]	max. CO ₂ -Gehalt [ppm(Vol)]	max. PPD [%]
19,4	2,47	1110	9,4
[W]	[m ³ /h]	max. Luftwechselrate	
1.312	600	n = 3,0	

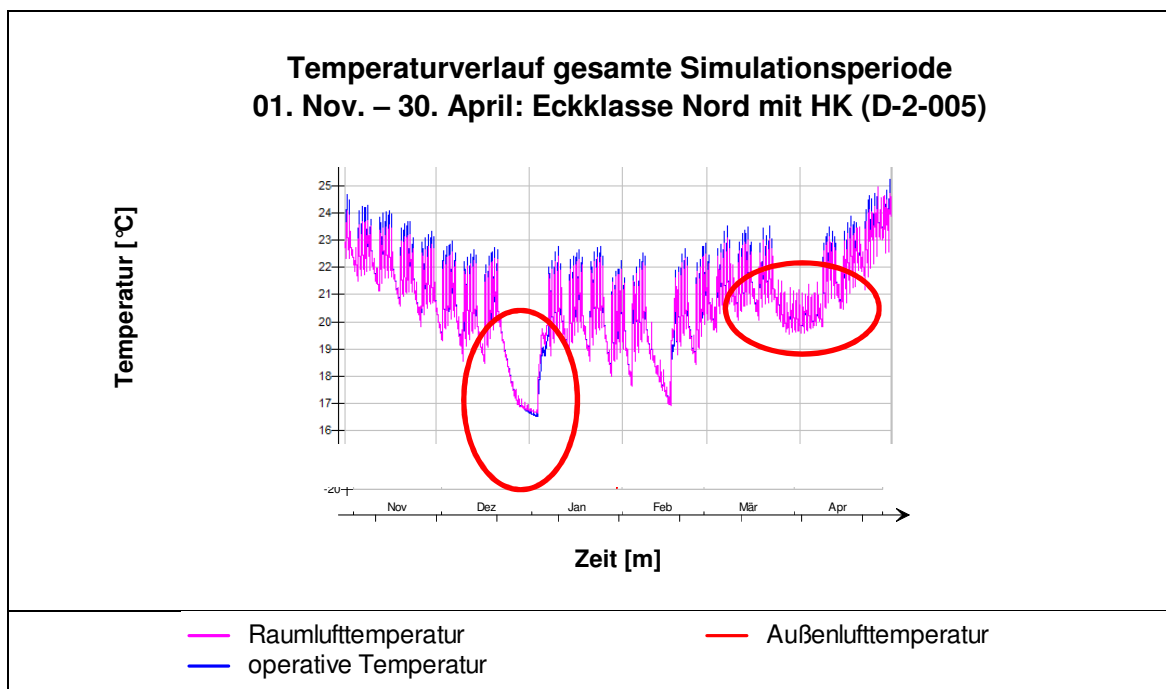


Abbildung 12: Variante 1 - Temperaturverlauf Nov. bis April, Raum D-2-005

Um die Raum- und Bauteiloberflächen-Temperaturen in dem Eckklassenzimmer (D-2-005) zu erhöhen, beginnt die Aufheizphase drei Tage vor dem ersten Schultag nach den Ferien.

Die Raumlufthtemperatur erreicht nach drei Tagen die vorgegebenen von 20°C.

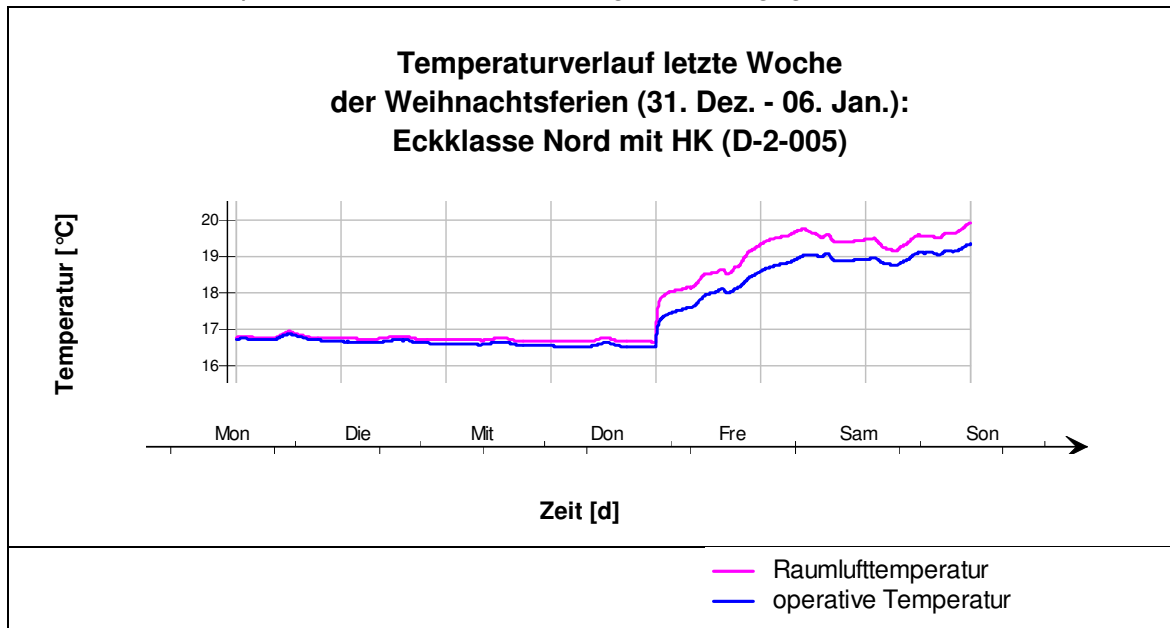


Abbildung 13: Variante 1 - Temperaturverlauf 31. Dez. - 06. Jan., Raum D-2-005

Zu Unterrichtsbeginn am ersten Schultag nach den Ferien hat die Raumlufthtemperatur im Eckklassenraum (D-2-005) 20 °C erreicht. Mit Eintreffen der SchülerInnen steigt die operative Temperatur innerhalb einer viertel Stunde von 19,5 °C auf 21 °C an. In den Pausen sinken die operativen Temperaturen nicht unter 20 °C.

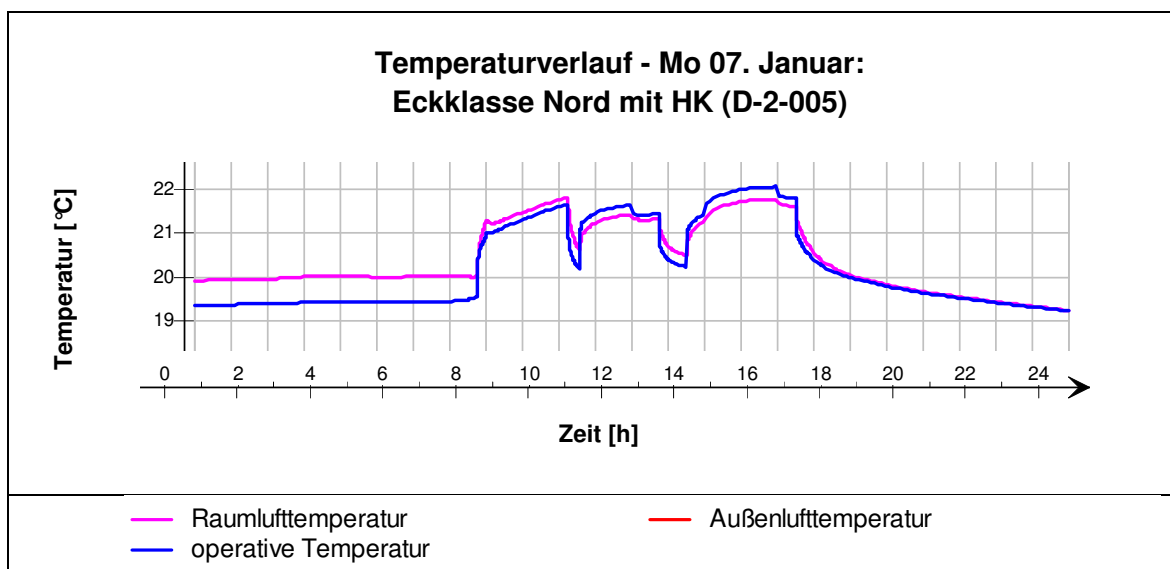


Abbildung 14: Variante 1 - Temperaturverlauf 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-005

Aus der Wärmebilanz am ersten Schultag nach den Ferien ist abzulesen, dass die anwesenden SchülerInnen für sehr hohe Wärmeeinträge sorgen. Die angenommenen 20 Personen geben mit einer Wärmestromdichte von 1,2 met (70 W/m²) und einer Fläche von ca. 1,8 m²/Person insgesamt eine Wärmemenge von etwa 2500 W ab.

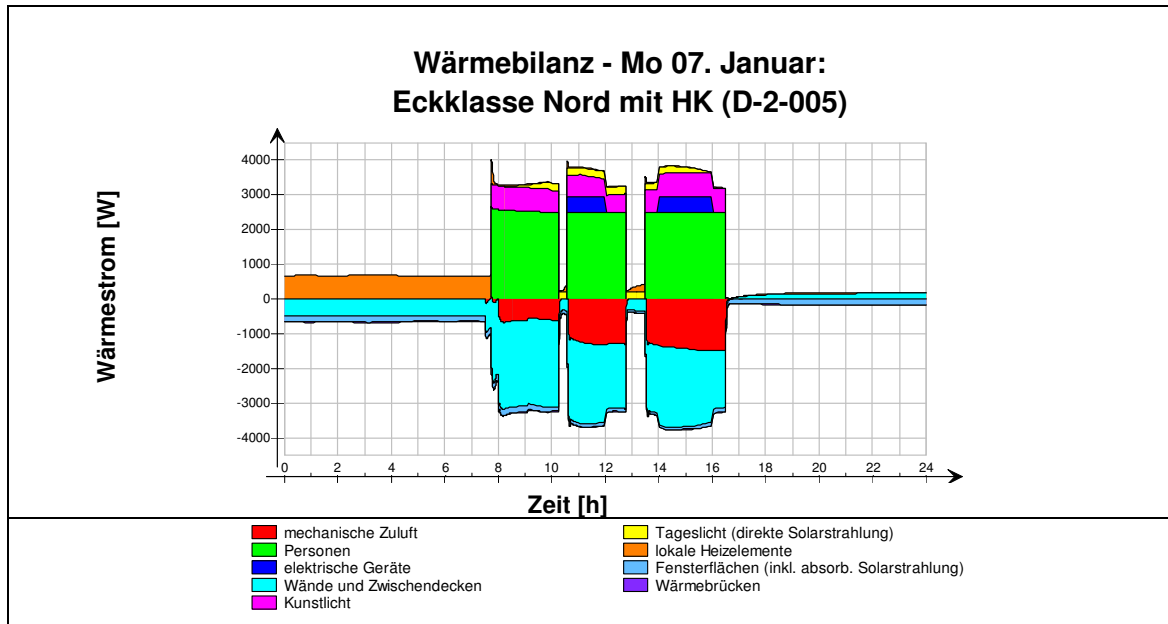


Abbildung 15: Variante 1 - Wärmebilanz 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-005

4.1.2 Variante 2: Reduzierte Heizkörperanordnung in Klassenzimmern

Welche Vorlaufzeiten der Lüftungsanlage benötigt werden, um eine Raumlufttemperatur von 20 °C zu Unterrichtsbeginn in einem Klassenzimmer ohne Heizkörper sicherzustellen wird untersucht.

Des Weiteren wird in dieser Variante überprüft, ob die Raumtemperaturen in dem Klassenzimmer bei Nichtbelegung während der kältesten Woche im Jahr auf 19 °C gehalten werden können, um eine spontane Nutzung jederzeit zu garantieren.

Die Variante 2 zeigt einen ähnlichen Temperaturverlauf auf wie der in Variante 1 dargestellte. Minimal sinkt die Temperatur während der Weihnachtsferien auf 15,4 °C.

Die folgende Tabelle fasst die relevanten Simulationsergebnisse für das Klassenzimmer 11 (D-2-006) zusammen:

Tabelle 18: Zonenzusammenfassung D-2-006 (Klasse 11 ohne HK)

Zonenzusammenfassung: D-2-006 (Klasse 11 ohne HK)			
min. Temperatur [°C]	max. Temperatur [°C]	min. operative Temperatur [°C]	max. operative Temperatur [°C]
15,4	26,4	15,44	26,26

max. Wärmezufuhr über Nacherwärmung [W/m ²]	max. Zuluftvolumenstrom [l/(s.m ²)]	max. CO ₂ -Gehalt [ppm(Vol)]	max. PPD [%]
56,3	2,98	1113	10,6
[W]	[m ³ /h]	max. Luftwechselrate	
3.157	600	n = 3,5	

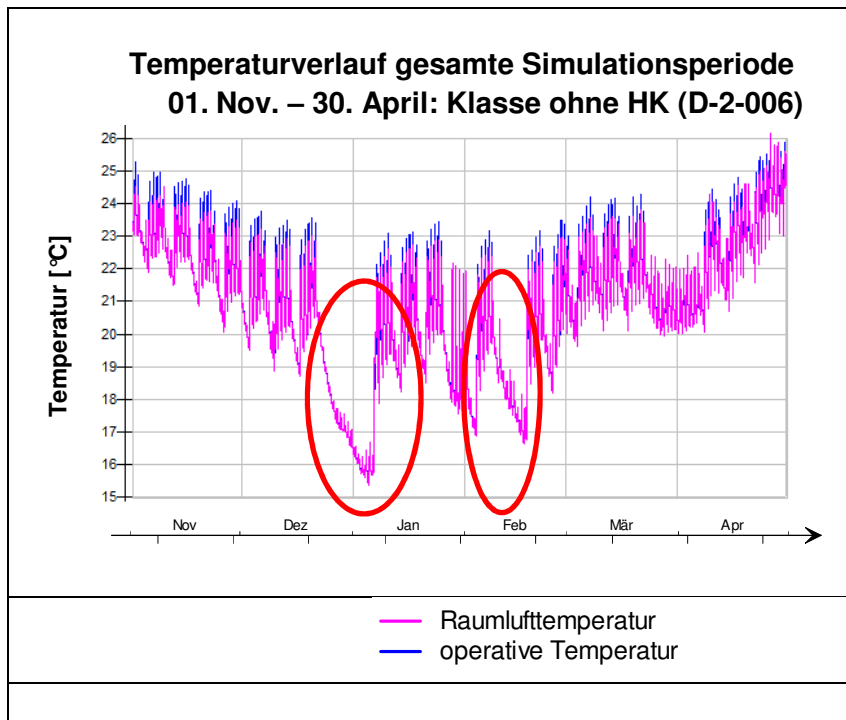


Abbildung 16: Variante 2 - Temperaturverlauf Nov. bis April, Raum D-2-006

Die Simulation ergibt für das Klassenzimmer 10 ohne Heizkörper (Raum D-2-006), dass in der Regel eine Vorlaufzeit von einer Stunde zur Nacherwärmung der Zuluft über die Lüftungsanlage ausreichend ist.

Der exemplarische Temperaturverlauf für Mitte Januar mit dazugehöriger Wärmebilanz zeigt, dass nur noch eine Wärmemenge von 0,65 kWh benötigt wird, um die gewünschte Raumtemperatur von 20 °C zu erreichen und bis zum Eintreffen der SchülerInnen zu halten.

Aufgrund der sehr gut gedämmten Gebäudehülle sinken die Oberflächentemperaturen der Bauteile während der Nichtnutzungszeiten nicht unter 19 °C, so dass die operative Temperatur im Grunde der Raumlufthtemperatur entspricht.

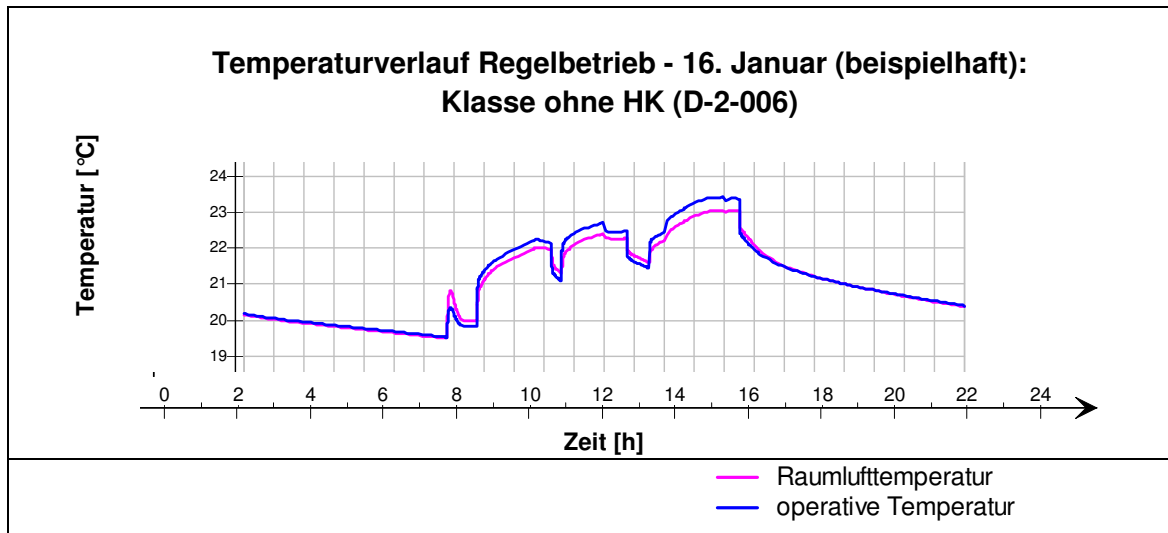


Abbildung 17: Variante 2 - Temperaturverlauf 16. Jan. (Regelbetrieb), Raum D-2-006

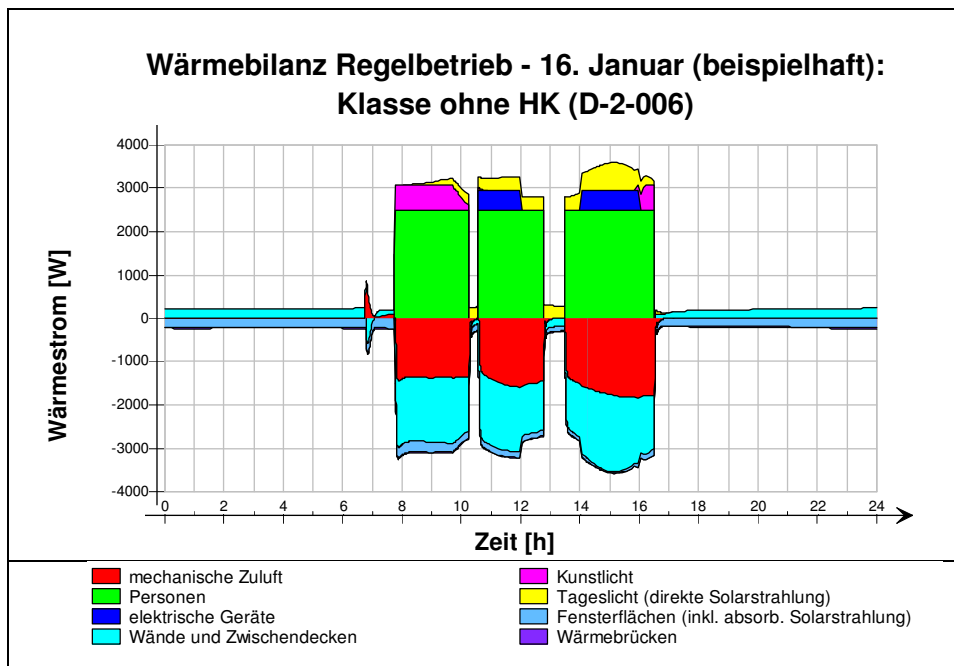


Abbildung 18: Variante 2 - Wärmebilanz 16. Jan. (Regelbetrieb), Raum D-2-006

In Variante 2 ist es im Klassenraum ohne Heizkörper (D-2-006) ausreichend, aufgrund der schnelleren Lufterwärmung über die Lüftungsanlage 3 Stunden vor Schulbeginn nach den Weihnachtsferien mit der Aufheizphase zu beginnen. Bei Eintreffen der SchülerInnen steigt die operative Temperatur sofort auf 20 °C an.

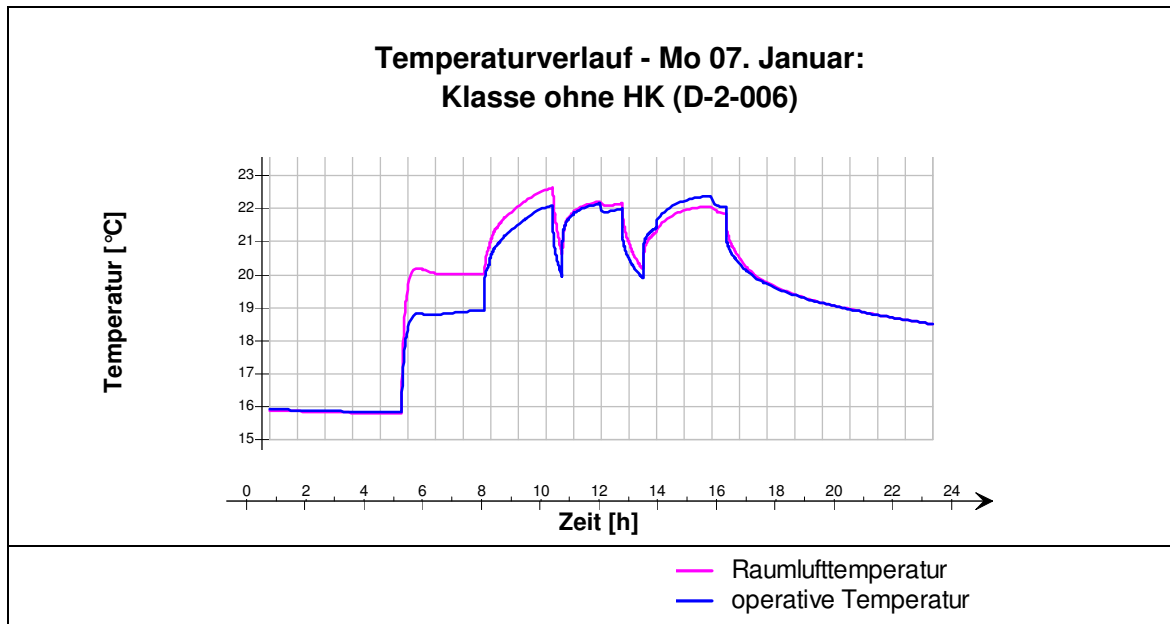


Abbildung 19: Variante 2 - Temperaturverlauf 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-006

Aus der Wärmebilanz am ersten Schultag ist abzulesen, dass die Lüftungsanlage vor Unterrichtsbeginn bis zu 3.000 W über die Zuluft in den Klassenraum (D-2-006) einbringt.

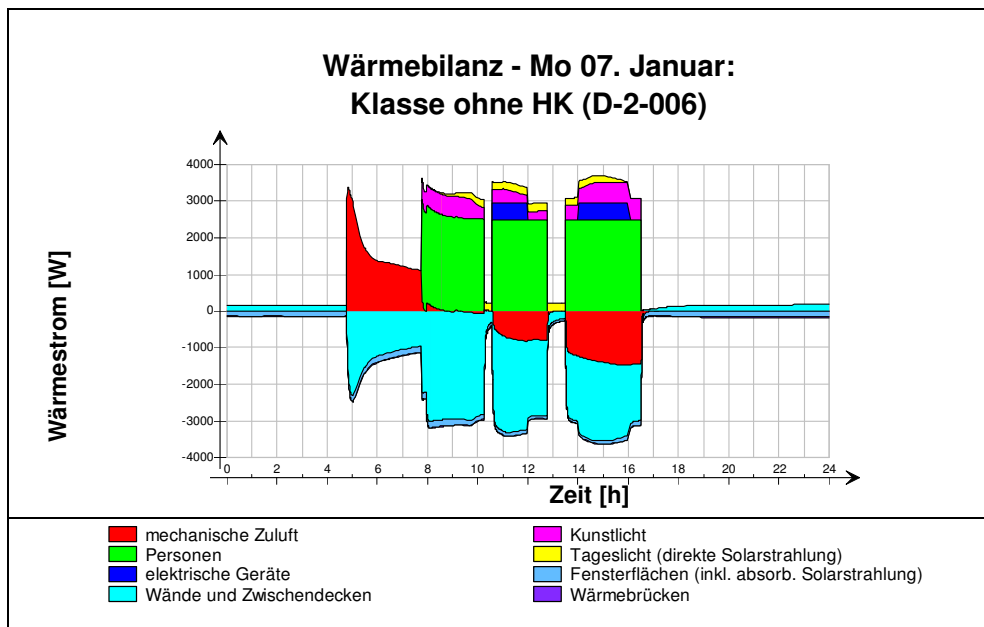


Abbildung 20: Variante 2 - Wärmebilanz 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-006

Zur Beurteilung, ob ein Klassenraum ohne Belegung auf einer Raumlufttemperatur von ca. 19 °C gehalten werden kann, um eine Nutzung jederzeit zu garantieren, wurde mit dem 30. Januar der kälteste Tag im Jahr als kritischster Zeitpunkt herangezogen.

Aufgrund der fassadenweise geregelten Nacherwärmung der Zuluft über die Lüftungsanlage erfolgt die Erwärmung vor Unterrichtsbeginn parallel zu den anderen Räumen mit einer Zulufttemperatur von 35 °C über einen Zeitraum von einer Stunde. In den Pausen findet eine erneute Nacherwärmung in den Zeiten von 10:15 – 10:35 und 12:45 – 13:00 Uhr mit ebenfalls 35 °C Zulufttemperatur statt.

Um die regelbelegten Klassenzimmer während dieser Pausentaktung nicht mit zu erwärmen, wird der Volumenstrom während dieser Zeit für diese Räume unterbunden.

Die Anlagentechnik vor Ort wird mit Hilfe einer Vorgabe durch die Gebäudeleittechnik-Anlage (GLT) so geregelt, dass nur die Räume in den Pausenzeiten mit einem 35° warmen Luftvolumenstrom beheizt werden deren Temperatur unter z.B. 19° liegt.

Der Temperaturverlauf für das Klassenzimmer 11 (D-2-006) am kältesten Tag im Jahr zeigt, dass die Raumluft während der ersten Stunde vor Eintreffen der SchülerInnen auf 22,3 °C ansteigt. Ohne Wärmezufuhr über Personen fällt die operative Temperatur als auch die Raumlufttemperatur bis zur ersten Pause auf 18,5 °C. Im weiteren Verlauf kann über die Nacherwärmung in den Pausen die angestrebte Temperatur von 19 °C gehalten werden.

Die vergleichende Betrachtung zum selben Zeitpunkt für eine Klasse mit Belegung (Pflegeraum D-2-009) zeigt, dass die Unterbrechung der Zuluft während der Aufheizphase in den Pausen keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf hat. Die operativen Temperaturen liegen jeweils über dem Sollwert von 20 °C.

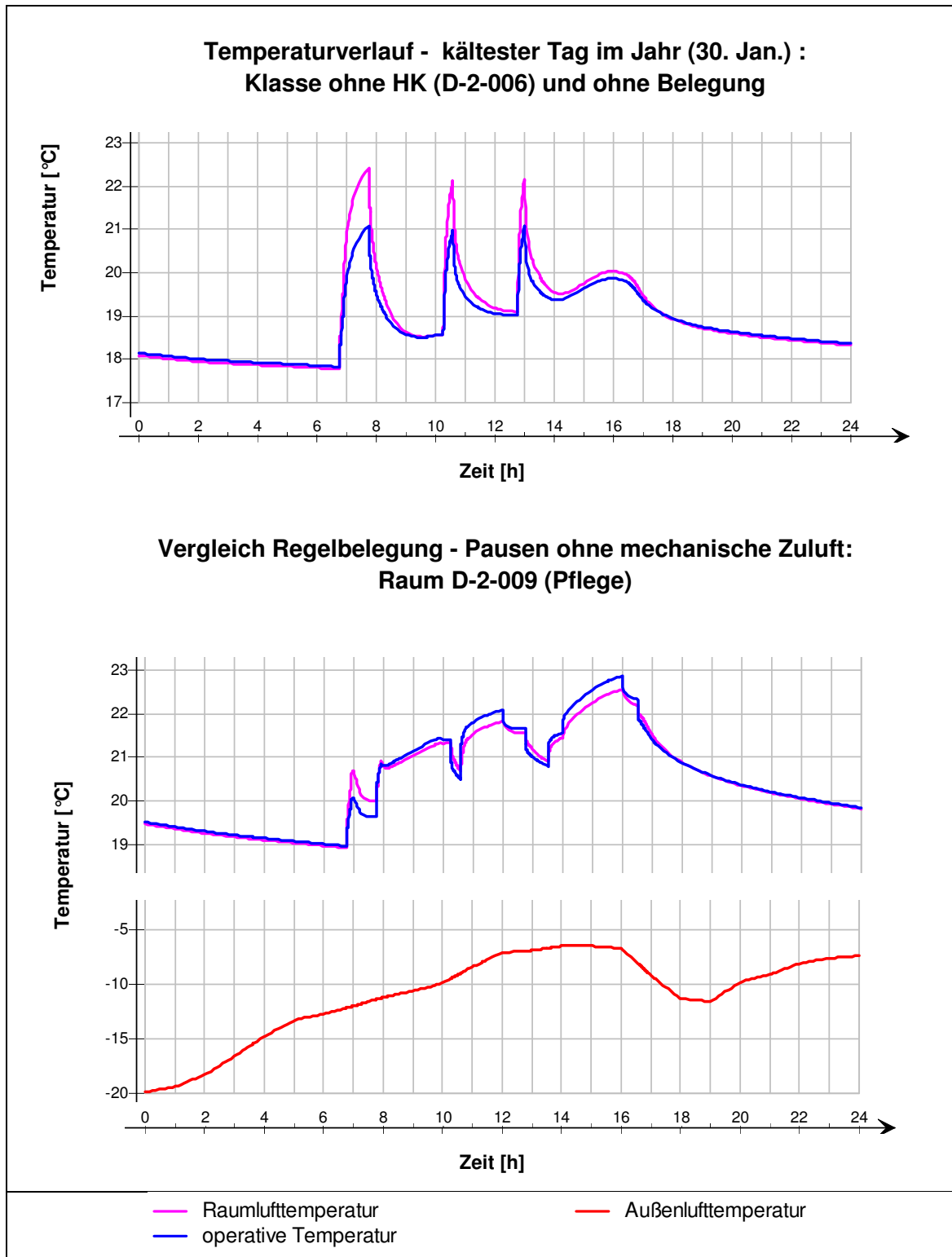


Abbildung 21: Variante 2 - Temperaturverlauf 30. Jan. (kältester Tag im Jahr), Raum D-2-006 und D-2-009

4.1.3 Variante 3: Keine Heizkörper in allen Klassenzimmern und Vorbereitungsräumen

In Variante 3 wird untersucht, ob der Eckklassenraum im Norden (D-2-005), der durch seine größere Außenwandfläche eine höhere Heizlast aufweist, mit derselben Regelung wirksam betrieben werden kann.

Des Weiteren wird aufgezeigt, wie sich ein Eck-Vorbereitungsraum im Norden (D-E-011) mit dem beschriebenen Regelungskonzept verhält.

Die Aufheizphase und der Temperaturverlauf in der ersten Woche nach den Weihnachtsferien werden im Folgenden genauer betrachtet, um das Temperaturverhalten im kritischsten Zeitraum zu beurteilen.

Auch in diesem Raum, der aufgrund seiner größeren Außenwandfläche eine höhere Heizlast aufweist, komfortable Raumtemperaturen zu erzielen.

Nach drei Stunden hat die Raumlufttemperatur am ersten Tag nach den Weihnachtsferien bereits 20 °C erreicht. Bis zum Eintreffen der SchülerInnen steigt die Raumtemperatur auf 21 °C an.

Die operative Temperatur liegt zu diesem Zeitpunkt bei 19,6 °C und weist im weiteren Verlauf stets Werte über 20 °C auf.

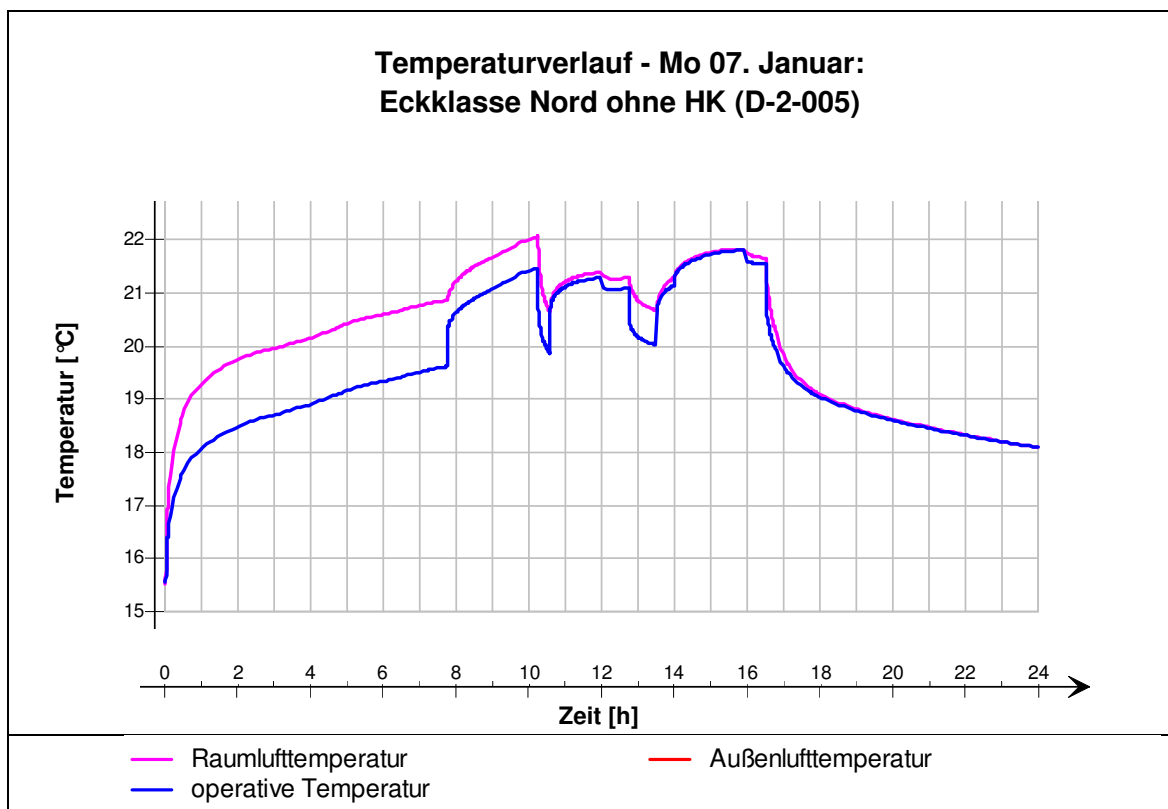


Abbildung 22: Variante 3 - Temperaturverlauf 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-005

An der Wärmebilanz ist zu erkennen, dass in dieser Variante eine Nacherwärmung der Zuluft in den Pausen erfolgt, um eine operative Temperatur bei Abwesenheit der Personen weiterhin auf 20 °C sicherzustellen.

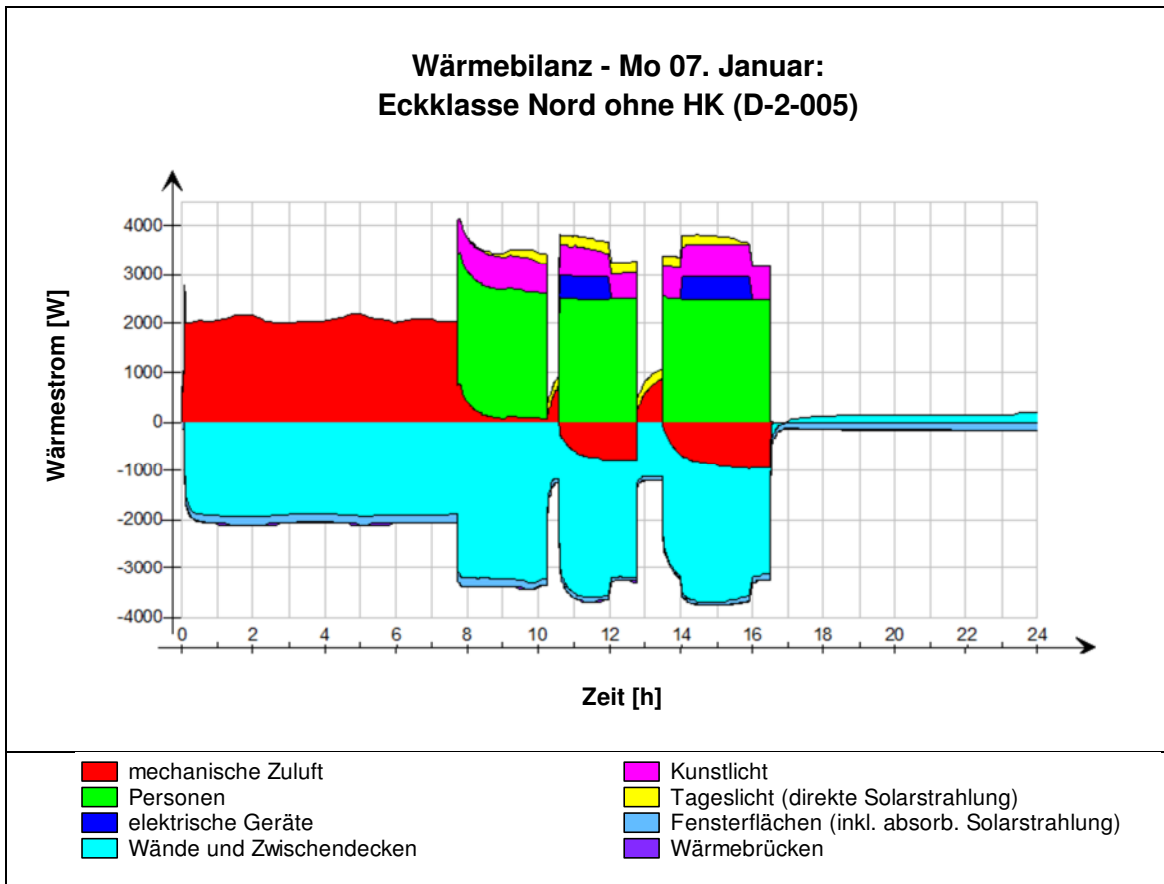


Abbildung 23: Variante 2 - Wärmebilanz 07. Jan. (erster Schultag nach Ferien), Raum D-2-006

Als kritisch erweist sich der Eck-Vorbereitungsraum ohne Belegung (D-E-011) im Erdgeschoss. Aufgrund seiner Lage weist er wie das vorab beschriebene Eckklassenzimmer eine höhere Außenwandfläche als ein innenliegender Raum auf. Die dadurch erhöhten Wärmeverluste verstärken sich zusätzlich über die bereits beschriebene Wärmebrücke im Anschlussbereich zur Tiefgarage.

Mit den angenommenen Randbedingungen für die erste Woche nach den Weihnachtsferien wird die vorgegebene Soll-Raumtemperatur von 20 °C während der Nutzungszeit nicht erreicht.

Um in diesem Raum die geforderte Innenraumtemperatur in der ersten Woche nach den Weihnachtsferien zu gewährleisten, müsste die Vorlaufzeit erhöht werden. Dies hätte zur Folge, dass auch alle anderen Räume auf der Westfassade mit dieser Regelung betrieben werden müssten.

Aus den vorangegangenen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass diese dann überhöhte Raumlufttemperaturen aufweisen würden.

Alternativ könnte der Anteil der Überströmung aus dem anliegenden Klassenzimmer erhöht werden, so dass die Abwärme zur Nacherwärmung genutzt wird.

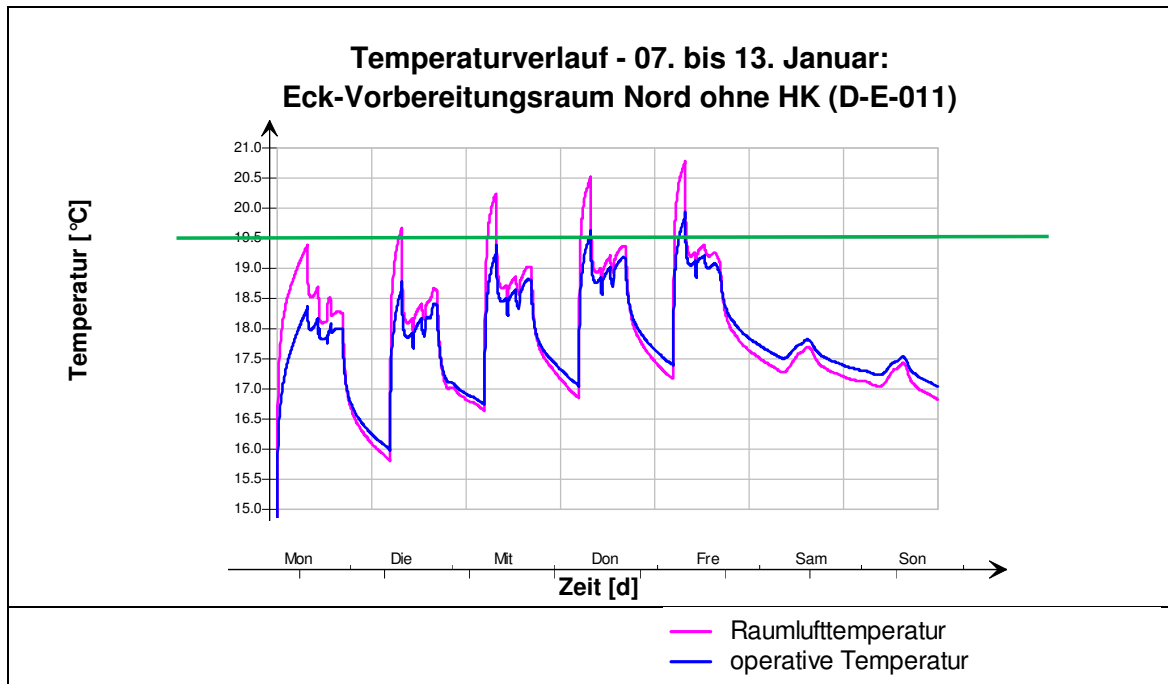


Abbildung 24: Variante 3 - Temperaturverlauf 07. bis 13. Januar (erster Woche nach Ferien), Raum D-E-011

4.2 Endenergiebedarf und Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden wird zunächst der ermittelte monatliche Endenergiebedarf der Energieträger Strom und Erdgas vorgestellt. Anschließend werden die Gesamtendenergiewerte aufgeführt, die der Wirtschaftlichkeitsberechnung zugrunde gelegt sind.

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit erfolgt in Bezug auf die Variante 1 (Heizkörperanordnung in jedem Raum) unter Berücksichtigung einer Vollbelegung als auch einer um 20 % reduzierten Belegung.

4.2.1 Monatlicher Variantenvergleich Endenergiebedarf Strom

Im Vergleich der einzelnen Varianten in Bezug auf die Belegungsdichte ist zu erkennen, dass bei Vollbelegung der Strombedarf um ca. 300 kWh/Monat gegenüber der Variante mit 80 % Belegung erhöht ist. Dies ist auf den größeren Volumenstrom zurückzuführen, der zur Einhaltung der Raumluftqualität benötigt wird.

Weiter ist auffällig, dass nennenswerte Unterschiede der Varianten im Bedarf lediglich im Januar und Februar auftreten. In diesen zwei Monaten erfolgt eine ausschlaggebende Laufzeitverlängerung der Lüftungsanlage zur Nacherwärmung der Zuluft in den Varianten mit reduzierter bzw. ohne Heizkörperanordnung in den Klassenräumen.

Die Variante 3 benötigt aufgrund der längeren Laufzeiten der Lüftungsanlage am meisten Strom gefolgt von Variante 2.

Die Variante 1, in der die Lüftungsanlage in erster Linie für die Einhaltung des Grenzwertes für den CO₂-Gehalt eingesetzt wird, weist den geringsten Bedarf auf.

Tabelle 19: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 80 % Belegung

80 % Belegung	Endenergiebedarf Strom [kWh]						
	Nov	Dez	Jan	Feb	März	April	Summe
Variante 1 mit HK	1.286	881	1.131	886	926	1.022	6.131
Variante 2 HK red.	1.282	890	1.243	1.063	924	1.019	6.421
Variante 3 ohne HK	1.291	922	1.401	1.149	934	1.026	6.723
prozentualer Anteil (Mittelwert)	20%	14%	20%	16%	14%	16%	100%

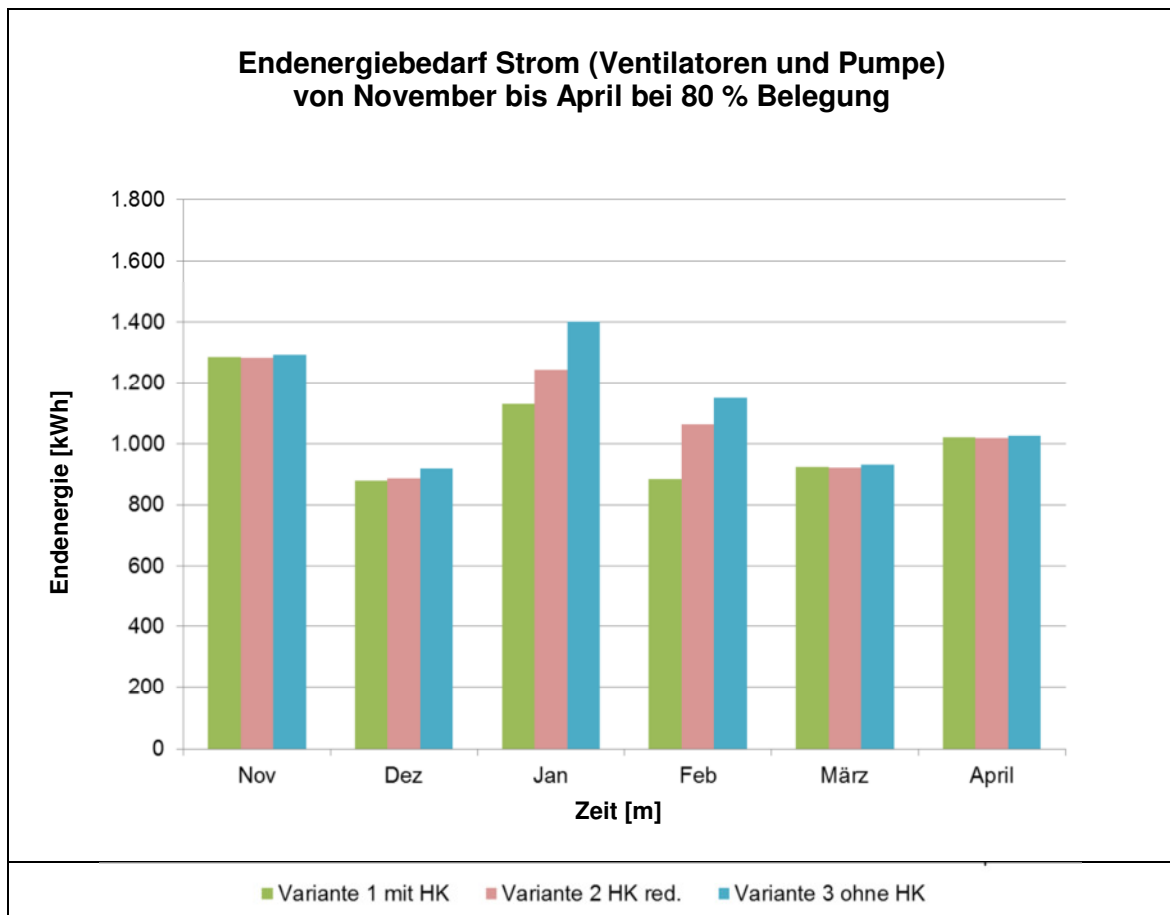


Abbildung 25: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 80 % Belegung

Tabelle 20: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 100 % Belegung

100 % Belegung	Endenergiebedarf Strom [kWh]						
	Nov	Dez	Jan	Feb	März	April	Summe
Variante 1 mit HK	1629	1115	1430	1121	1174	1296	7765
Variante 2 HK red.	1.623	1.119	1.567	1.344	1.169	1.291	8.111
Variante 3 ohne HK	1.632	1.149	1.713	1.404	1.177	1.298	8.373
prozentualer Anteil (Mittelwert)	20%	14%	19%	16%	15%	16%	100%

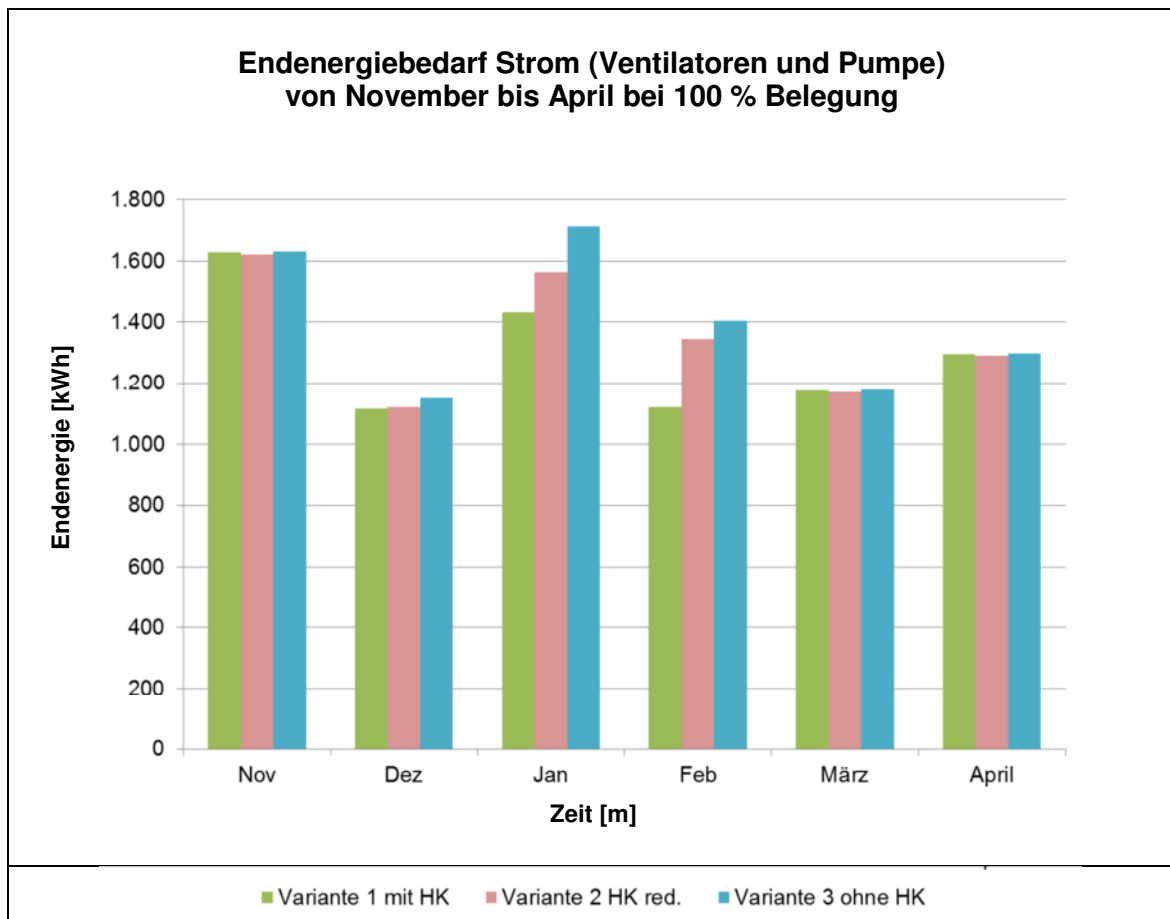


Abbildung 26: Monatlicher Endenergiebedarf an Strom bei 100 % Belegung

4.2.2 Monatlicher Variantenvergleich Heizendenergiebedarf

Für die Darstellung des monatlichen Heizendenergiebedarfs werden ausschließlich die Varianten mit 80 % Belegung herangezogen, da diese den größeren Energiebedarf aufweisen.

Die folgenden zwei Grafiken mit den dazugehörigen Tabellen zeigen, dass der hauptsächliche Heizendenergiebedarf in den Monaten Januar mit fast 50 %-Anteil und Februar mit ca. 30 %-Anteil besteht. In Variante 1 wird der Heizenergiebedarf größtenteils über Konvektoren abgedeckt.

In Variante 2 beträgt das Verhältnis der Bedarfsdeckung über Radiatoren bzw. über die Nacherwärmung der Zuluft ca. 1:1.

In der dritten Variante macht die nacherwärmte Zuluft den größten Anteil am Heizenergiebedarf aus, da nur noch in den Fluren Wärme über Heizkörper eingebracht wird.

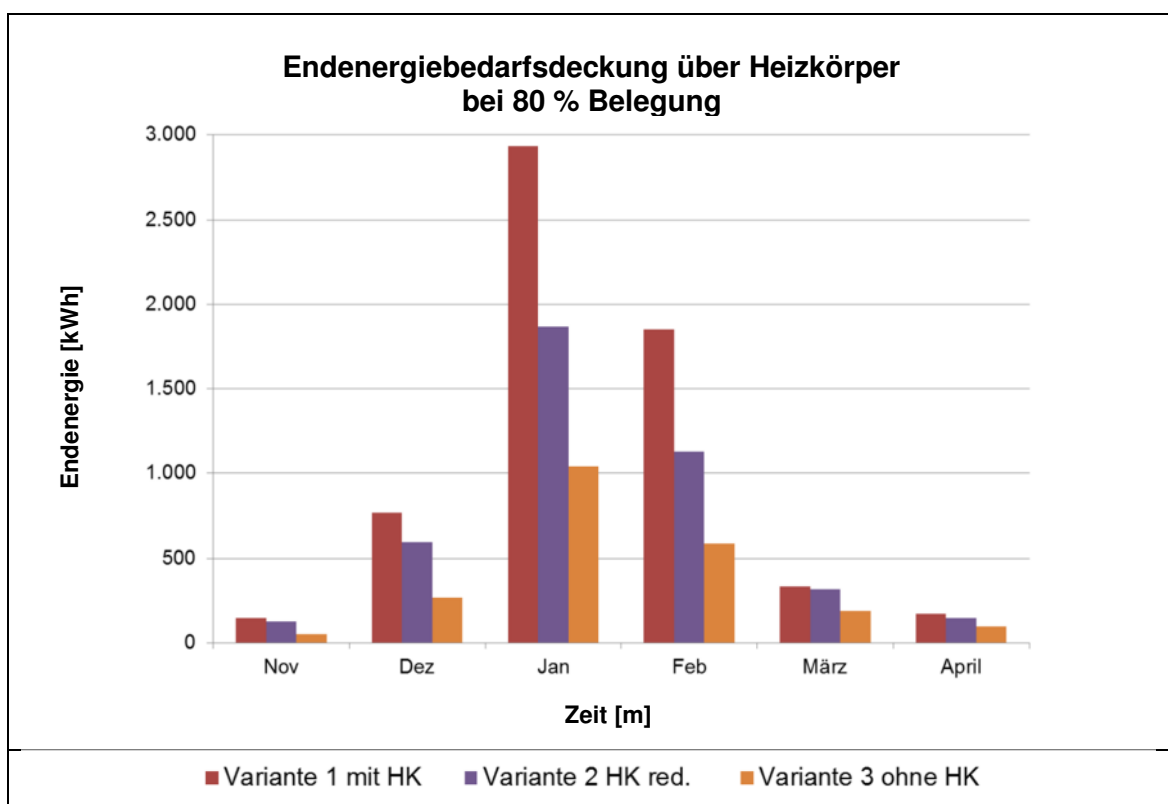


Abbildung 27: Monatliche Heizendenergiebedarfsdeckung über Heizkörper

Tabelle 21: Monatliche Heizenergiebedarfsdeckung über Heizkörper

80 % Belegung	Heizenergiebedarfsdeckung über Konvektoren [kWh]						
	Nov	Dez	Jan	Feb	März	April	Summe
Variante 1 mit HK	144	769	2934	1852	329	167	6196
Variante 2 HK red.	124	597	1869	1132	311	145	4177
Variante 3 ohne HK	50	263	1037	587	183	96	2216
prozentualer Anteil (Mittelwert)	3%	13%	46%	28%	7%	4%	100%

Tabelle 22: Monatliche Heizenergiebedarfsdeckung über nacherwärmte Zuluft

80 % Belegung	Heizenergiebedarfsdeckung über nacherwärmte Zuluft [kWh]						
	Nov	Dez	Jan	Feb	März	April	Summe
Variante 1 mit HK	52	224	663	300	47	2	1289
Variante 2 HK red.	121	348	1451	1235	27	3	3186
Variante 3 ohne HK	234	871	2848	2024	37	7	6021
prozentualer Anteil (Mittelwert)	4%	14%	48%	32%	2%	0%	100%

4.2.3 Endenergie und Primärenergie

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die Endenergiebedarfswerte der Energieträger Strom und Erdgas der einzelnen Varianten herangezogen. Im Heizendenergiebedarf sind die Anteile über Heizkörper und Lüftungsanlage (Nacherwärmung der Zuluft) zusammengefasst.

Der Endenergiebedarf für Strom beinhaltet den Ventilatorenstrom der Lüftungsanlage und den Pumpenstrom der Heizungs-Umwälzpumpe.

Die folgende Abbildung bzw. Tabelle stellt die Ergebnisse aus den thermischen Simulationen für die drei betrachteten Varianten dar. Dabei erfolgt zudem eine Unterscheidung der jeweiligen Variante in der Belegungsdichte. Zum einen werden die ermittelten Endenergiewerte bei einer Belegung von ca. 80 % abgebildet und zum anderen findet ein Vergleich mit dem Endenergiebedarf aus der geplanten Vollbelegung statt.

Es ist zu erkennen, dass der Heizenergiebedarf bei Vollbelegung bei den einzelnen Varianten niedriger ausfällt als bei einer um 20 % reduzierten Belegung, da durch die höhere Personenanzahl ein größerer Teil der Heizlast abdeckt wird. Auf der anderen Seite fällt bei Vollbelegung ein höherer Strombedarf an. Dies ist auf den nach Personenanzahl geregelten Volumenstrom der Lüftungsanlage zurückzuführen, der bei Vollbelegung entsprechend höher ausfällt.

Die Variante 3 ohne Heizkörperanordnung in den Klassen- und Vorbereitungsräumen weist aufgrund der längeren Lüftungsanlagenlaufzeiten den höchsten Endenergiebedarf für Strom als auch für das Heizen auf. Ausschlaggebend sind die Vorbereitungsräume ohne interne Wärmeeinträge über Personen und Geräte, die während der Nutzungszeiten durchgängig über die Lüftungsanlagen-Nacherwärmung beheizt werden.

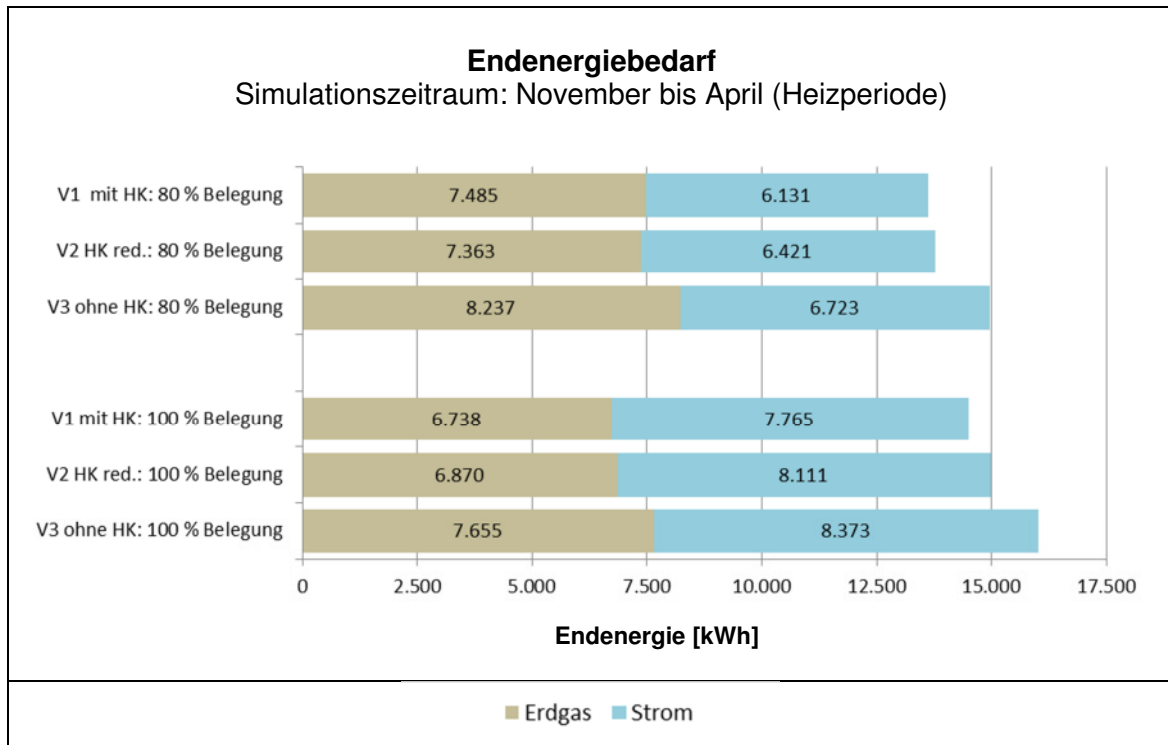


Abbildung 28: Endenergiebedarf über den Simulationszeitraum

Tabelle 23: Endenergiebedarf über den Simulationszeitraum

Variante	Endenergiebedarf [kWh]		
	Erdgas	Strom	Summe
V1 mit HK: 80 % Belegung	7.485	6.131	13.617
V2 HK red.: 80 % Belegung	7.363	6.421	13.784
V3 ohne HK: 80 % Belegung	8.237	6.723	14.960
prozentualer Anteil (Mittelwert)	54%	46%	100 %
V1 mit HK: 100 % Belegung	6.738	7.765	14.503
V2 HK red.: 100 % Belegung	6.870	8.111	14.981
V3 ohne HK: 100 % Belegung	7.655	8.373	16.028
prozentualer Anteil (Mittelwert)	47%	53%	100 %

Der prozentuale Anteil an Erdgas und Strom des Gesamt-Endenergiebedarfs verteilt sich annähernd zu jeweils 50 % auf die beiden Energieträger.

Bei Betrachtung des Primärenergiebedarfs werden die Bereitstellungsverluste durch Transport, Förderung, Lagerung, etc. berücksichtigt.

Zur Berechnung der Primärenergie wird die Endenergie mit einem Faktor entsprechend des Energieträgers beaufschlagt.

Aufgrund der unterschiedlichen Gewichtung beträgt der Erdgasanteil am Gesamt-Primärenergiebedarf ca. 30 % und der Stromanteil 70 %. Diese Verteilung bestimmt die Energieträgerkosten durch Berücksichtigung der Produktionskosten.

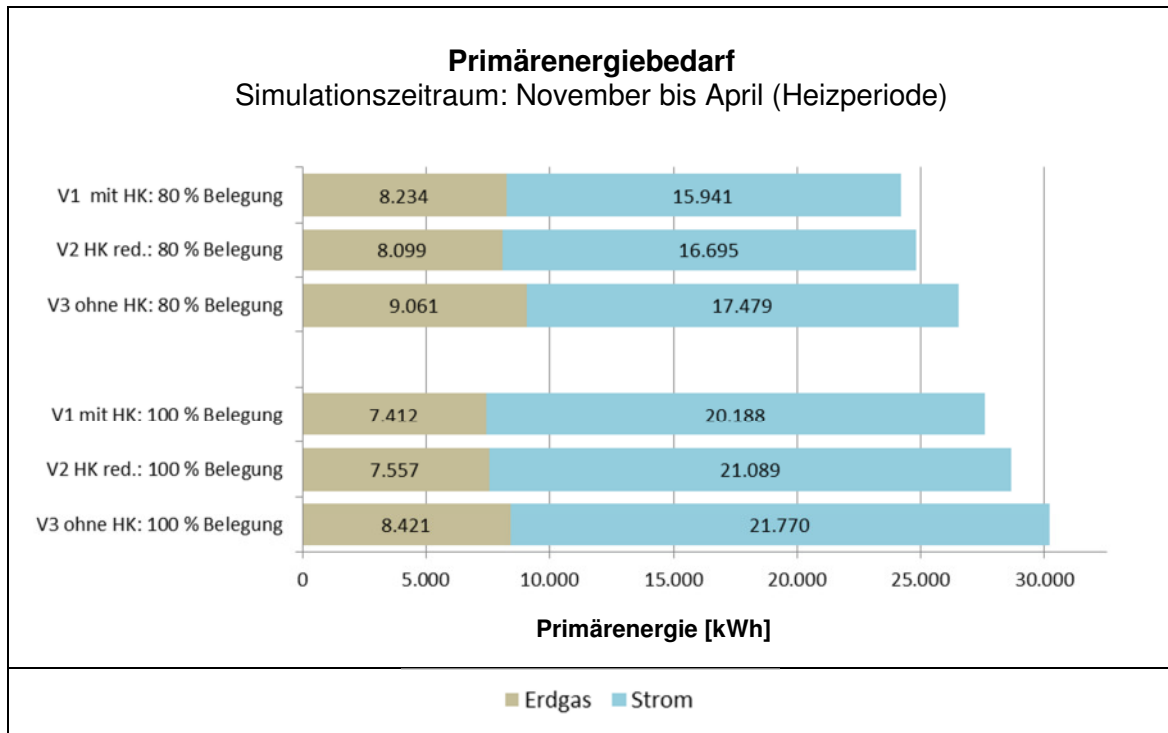


Abbildung 29: Primärenergiebedarf über den Simulationszeitraum

Tabelle 24: Primärenergiebedarf über den Simulationszeitraum

Variante	Primärenergiebedarf [kWh]		
	Erdgas	Strom	Summe
V1 mit HK: 80 % Belegung	8.234	15.941	24.175
V2 HK red.: 80 % Belegung	8.099	16.695	24.794
V3 ohne HK: 80 % Belegung	9.061	17.479	26.540
prozentualer Anteil (Mittelwert)	34%	66%	100 %
V1 mit HK: 100 % Belegung	7.412	20.188	27.600
V2 HK red.: 100 % Belegung	7.557	21.089	28.646
V3 ohne HK: 100 % Belegung	8.421	21.770	30.190
prozentualer Anteil (Mittelwert)	27%	73%	100 %

4.2.4 Gesamtenergiebedarf und Softwaregrenzen

Für die Gesamtenergiebedarfsbetrachtung ist es notwendig alle Zonen des Gebäudes im Modell abzubilden und die vielschichtigen Lüftungsregelungsprofile im Programm zu integrieren. Des Weiteren erfolgt in der Berechnung ein Jahreswechselübergang aufgrund der berücksichtigten Weihnachtsferien.

Diese Komplexität führt dazu, dass bei Betrachtung der gesamten Heizperiode einige wenige Tage im Winterhalbjahr nicht korrekt abgebildet werden.

Durch den Jahreswechsel sind zunächst die Benutzungsprofile nicht der Eingabe entsprechend in der Berechnung berücksichtigt worden. Eine Reduzierung des Berechnungszeitschrittes von 1,5 Stunden (default) auf 0,1 Stunden hat diesen Programmfehler beheben können.

Zur korrekten Berechnung der problematischen Einzeltage ist eine Modellvereinfachung auf zwei Geschosse und eine Eingrenzung des Betrachtungszeitraumes notwendig.

Es stellt sich außerdem heraus, dass die Reduzierung auf ein Geschoss ebenfalls zu abweichenden Ergebnissen führt. Bei Betrachtung des zweiten Obergeschosses ohne angrenzendes erstes Obergeschoss treten Temperaturunterschiede von bis zu zwei Kelvin auf.

4.2.5 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung zugrunde gelegten Investitionskosten staffeln sich entsprechend der Heizkörperanzahl inkl. Leitungsverteilung, die in den einzelnen Varianten berücksichtigt werden.

Die Variante 1 stellt aufgrund der Heizkörperanordnung in jedem Raum mit 58.400,00 € die kostenintensivste Variante dar.

Entsprechend dem Rückbau der Radiatoren folgen die Varianten 2 (38.500,00 €) und Variante 3 (23.585,00 €).

Mit den vorab aufgeführten Endenergiebedarfswerten der einzelnen Varianten und unter Ansetzung der in Kapitel 3.1 vorgestellten Randbedingungen für die Energiepreise und Preissteigerungen ergeben sich die in den folgenden Tabellen und Abbildungen zusammengefassten Ergebnisse.

Auffällig ist, dass die Investitionskosten auch die jeweiligen Gesamtkosten maßgeblich bestimmen. Die geringeren Investitionskosten der Variante 2 mit 19.550,00 € und Variante 3 (34.815,00 €) gegenüber der Variante 1 spiegeln sich auch in der Gesamtkostenbetrachtung als Minderkosten mit rund 24.000,00 € (Variante 2) und ca. 40.000,00 € (Variante 3) wider. Prozentual betrachtet besteht bei Variante 2 ein Einsparpotential von 15 % bis 20 % und bei Variante 3 liegt es zwischen 26 % und 33 %.

Aufgrund der nur geringen Abweichungen in den Gesamt-Endenergiebedarfswerten der einzelnen Varianten, haben diese keine entscheidende Auswirkung auf das Endergebnis.

Tabelle 25: Gesamtkostenvergleich über 20 Jahre bei 80 % Belegung

80 % Belegung	Variante 1 mit HK	Variante 2 HK red.	Variante 3 ohne HK
Investitionskosten Heizkörper	58.400 €	38.850 €	23.585 €
Minderkosten gegenüber Variante 1		-19.550 €	-34.815 €
moderate Preissteigerung			
Gesamtkosten (20 Jahre)	126.099 €	101.472 €	84.512 €
Minderkosten gegenüber Variante 1		-24.627 €	-41.587 €
Prozentuale Einsparung		17%	28%
Amortisationszeit (Basis: Variante 1)		sofort	sofort
dynamische Preissteigerung			
Gesamtkosten (20 Jahre)	141.790 €	117.419 €	101.748 €
Minderkosten gegenüber Variante 1		-24.371 €	-40.042 €
Prozentuale Einsparung		20%	33%
Amortisationszeit (Basis: Variante 1)		sofort	sofort

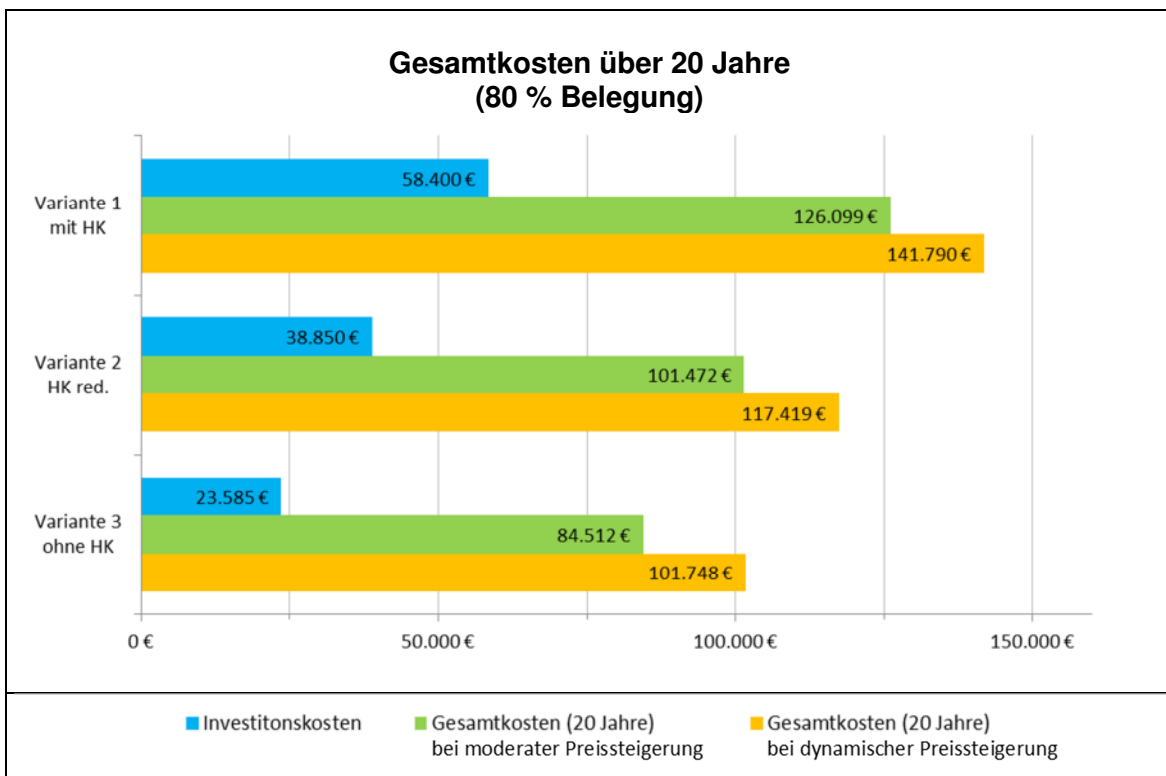


Abbildung 30: Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten bei 80 % Belegung

Tabelle 26: Gesamtkostenvergleich über 20 Jahre bei 100 % Belegung

100 % Belegung	Variante 1 mit HK	Variante 2 HK red.	Variante 3 ohne HK
Investitionskosten Heizkörper	58.400 €	38.850 €	23.585 €
Minderkosten gegenüber Variante 1		-19.550 €	-34.815 €
moderate Preissteigerung			
Gesamtkosten (20 Jahre)	133.774 €	109.944 €	92.591 €
Minderkosten gegenüber Variante 1		-23.830 €	-41.183 €
Prozentuale Einsparung		15%	26%
Amortisationszeit (Basis: Variante 1)		sofort	sofort
dynamische Preissteigerung			
Gesamtkosten (20 Jahre)	150.842 €	127.600 €	111.393 €
Minderkosten gegenüber Variante 1		-23.242 €	-39.449 €
Prozentuale Einsparung		18%	31%
Amortisationszeit (Basis: Variante 1)		sofort	sofort

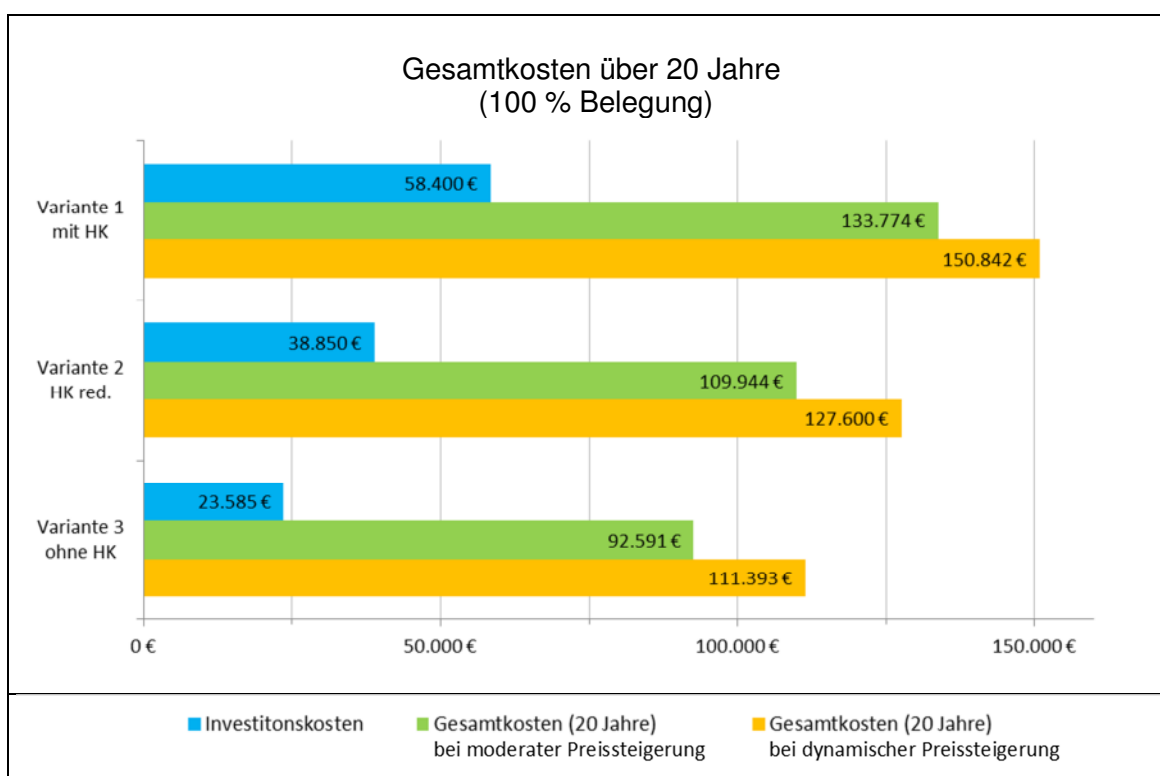


Abbildung 31: Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten bei 100 % Belegung

5 Öffentlichkeitsarbeit

Die Vorgehensweise und die Problemstellungen während der Planung und Ausführung sowie die Grundlagen und Ergebnisse der Simulationen wurden mit folgenden Vorträgen und Veröffentlichungen übermittelt:

- Vortrag: „Simulation und Realisierung von kostengünstigen Passivhausschulen mit minimierter Anlagentechnik“, Internationalen Passivhaus-Tagung 2014 in Aachen.

- Vortrag: „Integrale Gebäudekonzepte – Gebäudehülle und innovative Energietechnik,“ Tagung „Bau Innovativ“ am 14.11. 2013 in Fürstfeldbruck

- Vortrag: „ Fachübergreifendes Energieeffizienzmanagement“ in der Evangelischen Landesvolkshochschule in Pappenheim am 08.10.2014. Seminar der obersten Bayerischen Baubehörde für Teilnehmer der städtlichen Bauämter.

Zeitschriften Beitrag: „ Energieeffiziente Nichtwohngebäude wirtschaftlich Planen und Bauen“ Veröffentlichung in der Zeitschrift „ Passivhaus Kompendium 2015“.

Buchbeitrag zum Buch“ Passiv- , Nullenergie- und Plusenergiehäuser des WEKA Buch Verlags. Darstellung des Energetischen Konzepts.

Darstellung auf Gewebeplane für die Passivhaus-Wanderausstellung der Agenda 21 des Landkreises Ansbach wird in 2015 erstellt.

Eintragungs- und Vernetzungsmöglichkeiten in öffentlichen Datenbanken werden ab Mai 2015 abgestimmt.

Die Resonanz auf die Vorträge war durchgehend positiv. Architekten, Ingenieure für Anlagentechnik und Energieberater erkundigten sich nach der genauen Vorgehensweise.

6 Fazit

Das Staatliche Berufliche Schulzentrum in Ansbach ist mit nur geringen Mehrkosten von 1,2 % als Passivhausgebäude errichtet und in Betrieb genommen worden. Dem gegenüber stand eine deutliche End-Energieeinsparung-Wärme von deutlich über 54 % gegenüber einem Gebäude nach EnEV -23%. Der Verzicht auf Heizkörper in den Klassen und die Verteilung der Wärme über die zentrale Lüftungsanlage ist bei nur 10% Strommehrverbrauch eine wirtschaftliche Herangehensweise an den Bau von Nichtwohngebäuden mit einer hohen Nutzeranzahl. Wichtig, dass haben die Simulationen aufgezeigt ist dabei ein intelligentes Steuerungssystem für die Lüftungsanlage und die Minimierung des Wärmeverlustes über die Gebäudehülle wie sie beim Passivhaus vorgegeben ist.

Die finanzielle Unterstützung durch die DBU war sehr hilfreich um die Qualitätssicherung dieses Modellvorhabens zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, vom 19. Mai 2010.
- [2] DIN EN 15251 (2012-12): Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [3] DIN EN 12464-1 (2011-08): Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.

Anhang

Ergebnistabellen Heizperiode

A 1 Variante 1: Heizkörperanordnung in jedem Raum

Anlage 1: Variante 1 – Raumluft- und operative Temperaturen, 7. Jan., D-2-005

Raumlufttemperaturen und operative Temperaturen [°C]		
Variante 1: Raum D-2-005 (Eckklasse 10) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]
1	19,9	19,4
2	20,0	19,4
3	20,0	19,4
4	20,0	19,4
5	20,0	19,4
6	20,0	19,4
7	20,0	19,4
8	20,2	19,8
9	21,4	21,2
10	21,8	21,6
11	21,3	21,2
12	21,5	21,7
13	21,4	21,3
14	20,9	20,8
15	21,8	22,0
16	22,0	22,2
17	21,4	21,4
18	20,3	20,2
19	20,0	19,9
20	19,8	19,7
21	19,6	19,6
22	19,5	19,5
23	19,4	19,4
24	19,3	19,3
Mittel	20,5	20,3
min	19,3	19,3
max	22,0	22,2

Anlage 2: Variante 1 – Bauteiloberflächentemperaturen, 7. Jan., D-2-005

Bauteiloberflächentemperaturen [°C]						
Variante 1: Raum D-2-005 (Eckklasse 10)						
1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)						
Stunde	Boden	abgehängte Decke	Fenster	Flurwand	Trockenbau- wand	Außenwand
1	18,7	18,9	17,5	18,8	19,1	18,4
2	18,7	18,9	17,6	18,9	19,1	18,4
3	18,7	18,9	17,6	18,9	19,1	18,4
4	18,7	18,9	17,5	18,9	19,2	18,4
5	18,7	19,0	17,6	18,9	19,2	18,4
6	18,7	19,0	17,6	18,9	19,2	18,5
7	18,8	19,0	17,6	19,0	19,2	18,5
8	18,8	19,4	18,0	19,0	19,3	18,6
9	19,3	21,0	19,4	19,5	20,3	19,0
10	19,6	21,4	20,1	19,7	21,0	19,2
11	19,8	21,0	20,1	19,8	21,1	19,3
12	20,1	21,5	20,9	20,0	21,5	19,5
13	20,3	21,2	20,6	20,0	21,5	19,5
14	20,3	20,6	20,2	19,9	21,1	19,4
15	20,6	21,7	21,5	20,2	21,7	19,7
16	20,9	22,0	21,4	20,4	22,1	19,9
17	20,9	21,2	20,2	20,3	21,8	19,8
18	20,6	20,0	18,8	20,0	20,9	19,4
19	20,4	19,7	18,3	19,8	20,5	19,3
20	20,3	19,6	18,1	19,8	20,2	19,2
21	20,1	19,4	17,9	19,7	20,0	19,2
22	20,0	19,3	17,8	19,6	19,8	19,1
23	19,9	19,2	17,7	19,6	19,7	19,1
24	19,7	19,1	17,5	19,6	19,5	19,1
Mittel	19,7	20,0	18,8	19,5	20,3	19,0
min	18,7	18,9	17,5	18,8	19,1	18,4
max	20,9	22,0	21,5	20,4	22,1	19,9

Anlage 3: Variante 1 – Wärmeströme in Bauteiloberflächen, 7. Jan., D-2-005

Wärmeströme in Bauteiloberflächen [W]						
Variante 1: Raum D-2-005 (Eckklasse 10)						
1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)						
Stunde	Boden	abgehängte Decke	Fenster	Flurwand	Trocken- bauwand	Außenwand
1	-77,3	-104,6	-40,7	-44,1	0,1	-110,5
2	-78,1	-103,7	-40,7	-43,8	1,1	-110,1
3	-78,5	-103,7	-41,5	-43,6	1,4	-109,9
4	-80,8	-104,2	-43,2	-45,0	0,8	-111,2
5	-79,1	-102,6	-41,6	-42,9	2,1	-109,4
6	-76,3	-101,9	-40,6	-40,2	3,0	-107,2
7	-76,0	-102,1	-41,1	-39,7	2,5	-107,1
8	-234,1	-161,7	-42,3	-100,1	-37,4	-156,7
9	-819,3	-245,0	-43,1	-313,6	-134,7	-328,6
10	-843,2	-216,1	-35,1	-346,4	-98,4	-356,3
11	-568,5	-147,4	-25,5	-267,6	-22,9	-294,0
12	-760,8	-192,0	-22,3	-354,6	-65,1	-364,0
13	-473,4	-117,8	-18,4	-262,5	10,0	-290,1
14	-268,8	-134,5	-15,3	-189,8	25,1	-231,3
15	-691,8	-204,1	-15,7	-365,2	-72,5	-373,7
16	-656,2	-181,5	-22,0	-366,1	-43,7	-375,0
17	-204,0	-70,3	-29,7	-195,7	66,3	-236,2
18	182,0	-38,8	-33,6	-30,0	114,1	-98,3
19	220,6	-53,7	-37,9	-7,4	83,0	-77,1
20	225,0	-60,5	-40,2	5,8	63,4	-63,7
21	217,0	-64,9	-40,4	15,7	50,7	-52,8
22	204,9	-67,3	-40,9	24,5	42,2	-43,3
23	193,1	-68,5	-41,8	32,8	36,3	-34,7
24	181,3	-69,3	-42,4	40,3	31,9	-27,2
Mittel	-193,4	-117,3	-34,8	-124,1	2,5	-173,7
min	-843,2	-245,0	-43,2	-366,1	-134,7	-375,0
max	225,0	-38,8	-15,3	40,3	114,1	-27,2

Anlage 4: Variante 1 – Wärmebilanz, 7. Jan., D-2-005

Wärmebilanz [W]									
Variante 1: Raum D-2-005 (Eckklasse 10)									
1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)									
Stunde	mechan. Zuluft	Personen	elektrische Geräte	Wände und Zwischendecken	Kunstlicht	Tageslicht	lokale Heizelemente	Fensterflächen	Wärmebrücken
1	-0,5	0,0	0,0	-489,9	0,0	0,0	673,1	-166,9	-13,1
2	-0,7	0,0	0,0	-485,4	0,0	0,0	665,5	-166,6	-13,1
3	-0,7	0,0	0,0	-486,9	0,0	0,0	674,5	-170,1	-13,3
4	-0,1	0,0	0,0	-494,4	0,0	0,0	686,9	-176,7	-13,9
5	-0,1	0,0	0,0	-480,0	0,0	0,0	661,5	-170,5	-13,4
6	-0,1	0,0	0,0	-469,0	0,0	0,0	649,3	-166,4	-13,0
7	-0,1	0,0	0,0	-469,3	0,0	0,0	651,2	-168,2	-13,2
8	-30,6	649,3	0,0	-975,8	169,2	-0,8	531,8	-173,2	-13,5
9	-635,4	2.549,7	0,0	-2.441,6	676,8	36,4	23,9	-176,8	-14,4
10	-615,8	2.513,7	0,0	-2.469,2	672,2	139,9	17,8	-145,8	-13,9
11	-648,2	1.670,5	187,5	-1.723,9	407,7	206,5	41,7	-107,6	-12,0
12	-1.235,3	2.505,6	449,6	-2.333,5	564,5	214,1	15,1	-94,5	-10,8
13	-1.002,5	1.880,5	16,9	-1.525,6	377,6	223,6	21,0	-78,8	-9,9
14	-581,9	1.252,8	0,3	-1.145,8	314,8	208,0	91,7	-65,7	-8,6
15	-1.333,9	2.505,6	432,6	-2.325,3	668,6	193,7	10,2	-67,3	-8,2
16	-1.420,8	2.505,6	449,7	-2.201,4	676,8	99,4	7,8	-91,5	-8,3
17	-791,5	1.252,8	17,4	-879,6	338,4	9,9	10,4	-121,8	-9,3
18	-0,8	0,0	0,0	95,3	0,0	0,0	16,0	-137,5	-10,4
19	-0,6	0,0	0,0	135,0	0,0	0,0	16,6	-155,2	-11,7
20	-1,5	0,0	0,0	150,2	0,0	0,0	16,5	-164,5	-12,4
21	-0,6	0,0	0,0	153,7	0,0	0,0	16,1	-165,5	-12,5
22	-0,1	0,0	0,0	156,7	0,0	0,0	15,7	-167,5	-12,7
23	-0,2	0,0	0,0	161,7	0,0	0,0	15,4	-171,3	-13,0
24	-0,4	0,0	0,0	165,5	0,0	0,0	15,0	-173,8	-13,2
Mittel	-345,9	803,6	64,8	-849,1	202,8	55,5	231,0	-143,5	-12,0
Mittel*24 h	-8.302,1	19.286,1	1.554,1	-20.378,2	4.866,6	1.330,8	5.544,5	-3.443,6	-287,7
min	-1.420,8	0,0	0,0	-2.469,2	0,0	-0,8	7,8	-176,8	-14,4
max	-0,1	2.549,7	449,7	165,5	676,8	223,6	686,9	-65,7	-8,2

Anlage 5: Variante 1 – Raumluftqualität, 7. Jan., D-2-005

Raumluftqualität		
Variante 1: Raum D-2-005 (Eckklasse 10) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	CO ₂ - Gehalt [ppm]	relative Feuchte [%]
1	413,5	30,1
2	413,4	30,0
3	413,4	30,0
4	413,4	29,9
5	413,4	29,9
6	413,4	30,0
7	413,4	29,9
8	472,2	28,9
9	1.046,9	29,8
10	1.105,8	30,5
11	1.060,0	33,4
12	1.096,0	35,7
13	1.083,1	36,6
14	1.032,5	36,9
15	1.097,4	35,9
16	1.103,4	36,5
17	1.058,4	36,3
18	999,9	37,7
19	999,6	38,5
20	999,0	38,9
21	998,5	39,2
22	998,2	39,5
23	998,0	39,8
24	997,8	40,0
Mittel	835,0	34,3
min	413,4	28,9
max	1.105,8	40,0

Anlage 6: Variante 1 – Fangers Komfortindex, 7. Jan., D-2-005

Fangers Komfortindex		
Variante 1: Raum D-2-005 (Eckklasse 10) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	PPD (Vorausgesagter Prozentsatz unzufriedener Personen) [%]	PMV (Vorausgesagtes mittleres Votum)
1	0,0	0,0
2	0,0	0,0
3	0,0	0,0
4	0,0	0,0
5	0,0	0,0
6	0,0	0,0
7	0,0	0,0
8	2,0	-0,1
9	6,8	-0,3
10	6,2	-0,2
11	4,1	-0,1
12	5,8	-0,2
13	4,4	-0,1
14	3,1	-0,1
15	5,5	-0,1
16	5,3	-0,1
17	2,7	-0,1
18	0,0	0,0
19	0,0	0,0
20	0,0	0,0
21	0,0	0,0
22	0,0	0,0
23	0,0	0,0
24	0,0	0,0
Mittel	1,9	-0,1
min	0,0	-0,3
max	6,8	0,0

A 2 Variante 2: reduzierte Heizkörperanordnung in den Klassenzimmern

Anlage 7: Variante 2 – Raumluf- und operative Temperaturen, 16. Jan., D-2-006

Raumluf-temperaturen und operative Temperaturen [°C]		
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK) Regelbetrieb (16. Jan.)		
Stunde	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]
1	20,1	20,1
2	20,0	20,0
3	19,9	19,9
4	19,8	19,8
5	19,7	19,7
6	19,6	19,6
7	19,8	19,7
8	20,3	20,2
9	21,5	21,7
10	21,9	22,1
11	21,8	21,9
12	22,3	22,6
13	22,2	22,3
14	21,9	21,9
15	22,7	23,0
16	23,0	23,4
17	22,7	22,8
18	21,8	21,7
19	21,4	21,3
20	21,1	21,1
21	20,9	20,9
22	20,7	20,8
23	20,6	20,6
24	20,4	20,5
Mittel	21,1	21,2
min	19,6	19,6
max	23,0	23,4

Anlage 8: Variante 2 – Bauteiloberflächentemperaturen, 16. Jan., D-2-006

Bauteiloberflächentemperaturen [°C]						
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK) Regelbetrieb (16. Jan.)						
Stunde	Boden	abgehängte Decke	Fenster	Flurwand	Trockenbau- wand	Außenwand
1	20,7	19,9	18,0	20,3	20,3	20,1
2	20,6	19,8	17,9	20,2	20,1	20,0
3	20,5	19,7	17,8	20,2	20,0	20,0
4	20,4	19,6	17,8	20,1	19,9	19,9
5	20,3	19,5	17,7	20,1	19,8	19,9
6	20,2	19,4	17,6	20,0	19,7	19,8
7	20,1	19,5	17,5	20,0	19,7	19,8
8	20,1	19,9	17,9	20,0	19,9	19,9
9	20,5	21,5	19,6	20,5	21,0	20,3
10	20,8	22,0	20,4	20,7	21,7	20,6
11	21,0	21,7	20,5	20,7	21,9	20,6
12	21,3	22,4	21,5	21,0	22,4	20,8
13	21,5	22,2	21,2	21,0	22,5	20,9
14	21,5	21,8	21,0	20,9	22,2	20,7
15	21,9	22,9	22,7	21,3	22,8	21,1
16	22,2	23,2	23,2	21,5	23,3	21,3
17	22,3	22,6	21,5	21,4	23,2	21,2
18	22,0	21,4	19,9	21,1	22,4	20,9
19	21,9	21,1	19,5	21,0	21,8	20,8
20	21,7	20,8	19,2	20,9	21,4	20,7
21	21,6	20,7	19,0	20,8	21,2	20,6
22	21,4	20,5	18,8	20,7	21,0	20,5
23	21,3	20,4	18,5	20,7	20,8	20,5
24	21,1	20,2	18,3	20,6	20,6	20,4
Mittel	21,1	20,9	19,5	20,7	21,2	20,5
min	20,1	19,4	17,5	20,0	19,7	19,8
max	22,3	23,2	23,2	21,5	23,3	21,3

Anlage 9: Variante 2 – Wärmebilanz, 16. Jan., D-2-006

Wärmebilanz [W]									
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK) Regelbetrieb (16. Jan.)									
Stunde	mechan. Zuluft	Personen	elektrische Geräte	Wände und Zwischen- decken	Kunst- licht	Tages- licht	lokale Heiz- elemente	Fenster- flächen	Wärme- brücken
1	-0,2	0,0	0,0	224,6	0,0	0,0	0,0	-215,5	-16,4
2	-0,2	0,0	0,0	225,0	0,0	0,0	0,0	-214,6	-16,4
3	-0,2	0,0	0,0	221,2	0,0	0,0	0,0	-210,5	-16,0
4	-0,2	0,0	0,0	220,6	0,0	0,0	0,0	-209,7	-16,0
5	-0,2	0,0	0,0	221,2	0,0	0,0	0,0	-210,2	-16,0
6	-0,2	0,0	0,0	224,1	0,0	0,0	0,0	-212,8	-16,2
7	112,8	0,0	0,0	87,4	0,0	0,0	0,0	-221,4	-17,0
8	-238,7	631,7	0,0	-294,1	141,3	-0,7	0,0	-234,3	-18,0
9	-1.358,2	2.505,6	0,0	-1.490,1	560,4	38,2	0,0	-241,1	-19,0
10	-1.366,1	2.505,6	0,0	-1.489,9	516,3	144,0	0,0	-204,2	-18,2
11	-917,1	1.668,6	187,5	-1.001,3	52,1	252,3	0,0	-153,3	-16,3
12	-1.521,6	2.505,6	440,4	-1.511,9	0,0	294,8	0,0	-138,7	-15,7
13	-1.188,1	1.880,2	2,7	-912,2	0,0	301,7	0,0	-122,4	-14,8
14	-689,6	1.252,8	2,9	-689,5	0,0	306,6	0,0	-101,3	-13,3
15	-1.666,2	2.505,6	441,0	-1.684,6	0,0	516,3	0,0	-49,4	-12,8
16	-1.805,9	2.505,6	449,0	-1.663,3	12,5	550,3	0,0	-42,6	-12,6
17	-970,6	1.252,8	14,2	-615,0	234,9	138,1	0,0	-142,4	-13,1
18	-0,2	0,0	0,0	163,3	0,0	0,1	0,0	-184,0	-14,0
19	-0,2	0,0	0,0	190,1	0,0	0,0	0,0	-192,4	-14,6
20	-0,2	0,0	0,0	198,3	0,0	0,0	0,0	-195,8	-14,9
21	-0,2	0,0	0,0	203,9	0,0	0,0	0,0	-198,8	-15,1
22	-0,2	0,0	0,0	211,1	0,0	0,0	0,0	-204,9	-15,6
23	-0,2	0,0	0,0	222,2	0,0	0,0	0,0	-214,6	-16,3
24	-0,2	0,0	0,0	230,3	0,0	0,0	0,0	-221,4	-16,9
Mittel	-483,8	800,6	64,1	-354,5	63,2	105,9	0,0	-180,7	-15,6
Mittel*24 h	-11.611,7	19.214,1	1.537,7	-8.508,7	1.517,5	2.541,6	0,0	-4.336,2	-375,0
min	-1.805,9	0,0	0,0	-1.684,6	0,0	-0,7	0,0	-241,1	-19,0
max	112,8	2.505,6	449,0	230,3	560,4	550,3	0,0	-42,6	-12,6

Anlage 10: Variante 2 – Raumluft- und operative Temperaturen, 7. Jan., D-2-006

Raumlufttemperaturen und operative Temperaturen [°C]		
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]
1	15,9	15,9
2	15,8	15,9
3	15,8	15,9
4	15,8	15,8
5	16,4	16,2
6	20,1	18,8
7	20,0	18,8
8	20,2	19,2
9	21,7	21,1
10	22,4	21,8
11	21,8	21,3
12	22,1	22,0
13	21,9	21,6
14	20,8	20,7
15	21,7	22,0
16	22,0	22,3
17	21,4	21,4
18	20,1	20,0
19	19,6	19,5
20	19,3	19,2
21	19,0	19,0
22	18,9	18,9
23	18,7	18,7
24	18,6	18,6
Mittel	19,6	19,4
min	15,8	15,8
max	22,4	22,3

Anlage 11: Variante 2 – Bauteiloberflächentemperaturen, 7. Jan., D-2-006

Bauteiloberflächentemperaturen [°C]						
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK)						
1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)						
Stunde	Boden	abgehängte Decke	Fenster	Flurwand	Trockenbauwand	Außenwand
1	16,2	15,7	14,5	16,5	16,0	15,8
2	16,2	15,7	14,4	16,5	15,9	15,7
3	16,2	15,7	14,4	16,4	15,9	15,7
4	16,1	15,7	14,3	16,4	15,9	15,7
5	16,1	16,1	14,7	16,5	16,0	15,8
6	16,6	18,8	16,9	17,0	17,3	16,4
7	16,8	18,8	16,9	17,2	17,9	16,5
8	17,0	19,1	17,3	17,4	18,4	16,7
9	17,8	21,1	19,4	18,0	19,8	17,4
10	18,5	21,9	20,4	18,5	20,9	17,8
11	18,9	21,2	20,2	18,6	21,2	17,9
12	19,4	22,0	21,2	18,9	21,7	18,3
13	19,8	21,6	20,8	19,0	21,8	18,3
14	19,7	20,5	20,0	18,8	21,1	18,1
15	20,2	21,8	21,5	19,2	21,7	18,6
16	20,5	22,1	21,6	19,5	22,1	18,8
17	20,6	21,2	20,2	19,4	21,8	18,7
18	20,3	19,7	18,6	19,0	20,8	18,3
19	20,1	19,3	18,0	18,8	20,1	18,2
20	19,9	19,0	17,6	18,7	19,7	18,1
21	19,7	18,8	17,4	18,7	19,3	18,0
22	19,5	18,6	17,2	18,6	19,1	18,0
23	19,3	18,5	17,0	18,5	18,9	17,9
24	19,2	18,3	16,9	18,5	18,7	17,9
Mittel	18,5	19,2	18,0	18,1	19,3	17,4
min	16,1	15,7	14,3	16,4	15,9	15,7
max	20,6	22,1	21,6	19,5	22,1	18,8

Anlage 12: Variante 2 – Wärmeströme in Bauteiloberflächen, 7. Jan., D-2-006

Wärmeströme in Bauteiloberflächen [W]						
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK)						
1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)						
Stunde	Boden	abgehängte Decke	Fenster	Flurwand	Trocken- bauwand	Außenwand
1	86,6	-52,6	-33,9	87,9	6,1	-10,3
2	85,7	-52,7	-33,7	90,1	5,3	-9,6
3	85,0	-52,6	-34,5	92,3	5,1	-8,9
4	86,2	-52,5	-36,0	95,4	5,3	-8,0
5	-37,4	-78,1	-35,3	40,5	-34,7	-35,1
6	-552,6	-112,7	-38,9	-251,5	-170,0	-173,7
7	-425,3	-87,5	-39,5	-232,0	-78,2	-164,9
8	-487,6	-94,7	-40,9	-285,9	-79,2	-188,6
9	-1.243,9	-126,5	-43,0	-585,2	-202,1	-319,2
10	-1.267,2	-117,3	-35,6	-648,9	-144,1	-348,7
11	-855,9	-88,0	-25,7	-531,6	-24,5	-297,4
12	-1.057,9	-105,3	-22,9	-635,3	-79,1	-342,3
13	-711,1	-78,0	-18,9	-521,8	10,7	-292,4
14	-360,5	-77,7	-14,9	-372,6	51,8	-226,1
15	-795,1	-105,1	-15,8	-583,9	-82,2	-319,3
16	-766,6	-99,7	-22,3	-592,1	-55,4	-323,0
17	-286,9	-62,4	-29,9	-380,3	72,9	-228,8
18	124,4	-53,1	-33,1	-160,1	125,2	-128,9
19	197,1	-57,7	-37,1	-112,1	84,7	-104,3
20	223,9	-60,2	-39,2	-81,0	57,5	-88,5
21	229,3	-61,7	-39,2	-57,3	40,8	-76,6
22	225,6	-62,5	-39,6	-38,6	31,0	-66,7
23	218,8	-62,9	-40,4	-23,0	25,2	-57,8
24	210,2	-63,0	-40,9	-10,0	21,4	-49,9
Mittel	-294,8	-77,7	-33,0	-237,4	-16,9	-161,2
min	-1.267,2	-126,5	-43,0	-648,9	-202,1	-348,7
max	229,3	-52,5	-14,9	95,4	125,2	-8,0

Anlage 13: Variante 2 – Wärmebilanz, 7. Jan., D-2-006

Wärmebilanz [W]									
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK)									
1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)									
Stunde	mechan. Zuluft	Personen	elektrische Geräte	Wände und Zwischendecken	Kunstlicht	Tageslicht	lokale Heizelemente	Fensterflächen	Wärmebrücken
1	0,1	0,0	0,0	147,3	0,0	0,0	0,0	-138,8	-10,4
2	0,1	0,0	0,0	147,5	0,0	0,0	0,0	-138,2	-10,4
3	0,1	0,0	0,0	150,2	0,0	0,0	0,0	-141,3	-10,6
4	0,1	0,0	0,0	156,8	0,0	0,0	0,0	-147,3	-11,1
5	764,9	0,0	0,0	-309,1	0,0	0,0	0,0	-144,4	-11,0
6	1.891,2	0,0	0,0	-1.639,0	0,0	0,0	0,0	-159,5	-13,1
7	1.303,6	0,0	0,0	-1.134,0	0,0	0,0	0,0	-161,8	-13,2
8	902,5	673,6	0,0	-1.336,6	140,3	-0,7	0,0	-167,5	-13,4
9	56,0	2.608,2	0,0	-2.974,5	560,4	36,4	0,0	-176,4	-14,5
10	-23,0	2.536,6	0,0	-2.927,2	532,5	139,6	0,0	-147,8	-14,3
11	-236,8	1.670,8	187,5	-1.928,3	234,1	206,0	0,0	-108,5	-12,3
12	-770,9	2.505,6	442,7	-2.511,4	292,5	213,8	0,0	-97,0	-11,2
13	-623,8	1.879,2	1,7	-1.663,2	163,7	223,1	0,0	-81,0	-10,3
14	-561,8	1.252,9	1,8	-988,2	190,4	207,1	0,0	-64,2	-8,5
15	-1.332,1	2.505,6	448,6	-2.157,5	500,1	193,1	0,0	-67,5	-8,2
16	-1.453,7	2.505,6	446,0	-2.038,0	560,4	98,9	0,0	-92,9	-8,4
17	-790,2	1.252,8	7,6	-786,8	280,2	9,0	0,0	-122,3	-9,3
18	-0,2	0,0	0,0	102,3	0,0	0,0	0,0	-135,5	-10,2
19	-0,1	0,0	0,0	142,8	0,0	0,0	0,0	-151,9	-11,5
20	-0,1	0,0	0,0	157,7	0,0	0,0	0,0	-160,4	-12,1
21	-0,1	0,0	0,0	161,6	0,0	0,0	0,0	-160,6	-12,1
22	-0,1	0,0	0,0	164,7	0,0	0,0	0,0	-162,1	-12,2
23	-0,1	0,0	0,0	169,1	0,0	0,0	0,0	-165,4	-12,5
24	-0,1	0,0	0,0	172,1	0,0	0,0	0,0	-167,5	-12,7
Mittel	-36,4	808,0	64,0	-863,4	143,9	55,3	0,0	-135,8	-11,4
Mittel*24 h	-874,6	19.390,9	1.535,9	-20.721,7	3.454,6	1.326,3	0,0	-3.259,8	-273,4
min	-1.453,7	0,0	0,0	-2.974,5	0,0	-0,7	0,0	-176,4	-14,5
max	1.891,2	2.608,2	448,6	172,1	560,4	223,1	0,0	-64,2	-8,2

Anlage 14: Variante 2 – Raumluftqualität, 7. Jan., D-2-006

Raumluftqualität		
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	CO ₂ - Gehalt [ppm]	relative Feuchte [%]
1	393,4	24,3
2	393,4	24,3
3	393,4	24,4
4	393,4	24,4
5	393,9	24,1
6	398,9	24,0
7	399,8	24,0
8	475,8	24,4
9	1.062,4	28,8
10	1.110,3	29,6
11	1.064,6	32,6
12	1.106,0	34,7
13	1.089,3	35,4
14	1.036,6	37,1
15	1.100,5	36,1
16	1.103,8	36,7
17	1.057,8	36,5
18	1.000,2	38,4
19	999,9	39,6
20	999,7	40,3
21	999,4	40,9
22	999,1	41,3
23	998,9	41,7
24	998,6	42,1
Mittel	832,0	32,7
min	393,4	24,0
max	1.110,3	42,1

Anlage 15: Variante 2 – Fangers Komfortindex, 7. Jan., D-2-006

Fangers Komfortindex		
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	PPD (Vorausgesagter Prozentsatz unzufriedener Personen) [%]	PMV (Vorausgesagtes mittleres Votum)
1	0,0	0,0
2	0,0	0,0
3	0,0	0,0
4	0,0	0,0
5	0,0	0,0
6	0,0	0,0
7	0,0	0,0
8	2,4	-0,1
9	7,0	-0,3
10	5,8	-0,2
11	3,9	-0,1
12	5,4	-0,1
13	4,1	-0,1
14	3,2	-0,1
15	5,4	-0,1
16	5,2	-0,1
17	2,7	-0,1
18	0,0	0,0
19	0,0	0,0
20	0,0	0,0
21	0,0	0,0
22	0,0	0,0
23	0,0	0,0
24	0,0	0,0
Mittel	1,9	-0,1
min	0,0	-0,3
max	7,0	0,0

Anlage 16: Variante 2 – Raumluft- und operative Temperaturen, 30. Jan., D-2-006

Raumlufttemperaturen und operative Temperaturen [°C]		
Variante 2: Raum D-2-006 (Klasse 11 ohne HK) ohne Belegung am kälteste Tag im Jahr (30. Jan.)		
Stunde	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]
1	17,9	18,0
2	17,8	17,9
3	17,8	17,9
4	17,8	17,8
5	17,7	17,8
6	17,7	17,7
7	18,1	18,0
8	21,5	20,4
9	19,0	18,8
10	18,4	18,4
11	20,1	19,5
12	19,3	19,1
13	19,5	19,3
14	19,9	19,5
15	19,5	19,3
16	19,8	19,7
17	19,6	19,5
18	19,0	18,9
19	18,7	18,7
20	18,5	18,5
21	18,4	18,5
22	18,3	18,4
23	18,3	18,3
24	18,2	18,3
Mittel	18,8	18,7
min	17,7	17,7
max	21,5	20,4

Anlage 17: Variante 2 – Raumluft- und operative Temperaturen, 30. Jan., D-2-009

Raumlufttemperaturen und operative Temperaturen [°C]		
Variante 2: Raum D-2-009 (Pflege ohne HK) Regelbetrieb ohne Pausenlüftung am kälteste Tag im Jahr (30. Jan.)		
Stunde	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]
1	19,3	19,3
2	19,2	19,2
3	19,1	19,1
4	19,0	19,1
5	19,0	19,0
6	18,9	18,9
7	19,1	19,1
8	20,3	19,9
9	20,8	20,9
10	21,1	21,2
11	21,1	21,2
12	21,7	21,9
13	21,5	21,5
14	21,1	21,1
15	21,9	22,2
16	22,4	22,7
17	21,9	21,9
18	21,0	21,0
19	20,6	20,6
20	20,3	20,4
21	20,2	20,2
22	20,0	20,0
23	19,9	19,9
24	19,8	19,8
Mittel	20,4	20,4
min	18,9	18,9
max	22,4	22,7

A 3 Variante 3: Keine Heizkörper in Klassen- und Vorbereitungsräumen

Anlage 18: Variante 3 – Vergleich Zuluft-Volumenströme, 7. – 13. Jan., D-2-008

Zuluft-Volumenströme [l/s]				
Variante 3: Raum D-2-008 (Vorbereitung ohne Belegung) 1. Woche nach Weihnachtsferien (7. - 13. Jan.)				
Datum	mit Überströmung aus Nachbarräumen		ohne Überströmung aus Nachbarräumen	
	Überströmung [l/s]	mechanische Zuluft [l/s]	Überströmung [l/s]	mechanische Zuluft [l/s]
7. Jan.	20,5	47,5	0,0	47,7
8. Jan.	27,0	25,4	0,0	30,0
9. Jan.	27,0	14,7	0,0	26,5
10. Jan.	27,0	8,3	0,0	19,7
11. Jan.	27,0	4,6	0,0	18,3
12. Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0
13. Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0
Mittel	18,7	14,4	0,0	20,3
Mittel*168 h	3.145,4	2.413,3	0,0	3.415,7
min	0,0	0,0	0,0	0,0
max	27,0	47,5	0,0	47,7

Anlage 19: Variante 3 – Raumluftqualität, 7. – 13. Jan., D-2-008

Raumluftqualität		
Variante 3: Raum D-2-008 (Vorbereitung ohne HK) 1. Woche nach Weihnachtsferien (7. -13. Jan.)		
Datum	CO ₂ - Gehalt [ppm]	relative Feuchte [%]
7. Jan.	587,7	30,1
8. Jan.	779,9	33,9
9. Jan.	868,4	42,6
10. Jan.	908,6	38,8
11. Jan.	931,3	35,0
12. Jan.	987,1	37,8
13. Jan.	975,3	38,6
Mittel	862,6	36,7
min	587,7	30,1
max	987,1	42,6

Anlage 20: Variante 3 – Raumluft- und operative Temperaturen, 7. Jan., D-2-005

Raumlufttemperaturen und operative Temperaturen [°C]		
Variante 3: Raum D-2-005 (Eckklasse 10 ohne HK) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]
1	18,2	17,3
2	19,5	18,3
3	19,8	18,6
4	20,0	18,8
5	20,3	19,0
6	20,5	19,2
7	20,7	19,4
8	20,9	19,8
9	21,5	20,9
10	21,8	21,3
11	21,3	20,8
12	21,3	21,2
13	21,2	20,9
14	20,9	20,5
15	21,6	21,6
16	21,8	21,8
17	21,1	20,8
18	19,4	19,3
19	18,9	18,9
20	18,7	18,7
21	18,5	18,5
22	18,4	18,4
23	18,3	18,3
24	18,1	18,1
Mittel	20,1	19,6
min	18,1	17,3
max	21,8	21,8

Anlage 21: Variante 3 – Wärmebilanz, 7. Jan., D-2-005

Wärmebilanz [W]									
Variante 3: Raum D-2-005 (Eckklasse 10 ohne HK) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)									
Stunde	mechan. Zuluft	Personen	elektrische Geräte	Wände und Zwischen- decken	Kunst- licht	Tages- licht	lokale Heiz- elemente	Fenster- flächen	Wärme- brücken
1	1.875,0	0,0	0,0	-1.588,8	0,0	0,0	0,0	-148,8	-11,9
2	2.155,6	0,0	0,0	-1.935,2	0,0	0,0	0,0	-156,1	-12,8
3	2.059,4	0,0	0,0	-1.921,7	0,0	0,0	0,0	-162,1	-13,3
4	2.050,7	0,0	0,0	-1.882,1	0,0	0,0	0,0	-170,2	-13,9
5	2.155,7	0,0	0,0	-1.900,8	0,0	0,0	0,0	-165,8	-13,5
6	2.112,4	0,0	0,0	-1.918,9	0,0	0,0	0,0	-163,5	-13,4
7	2.092,2	0,0	0,0	-1.904,2	0,0	0,0	0,0	-166,7	-13,6
8	1.687,1	671,8	0,0	-2.214,1	169,2	-0,8	0,0	-172,1	-13,9
9	176,1	2.644,1	0,0	-3.200,8	676,8	36,5	0,0	-173,2	-14,4
10	93,2	2.600,4	0,0	-3.245,2	672,2	140,0	0,0	-142,2	-13,9
11	1,5	1.705,5	187,1	-2.431,2	407,4	206,7	0,0	-104,0	-12,0
12	-712,4	2.514,7	443,1	-2.840,5	564,7	214,1	0,0	-89,7	-10,7
13	-466,3	1.913,0	4,5	-2.115,6	378,8	223,6	0,0	-74,4	-9,8
14	155,3	1.278,3	1,6	-1.799,2	316,2	208,0	0,0	-62,7	-8,6
15	-803,7	2.505,6	449,2	-2.836,8	668,6	193,7	0,0	-63,1	-8,1
16	-918,7	2.505,6	445,8	-2.694,2	676,8	99,3	0,0	-87,3	-8,2
17	-483,5	1.252,8	7,3	-1.182,5	338,4	9,0	0,0	-116,9	-9,1
18	-0,6	0,0	0,0	86,1	0,0	0,0	0,0	-129,6	-9,8
19	-0,5	0,0	0,0	138,4	0,0	0,0	0,0	-146,6	-11,0
20	-1,4	0,0	0,0	155,0	0,0	0,0	0,0	-155,6	-11,8
21	-0,5	0,0	0,0	157,8	0,0	0,0	0,0	-156,3	-11,8
22	-0,1	0,0	0,0	160,3	0,0	0,0	0,0	-158,1	-11,9
23	-0,1	0,0	0,0	165,0	0,0	0,0	0,0	-161,6	-12,2
24	-0,3	0,0	0,0	168,7	0,0	0,0	0,0	-164,0	-12,4
Mittel	551,1	816,3	64,1	-1.524,2	202,9	55,4	0,0	-137,1	-11,7
Mittel*24 h	13.226,0	19.592,0	1.538,5	-36.580,6	4.869,1	1.330,1	0,0	-3.290,8	-282,0
min	-918,7	0,0	0,0	-3.245,2	0,0	-0,8	0,0	-173,2	-14,4
max	2.155,7	2.644,1	449,2	168,7	676,8	223,6	0,0	-62,7	-8,1

Anlage 22: Variante 3 – Raumluftqualität, 7. Jan., D-2-005

Raumluftqualität		
Variante 3: Raum D-2-005 (Eckklasse 10 ohne HK) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	CO ₂ - Gehalt [ppm]	relative Feuchte [%]
1	400,0	30,2
2	400,0	25,3
3	400,0	24,6
4	400,0	22,2
5	400,0	22,4
6	400,0	24,0
7	400,0	23,0
8	450,3	22,9
9	988,3	28,1
10	1.094,0	30,2
11	911,8	31,6
12	1.056,5	35,0
13	1.044,8	35,8
14	678,0	31,6
15	1.051,4	34,8
16	1.095,5	35,8
17	1.082,1	36,5
18	1.064,0	40,0
19	1.063,6	41,1
20	1.063,0	41,7
21	1.062,4	42,1
22	1.062,1	42,5
23	1.061,8	42,8
24	1.061,6	43,1
Mittel	820,5	32,8
min	400,0	22,2
max	1.095,5	43,1

Anlage 23: Variante 3 – Fangers Komfortindex, 7. Jan., D-2-005

Fangers Komfortindex		
Variante 3: Raum D-2-005 (Eckklasse 10 ohne HK) 1. Tag nach Weihnachtsferien (7. Jan.)		
Stunde	PPD (Vorausgesagter Prozentsatz unzufriedener Personen) [%]	PMV (Vorausgesagtes mittleres Votum)
1	0,0	0,0
2	0,0	0,0
3	0,0	0,0
4	0,0	0,0
5	0,0	0,0
6	0,0	0,0
7	0,0	0,0
8	2,2	-0,1
9	7,6	-0,3
10	6,7	-0,3
11	4,5	-0,2
12	6,5	-0,2
13	5,1	-0,2
14	3,6	-0,1
15	6,0	-0,2
16	5,7	-0,2
17	3,0	-0,1
18	0,0	0,0
19	0,0	0,0
20	0,0	0,0
21	0,0	0,0
22	0,0	0,0
23	0,0	0,0
24	0,0	0,0
Mittel	2,1	-0,1
min	0,0	-0,3
max	7,6	0,0

Anlage 24: Variante 3 – Temperaturvergleich, 7. – 13. Jan., D-2-008 und D-E-011

Temperaturvergleich [°C]				
Variante 3: Raum D-2-008 und D-E-011 (Vorbereitung ohne Belegung) 1. Woche nach Weihnachtsferien (7. - 13. Jan.)				
Datum	Vorbereitung 2. OG D-2-008		Vorbereitung EG D-E-011 (Eckraum)	
	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]	Mittlere Lufttemperatur [°C]	Operative Temperatur [°C]
7. Jan.	19,9	19,5	17,9	17,4
8. Jan.	19,7	19,6	17,6	17,4
9. Jan.	20,1	20,0	18,1	18,0
10. Jan.	20,4	20,3	18,4	18,3
11. Jan.	20,5	20,4	18,6	18,5
12. Jan.	19,6	19,6	17,4	17,6
13. Jan.	19,2	19,2	17,1	17,3
Mittel	19,9	19,8	17,9	17,8
min	19,2	19,2	17,1	17,3
max	20,5	20,4	18,6	18,5