

Begleituntersuchung

zur Überarbeitung der Energieleitlinie Stadt Gütersloh

Projekt: 23-1048 Begleituntersuchung Energieleitlinie

Auftraggeber: Stadt Gütersloh
Berliner Str.
33330 Gütersloh

Auftragnehmer:

**BRÖCKLING
VULLHORST**
ingenieure

Josef-Förster-Straße 4
33161 Hövelhof

T 05257 9822-0

F 05257 9822-22

E info@bv-ingenieure.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Normen und Vorschriften	3
3.	Grundrisse.....	4
4.	Beschreibung der Varianten	6
4.1	Heizsystem.....	6
4.2	Varianten A	6
4.3	Varianten B	8
5.	Berechnungsgrundlagen	9
5.1	Allgemein	9
5.2	Energiebedarf.....	10
5.3	Kosten-/Wirtschaftlichkeitsberechnung	10
5.4	Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus (Ökobilanz).....	12
6.	Ergebnisse	13
6.1	Thermische Gebäudehülle und Energiebedarf	13
6.2	Kosten und Wirtschaftlichkeit	18
6.3	Treibhausgasemissionen	24
6.4	Kosten CO ₂ -Einsparung.....	27
7.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	29
8.	Empfehlung für die Energieleitlinie.....	30

1. Einleitung

In der heutigen Zeit ist es wichtiger denn je, den Energieverbrauch nachhaltig und wirksam zu senken und vermeidbare Umweltbelastungen zu minimieren. Deshalb ist es sinnvoll auch bestehende Regelungen und Richtlinien zu hinterfragen und gegebenenfalls den aktuellen Randbedingungen anzupassen.

Im Auftrag der Stadt Gütersloh werden verschiedene energetische Gebäudestandards in Bezug auf Energiebedarf, Wirtschaftlichkeit und CO₂-Emissionen für zu errichtende Nichtwohngebäude verglichen. Ziel dieser Ausarbeitung ist es Grundlagen für eine Neufassung der Gebäudeleitlinie 2018 zu erarbeiten. Die Gebäudeleitlinie legt u.a. die Anforderungen an den einzuhaltenden energetischen Standard von Neubauten fest.

Als Basisvariante wurde der KfW-Effizienzhaus-Standard-40 vereinbart. Im Vergleich zu der Basisvariante wird der Passivhausstand (Heizwärmebedarf 15 kWh /m²*a) sowie eine Variante mit Heizbedarf von 20 kWh /m²*a entsprechend Passivhausberechnung untersucht. Hierbei sollen verschiedene mögliche Heizsysteme Berücksichtigung finden. Als Wärmeübergabesystem wurde eine Fußbodenheizung festgelegt.

Zunächst wird ein Konzept für ein Effizienzgebäude-40 entwickelt. Diese Gebäude wird anschließend in der Passivhaus-Berechnungssoftware (PHPP) bilanziert und dient als Vergleichsbasis für die weiteren Betrachtungen.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wird eine Empfehlung für den einzuhaltenden Energiestandard bei Neubauten unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten gegeben.

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, wurden vom Auftraggeber Pläne eines Schulgebäudes zur Verfügung gestellt, die als Grundlage für die Berechnungen dienten. Über die Nutzung als Schulgebäude hinaus soll auch die Nutzung Kindergarten und Büro betrachtet werden.

Für die Nutzungen Schulgebäude und Kindergarten ist die Lüftungsanlage in allen Varianten vorgegeben. Damit wird den in der Pandemie gemachten Erfahrungen sowie den gestiegenen hygienischen Ansprüchen Rechnung getragen.

Um den Effekt der Lüftungsanlage zu beurteilen, wurde als Ergänzung auch das Schulgebäude als Effizienzgebäude-40 ohne Lüftungsanlage nachträglich untersucht.

Die abschließende Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt wie in der aktuelle Energieleitlinie vorgegeben nach DIN 2067.

Für die Kostenschätzung für KG 300 war das Architekturbüro architektur-werk-stadt aus Paderborn und für die KG 400 das Ingenieurbüro ConTec GmbH aus Gütersloh unterstützend tätig gewesen.

Die Bewertung der Treibhausgasemissionen erfolgt nach den Vorgaben „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG)“ des Bundes.

Die detaillierte Berechnungsergebnisse sind im Anhang beigefügt.

2. Normen und Vorschriften

- Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2020;
- KfW-Merkblatt 261; KfW-FAQs; DIN 18599
- Passivhausberechnungen: PHPP_V10.5
- Wirtschaftlichkeitsberechnung: VD 2067 Blatt1: 2012-09
- Treibhausgasemissionen im Gebäudelebenszyklus:
QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-311_LCA_Bilanzregeln-WNG_v1-3

3. Grundrisse

Das Gebäude ist ein 3-geschossiges unterkellertes Gebäude mit Flachdach und in Massivbauweise. Das Gebäude verfügt über eine beheizte Nettogrundfläche (DIN 277) von 1.574,74 m².

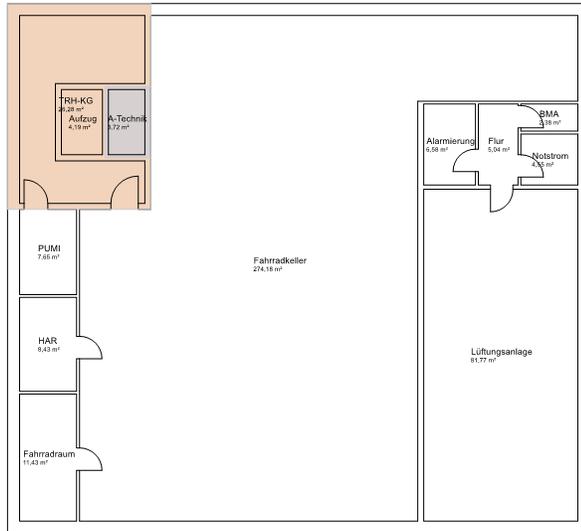


Abbildung 1 : Kellergeschoss

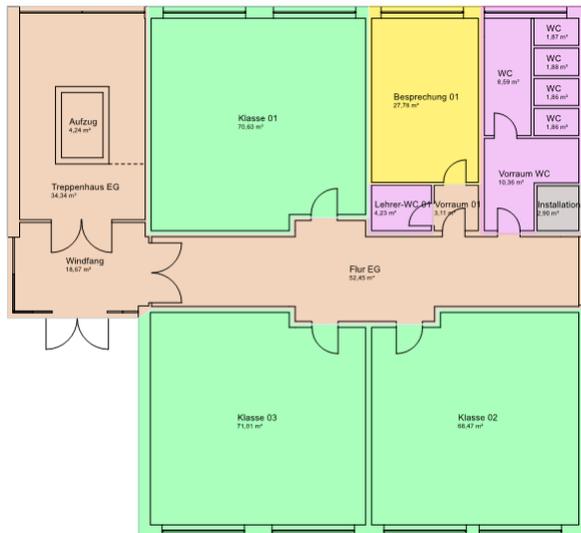


Abbildung 2: Erdgeschoss

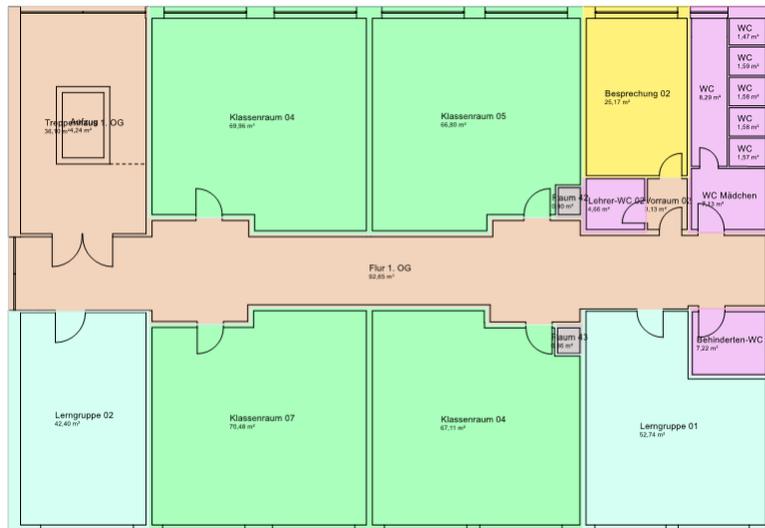


Abbildung 3: 1. Obergeschoss

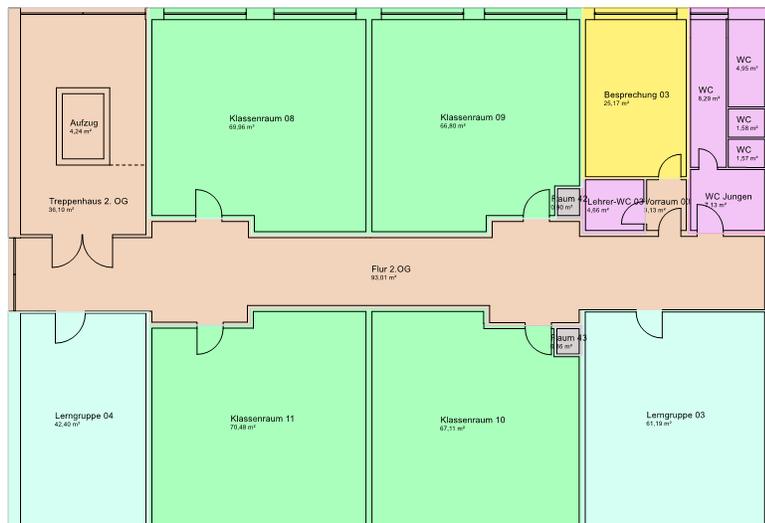


Abbildung 4: 2. Obergeschoss

Zone 1 - Klassenzimmer	8. Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergarten)	2237,9	764,39	48,5
Zone 2 - Lerngruppe	8. Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergarten)	580,56	200,48	12,7
Zone 3 - Besprechung	4. Besprechung/Sitzungszimmer/Seminar	232,14	79,08	5,0
Zone 4 - WC-Sanitär	16. WC und Sanitärräume in Nichtwohngebäuden	284,24	96,68	6,1
Zone 5 - Verkehrsflächen	19. Verkehrsfläche	1215,77	423,53	26,9
Zone 6 - Technik	20. Lager, Technik, Archiv	29,07	10,58	0,7

Abbildung 5: Legende Zonierung nach DIN 18599

4. Beschreibung der Varianten

4.1 Heizsystem

Alle nachstehend beschriebenen Varianten werden mit folgenden Heizsystemen berechnet:

- Luftwärmepumpe
- Erdwärmepumpe
- Pelletkessel
- Nahwärme durch Bestandsheizung mit Erdgas-Brennwertkessel
- Nahwärme durch Bestandsheizung mit Pelletkessel (Anteil 70 %) und Erdgas- Brennwertkessel als Spitzenlastkessel

4.2 Varianten A

Die energetischen Qualitäten der Gebäudehülle der Varianten A2-A6 bzw. B2-B4 werden im Vergleich zur Basisvariante so optimiert, dass der angestrebte Heizwärmebedarf der Variante erreicht wird.

4.2.1 Variante A-1: EG-40

Im Vergleich der Gebäude wurde als Basisvariante ein Effizienzgebäude-40 (EG-40) für Nichtwohngebäude betrachtet. Hierfür wurde ein energetisches Konzept nach den Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) und der KfW entwickelt. Anschließend wird das Gebäude mit den gleichen Parametern in das Passivhaus-Projektierung Paket (PHPP) eingegeben und bilanziert.

Das EG-40 stellt gegenüber den gesetzlichen Mindeststandard eine deutliche Erhöhung des energetischen Niveaus dar und ist neben der Erfüllung weiterer Vorgaben die aktuelle Fördervoraussetzung der „Bundesförderung effiziente Gebäude im Rahmen der Errichtung Klimafreundlicher Neubauten (KfN)“.

Dieser Standard wurde auch als Basisniveau gewählt, da durch die angekündigte Novelle des Gebäudeenergiegesetzes eine Verschärfung der öffentlich-rechtlichen Anforderungen an den Wärmeschutz avisiert ist.

Aufgrund unterschiedlicher Vorgaben ist das Niveau der energetische Gebäudehülle des Effizienzgebäude-40 von Nichtwohngebäude mit dem KfW-55-Standard von Wohngebäude vergleichbar.

Die Berücksichtigung eine CO₂-Regelung für die Lüftungsanlage wird entsprechend der aktuellen Vorgaben der Gebäudeleitlinie bewusst gewählt.

4.2.2 Variante A-2: PH-15 kWh

Für diese Variante wird die Variante A-1 so geändert, dass bei der Nutzung als Schule mit Ganztagesbetrieb (Weiterführende Schule) alle Kriterien an ein Passivhaus erfüllt werden.

Das betrifft den Heizwärmebedarf 15 kWh/m²a, Gebäudedichtheit n₅₀= 06 1/h und ebenfalls die Anforderung an den Primärenergiebedarf bei allen abgebildeten Heizsystemen. Die Wärmebrücken insbesondere zum Keller ändern sich durch die erhöhten Dämmdicken und zusätzlicher Dämmung unterhalb der Kellerdecke und werden angepasst.

4.2.3 Variante A-3: PH-20 kWh

Bei dieser Variante wurde im Vergleich zu A-2 der Grenzwert von 15 kWh Heizwärme nach PHPP um 33 % auf 20 kWh angehoben. Die Passivhauskriterien werden damit **nicht** erfüllt.

4.2.4 Variante A-4: PH-15-Halbtagsbetrieb

In dieser Betrachtung wird abweichend von Variante A-2 die Nutzung als Grundschule im Halbtagesbetrieb (Nutzungsende 14 Uhr) untersucht. Im Gegensatz zu den festen Berechnungsvorschriften der GEG-Berechnung hat die reduzierte tägliche Nutzungsdauer Einfluss auf das Ergebnis der Passivhausberechnung. Über die Anpassung der thermischen Gebäudehülle wird weiter der Passivhausstandard mit einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/m²a erfüllt wird.

4.2.5 Variante A-5: PH-15-CO₂-Regelung

In dieser Variante werden die Auswirkungen eine Lüftungsanlage ohne eine CO₂-Regelung untersucht.

4.2.6 Variante A-6:PH-15-Büro

Die Nutzung des Gebäudes wird in dieser Version in Büronutzung geändert. Dafür wird die Mitarbeiterzahl anhand der mittleren Belegungsdichte bei Büronutzung nach DIN 18599-10 umgerechnet und entsprechend weitere Anpassung an interne Wärmegewinne und Luftvolumenströme vorgenommen. Eine CO₂-Regelung für die Lüftungsanlage wird nicht berücksichtigt.

4.2.7 Variante A-7:EG-40-Büro-ohne Lüftungsanlage

Bei dieser Variante wird das Gebäude mit Büronutzung ohne Lüftungsanlage bilanziert. Die thermische Hülle entspricht dem Effizienzgebäude-40 (A-1).

4.2.8 Variante A-8:EG-40-Schule-ohne Lüftungsanlage

Bei dieser nachträglich ergänzten Variante wird das Gebäude mit Schulnutzung ohne Lüftungsanlage bilanziert. Die thermische Hülle entspricht dem Effizienzgebäude-40 (A-1).

4.3 Varianten B

Für die Varianten B wird das Gebäude der Varianten A verkleinert. Dabei entfällt das 2. Obergeschoss und der Keller. Hierdurch verändert sich das Verhältnis der Hüllfläche zur Energiebezugsfläche, was Auswirkung auf den Heizwärmebedarf hat. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde die Höhe der verschattungsgebenden Gebäude um eine Geschosshöhe reduziert.

Die Energiebezugsfläche reduziert sich hierdurch von 1.333 m² auf 835 m² und die Nettogrundfläche von 1.575 auf 966 m².

Im Rahmen von Energieleitlinien anderer Kommunen werden z.T. für kleinere Gebäude bis 500 m² BGF geringere Anforderungen gestellt.

4.3.1 Variante B-1: EG-40

Diese Variante entspricht dem Berechnungsansatz der Variante A-1. Zur Erreichung des EG-40-Niveaus hätte die Hülle minimal geringer gedämmt werden können. Hierauf wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit verzichtet. Die energetische Qualität der Fenster und die Dämmdicken entsprechen denen der Variante A-1. Der Dämmwert der Bodenplatte orientiert sich an der Kellerdecke.

4.3.2 Variante B-2: PH-15 kWh

Diese Variante entspricht der Variante A-2. Das Gebäude B wurde als Passivhaus mit einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/m²a berechnet. Hierfür wurde der Wärmeschutz deutlich erhöht.

4.3.3 Variante B-3: PH-20 kWh

Diese Variante entspricht ebenfalls der Variante A-3.

Der Heizwärme wird von 15 kWh (Passivhaus) auf 20 kWh nach PHPP angehoben. Der Passivhausstandard wird **nicht** erfüllt.

4.3.4 Variante B-4: PH-15

Bei dieser Untersuchungsvariante wurde das Gebäude B-2 für die Nutzung Kindergarten modifiziert und bilanziert. Eine CO₂-Regelung für die Lüftungsanlage wurde bewusst nicht berücksichtigt, da diese in Kindergärten in der Regel bisher keine Anwendung findet.

5. Berechnungsgrundlagen

5.1 Allgemein

Für die Basisvariante A-1 wurde zunächst das Gebäude als KfW-Effizienzgebäudes (EG-40) konzipiert. Hierfür wurde das Gebäude nach DIN 18599-1 zoniert und ein Gebäudekonzept entwickelt, dass die Grenzwerte an die mittleren U-Werte und an den Primärenergiebedarf eines EG-40 einhält. Um die Anforderungen an den Primärenergiebedarf zu erfüllen, wurde als Heizsystem eine Luftwärmepumpe mit einer 18,6 kWp großen PV-Anlage gewählt. Die PV-Anlage ist so bemessen, dass der EG-40-Standard auch bei Wegfall der Lüftungsanlage erreicht wird.

In der Passivhausbetrachtung hat die PV-Anlage keinen Einfluss auf die Erreichung des Passivhausstandards. Erst bei den neu eingeführten Labels wie das Passivhaus Premium ist die Nutzung einer PV-Anlage von Relevanz.

Da in dem Gebäudegrundriss im Keller ein großer Fahrradkeller enthalten ist, wird der Keller bis auf das Kellertreppenhaus als unbeheizt definiert. Hierdurch entstehen Wärmebrücken beim Übergang zum Keller. Die Wärmebrücken zum unbeheizten Keller werden mit einem Wärmebrückenprogramm berechnet und entsprechend ihrer Längen berücksichtigt. Gesamtenergetisch und ökologisch betrachtet ist ein kalter Keller, zumal bei einem Fahrradkeller von einem hohen Luftwechsel ausgegangen werden muss, die vorteilhaftere Lösung.

Für die solaren Gewinne wird die tatsächliche Verschattungssituation des Standortes bewertet. Für die Variante B wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit die Verschattung an Gebäude A angepasst, so dass der solare Gewinnfaktor annähernd konstant bleibt.

Für alle Varianten wurde die für ein Passivhaus erforderliche Luftdichtheit von $n_{50}=06$ 1/h berücksichtigt.

Ein Warmwasserbedarf wurde nicht angesetzt.

Für den Strombedarf der Lüftungsanlagen wurde ein Ganzjahresbetrieb zu Grunde gelegt.

Zur Ermittlung der internen Gewinne gibt das Passivhausinstitut für die Nutzung Schule und Büro Standardwerte vor. Diese wurden verwendet. Für die Nutzung Schule der Primarstufe und Kindergarten wurden die internen Gewinne nach den Berechnungsvorgaben detailliert abgebildet und weichen von den Standardwerten für z.B. Schulnutzung ab.

5.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf wird aus der Heizwärmebedarf nach Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) für alle Varianten mit den folgenden Jahresarbeitszahlen bzw. Jahresnutzungsgrade berechnet.

Der Ansatz der Jahresarbeitszahlen wurde unter Berücksichtigung eines Nacherhitzers der Lüftungsanlage gewählt.

Wärmerzeuger	Jahresarbeitszahl
Luft-Wärmepumpe	3,3
Erdwärmepumpe (Sonde)	4,3
Jahresnutzungsgrad	
Pelletkessel Neuanlage	85%
Erdgas-Brennwertkessel Bestandsanlage HS	90%
Pelletkessel Bestandsanlage	80%

Tabelle 1: Wirkungsgrade Wärmezeugung

5.3 Kosten-/Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 erfolgt für ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und die Nutzungsdauer der Bauteile wurde entsprechend der aktuellen Energieleitlinie der Stadt mit 40 Jahren zu Grunde gelegt und die Nutzungsdauer der Lüftungsanlagen ergibt sich aus der VDI-Richtlinie. Die Berechnung erfolgt mit Bruttokosten.

Im Rahmen der Untersuchung erfolgt eine Differenzkostenbetrachtung im Vergleich zur Bezugsvariante. Dafür werden z.B. die Mehrkosten durch höhere Dämmdicken und bessere energetische Fensterqualität (Kostengruppe 300) sowie die Mehr- bzw. Minderkosten der Technischen Gebäudeausrüstung (Kostengruppe 400) gegenüber der Basisvariante berechnet. Mit zunehmendem Wärmeschutz sinkt die Heizlast des Gebäudes und die zu installierende Nennleistung des Erzeugers im Rahmen eines Neubaus.

Die sich daraus ergebenden Änderungen Planungskosten (Kostengruppe 700) werden mit den nachstehenden prozentualen Honoraren berücksichtigt. Die Kosten für die Passivhausberechnung werden dabei pauschal berücksichtigt.

Für die Kosten KG 300 werden auch Mehrkosten für die Erhöhung der Attika bei Notwendigkeit einer stärkeren Flachdachdämmung sowie die Mehraufwendungen für Attikaabdeckung, Fensterbänke, Laibungen und Sturzausbildung nach Erhöhung Außenwanddämmstärke berücksichtigt.

Parameter VDI 2067	%
Zinssatz Investitionskosten	3,03
Inflation	2,0
Energiepreissteigerung Strom, Pellet	4 und 5
Energiepreissteigerung Erdgas	5 und 6

Tabelle 2: Parameter Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die zu Grunde gelegten Energiekosten und der kalkulatorische Zinssatz wurden bei der Stadt Gütersloh abgefragt. Der Mehrwertsteuersatz für Erdgas wird abweichend vom heutigen Stand (7%) mit 19 % berücksichtigt.

Energiepreis	Brutto €/kWh
Strom	0,356
Pellet	0,076
Erdgas	0,057

Tabelle 3: Energiekosten

Planungskosten	
Planungskosten KG 300	12%
Planungskosten KG 400	15%
Passivhausnachweis	pauschal

Tabelle 4: Planungsleistungen

Die spezifischen Kosten für die Änderungen der Gebäudehülle sowie die detaillierten Kosten für die Lüftungsanlage sind dem Anhang (Einzel-Ergebnisse) zu entnehmen. Für den umbauten Raum Keller wurde Bruttokosten von 410 €/m³, für die Erhöhung der Geschosshöhe Bruttokosten von 458 €/m³ zu Grunde gelegt.

Für die Kosten der Wärmeerzeuger wurden der Erzeuger und ggf. die Erdwärmesonde berücksichtigt, jedoch nicht die Gesamtkosten inklusive Speicher und ggf. das Austragsystem für Pellets, da die Abhängigkeit dieser Anlagenteile von der Nennleistung gering ist.

Um die Mehrkosten in Relation zu den Bauwerkskosten zu setzen, wurden die Bauwerkskosten (Kostengruppe 300+400) mit dem BKI-Index für 2023 ermittelt. Der BKI-Wert für allgemeinbildenden Schule in 2023 bezogen auf Bruttogeschossfläche (BGF) beträgt im Mittel 2.575 €/m².

	BRI	BKI Index	Kosten
Kellergeschoss	1337,14 m ³	400 €/m ³	534.856 €
	BGF		
Erdgeschoss	451,13 m ²	2.575 €/m ²	1.161.660 €
1. Obergeschoss	655,67 m ²	2.575 €/m ²	1.688.350 €
2. Obergeschoss	655,67 m ²	2.575 €/m ²	1.688.350 €
Summe			5.073.216 €

Tabelle 5: Gebäudekosten nach BKI für Variante A

5.4 Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus (Ökobilanz)

CO ₂ -Emissionen	kg/kWh
Strombedarf Heizung Luft-WP	0,5320
Strombedarf Heizung Erd-WP	0,5320
Pelletbedarf	0,0211
Erdgas (Bestandsanlage) HS	0,2348

Tabelle 6: CO₂-Emissionen Energieträger

CO ₂ -Emissionen	kg/m ³
EPS-Dämmung Flachdach (WLS 035)	134,70
Steinwolle Dämmung (WLS 035) (Fassade VHF, WDVS)	123,31
Perimeterdämmung XPS	214,55
Verzinktes Stahlblech	2,676 kg/kg
Lüftungsgerät bis 5000 m ³ /h WRG	1.462,3 kg/Gerät
Lüftungsgerät bis 10000 m ³ /h WRG	2.819,7 kg/Gerät

Tabelle 7: CO₂-Emissionen Baustoffe

Für die Maßnahmen Flachdachdämmung, Außenwanddämmung und Perimeterdämmung der Kelleraußenwand wurde entsprechend den Vorgaben für den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ein Ersatzzyklus berechnet. Für Lüftungsgeräte sind 2 Ersatzzyklen zu berücksichtigen. Da Lüftungskanäle in den Bilanzierungsregeln der Ökobilanz über einen Sockelbetrag pauschalier erfasst werden, sind hierfür keine Ersatzzyklen definiert. Es wird daher in Anlehnung an die Lebensdauer von 30 Jahren bei Lüftungskanälen laut VDI 2067 auch hierfür ein Ersatzzyklus berücksichtigt.

6. Ergebnisse

6.1 Thermische Gebäudehülle und Energiebedarf

6.1.1 Gebäude A

In der nachstehenden Tabelle werden die Ergebnisse der erforderlichen Dämmstärken, Heiz- und Endenergiebedarf sowie den wichtigsten Berechnungsparametern dargestellt.

Variante		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
		Schule EG-40	Schule PH-15	Schule PH-20	Schule Halbtags. PH-15	Sch. ohne CO ₂ -Reg. PH-15	Büro PH-15	Büro ohne Lüft. EG-40	Schule ohne Lüft. EG-40
Heizwärmebedarf	kWh/m ² a	20,9	15,0	19,9	15,0	15,0	15,0	35,2	49,7
Heizwärmebedarf	kWh/a	27.868	20.001	26.535	20.001	20.001	20.001	46.936	66.270
Strombedarf Lüftung Winter	kWh/a	4.219	4.219	4.219	2.588	5.915	2.717	0	0
Strombedarf Lüftung Sommer	kWh/a	3.476	3.476	3.476	2.132	4.873	2.238	0	0
Nettogrundfläche	m ²	1.575	1.575	1.575	1.575	1.575	1.575	1.575	1.575
Energiebezugsfläche PHPP	m ²	1.333	1.333	1.333	1.333	1.333	1.333	1.333	1.333
Therm. Hüllfläche	m ²	2.546	2.546	2.546	2.546	2.546	2.546	2.546	2.546
Nettovolumen	m ³ /h	5.037	5.037	5.037	5.037	5.037	5.037	5.037	5.037
Auslegungsvolumenstrom Lüftungsanlage	m ³ /h	10.500	10.500	10.500	10.500	12.460	3.600	-	-
A _{Hüllfläche} /A _{Energiebezugsfläche PHPP}	m ² /m ²	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
A _{Hüllfläche} /V _{netto}	m ² /m ³	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
n50	1/h	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
mittlerer Luftwechsel Lüftungsanlage	m ³ /h	0,50	0,50	0,50	0,31	0,70	0,32	0,32*	0,50*
Interne Gewinne	W/m ² a	3,2	3,2	3,2	2,4	3,2	3,5	3,5	3,2
WRG Lüftungsanlage	%	84	84	84	84	84	84	-	-
Endenergiebedarf		Absolut	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz
Strom Heizung Luft-WP	kWh/a	8.445	-2.384	-404	-2.384	-2.384	-2.384	5.778	11.637
Strom Heizung Erd-WP	kWh/a	6.481	-1.830	-310	-1.830	-1.830	-1.830	4.434	8.931
Pellet	kWh/a	32.786	-9.255	-1.569	-9.255	-9.255	-9.255	22.432	45.179
Erdgas (Bestandsanlage) HS	kWh/a	30.965	-8.741	-1.482	-8.741	-8.741	-8.741	21.186	42.669
Pellet (Bestandsanlage) Anteil 70 %	kWh/a	24.385	-6.884	-1.167	-6.884	-6.884	-6.884	16.684	33.602
Erdgas (Spitzenlast) Anteil 30% Hs	kWh/a	9.289	-2.622	-444	-2.622	-2.622	-2.622	6.356	12.801
Pellet (Bestandsanlage) HS	kWh/a	33.674	-9.506	-1.611	-9.506	-9.506	-9.506	23.040	46.402
Strom Lüftungsanlage Ganzjahresbetrieb	kWh/a	7.695	0	0	-2.975	3.093	4955**	-4.955	-7.695
Dämmung									
Flachdach Dämmung i.M. (WLS 035)	mm	220	290	260	320	340	265	220	220
Außenwand Dämmung (WLS 035)***	mm	180	260	180	260	260	200	180	180
Kragdecke unterseitig (WLS 035)	mm	80	120	100	140	160	80	80	80
Kellerdecke unterseitig (WLS 035)	mm	0	75	0	100	125	0	0	0
KG-Trennwand TRH zu unbeheizt (WLS 035)	mm	75	150	75	100	175	100	75	75
KG-Außenwand TRH zu Erdr. (WLS 044)	mm	100	160	100	160	200	120	100	100
KG-Sohle TRH unterseitig (WLS 044)	mm	0	120	0	140	140	80	0	0
Aufzugsunterfahrt-Außenwände (WLS 044)	mm	60	120	60	140	140	120	60	60
Aufzugsunterfahrt-Sohle (WLS 044)	mm	60	120	60	140	140	120	60	60
Fenster	W/m ² K	1,0	0,86	1,0	0,86	0,80	0,86	1,0	1,0
Pfosten-Riegelkonstruktion	W/m ² K	1,0	0,86	1,0	0,86	0,86	0,86	1,0	1,0
Eingangstür	W/m ² K	1,6	1,1	1,6	1,1	1,1	1,1	1,6	1,6
Kellertüren	W/m ² K	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6
alternativ Außenwanddämmung in WDVS	mm	160	220						

* Fensterlüftung

** absoluter Wert

*** Vorhangsfassade mit Wärmebrückenaufschlag Metall-Unterkonstruktion bzw. Holzanteil=0,02 W/m²K

Tabelle 8: Gebäude A – Thermische Gebäudehülle u. Energiewärmebedarf

Variante A-1

Das Effizienzgebäude-40 (Basisvariante) mit Nutzung als weiterführende Schule weist im Passivhausprojektierungspaket bilanzierten Heizwärmebedarf von 20,9 kWh/m²a auf. Der Heizwärmebedarf des Gebäudes wird durch die thermische Hülle des EG-40-Gebäudes und die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung geprägt. Der Energiebedarf für eine Luftwärmepumpe beträgt 8.445 kWh/a Strom gegenüber 30.965 kWh/a Erdgas bei der Wärmeversorgung über eine Bestandsanlage mit Gas-Brennwertkessel.

Variante A-2

Für das Passivhaus mit 15 kWh/m²a müssen die Dämmschichten deutlich erhöht und die thermische Qualität der Fenster verbessert werden. Die jährliche Stromeinsparung durch den verminderten Heizwärmebedarf beträgt im Vergleich zum Effizienzgebäude-40 bei Luftwärmepumpe als Erzeuger 2.384 kWh/a. Die Einsparung an Erdgas bei Anbindung an eine erdgasbetriebene Bestandsheizungsanlage beträgt 9.255 kWh/m²a. Die prozentuale Einsparung beträgt knapp 30 % vom EG-40-Gebäude.

Variante A-3

Um den Heizwärmebedarf der Variante A-3 von 20 kWh/m²a zu erzielen, genügen moderate Dämmstärkenerhöhungen beim Flachdach und der Kragdecke in Bezug zur Basisvariante aus.

Variante A-4

Bei der Variante A-4 wird betrachtet, welche Auswirkung die Nutzung des Schulgebäudes einer Grundschule im Halbtagsbetrieb auf den Passivhausstandard und dessen Wirtschaftlichkeit hat. Hierfür wurde die Absenkung der durchschnittlichen Innentemperatur um 0,2 °C berücksichtigt. Durch die reduzierte Nutzungszeit und der geringere Bedarf aufgrund der jüngeren Schüler reduziert sich der mittlere Luftwechsel der Lüftungsanlage und somit die Lüftungswärmeverluste. Dies wirkt sich günstig auf die Energiebilanz aus. Da sich jedoch auch die internen Wärmegewinne reduzieren muss die Dämmung zur Erreichung des Passivhausstandard gegenüber der Variante A-2 dennoch weiter erhöht werden.

Variante A-5

Wird wie in dieser Variante auf eine CO₂-Regelung der Lüftungsanlage verzichtet, steigt der mittlere Luftwechsel deutlich von 0,50 1/h auf 0,70 1/h. Damit steigen die Lüftungsverluste an. Um den Passivhausstandard zu erreichen, muss die Dämmung dies kompensieren und die Anforderung an die energetische Hülle steigt im Vergleich zur Variante A-2 deutlich. Durch den höheren mittleren Luftwechsel erhöht wiederum sich der Strombedarf für die Lüftung (+3.093 kWh/a). Dieser Wert übersteigt sogar die Stromeinsparung einer Luftwärmepumpe im betrachteten Gebäude mit Passivhausstandard (2.384 kWh/m²a Einsparung A-2 zu A-1).

Daher ist eine CO₂-Regelung für die Lüftungsanlage aus energetischer Sicht sinnvoll und somit zu empfehlen, diese Anforderung in der Gebäudeleitlinie beizubehalten.

Variante A-6

Wird das Gebäude als Bürogebäude genutzt sinkt der Dämmaufwand im Vergleich zur Schulunutzung zur Erreichung des Passivhauses erheblich. Ursächlich hierfür sind die höheren internen Gewinne (Standardwert nach PHPP) und der geringere mittlere Luftwechsel aufgrund einer geringeren Personenanzahl. Bei dieser Variante wurde keine CO₂-Regelung angesetzt, da hier Aufwand und Nutzen in keinem Verhältnis stehen.

Mit dem Wärmeschutz des EG-40-Gebäudes (A-1) würde der Heizwärmebedarf 17,8 kWh/m²a betragen.

Variante A-7

Hier wird das Bürogebäude des EG-40 jedoch ohne Lüftungsanlage betrachtet. Der Heizwärmebedarf steigt hierdurch von 17,8 kWh/m²a auf rund das Doppelte (35,2 kWh/m²a). Der gleiche Luftwechsel wurde unterstellt. Gleichzeitig entfällt der Strombedarf für die Lüftungsanlage. Die Luftwärmepumpe weist einem Mehrbedarf von 7.030 kWh/a auf, die Einsparung Strom durch die nicht vorhandene Lüftungsanlage beträgt 4.955 kWh/a. Es verbleibt ein Strommehrbedarf von 2.075 kWh/a. Es zeigt somit, dass die Variante bei Kombination mit einer Lüftungsanlage energetisch vorteilhaft ist. Der Strommehrbedarf aufgrund der höheren Effizienz der Erdwärmepumpe durch den Wegfall der Lüftungsanlage nur noch 440 kWh/a.

Bei einer Anbindung an eine bestehende Erdgasheizung werden rund 21.000 kWh/a mehr Erdgas benötigt.

Variante A-8

Ohne Lüftungsanlage steigt der spezifische Heizenergiebedarf von 20,9 auf 49,7 kWh/m²a und in absoluten Werten von 27.868 auf 66.270 kWh/a. Damit erhöht sich der Heizwärmebedarfes um mehr als das Doppelte.

Gleichzeitig wird 7.695 kWh/a Strom der Lüftungsanlage eingespart.

Für die Erdwärmepumpe beträgt der Mehrbedarf Strom für Heizung 11.637 kWh/a, nach Abzug der Stromeinsparung für die entfallende Lüftungsanlage bleibt ein Mehrbedarf von 3.942 kWh/a für die Luftwärmepumpe sowie von 1.236 kWh/a für die Erdwärmepumpe.

Für eine Erdgas-Bestandanlage beträgt der Mehrbedarf 42.699 kWh/a Erdgas und die Stromeinsparung von 7.695 kWh/a.

Energetisch sinnvoller ist es, die Lüftungsanlage nur in der Heizperiode zu betreiben. Andere Gründe wie Schallschutz und Nutzereinbindung in verschiedenen Lüftungsstrategien sprechen dagegen. Hinzu kommt, dass je nach Anlagenkonzept, dann für die Be- und Entlüftung der Sanitärbereiche eine eigene Lüftungsanlage erforderlich sein kann. Die Stromeinsparung durch Wegfall der Lüftungsanlage beträgt bei Heizperiodenbetrieb 4.129 kWh/a. In der weiteren Bewertung der Vergleichsvariante wird von einem Ganzjahresbetrieb ausgegangen.

6.1.2 Gebäude B

Das Gebäude wird von 3 auf 2 Geschosse verkleinert. Hierdurch erhöht sich das Verhältnis der wärmetauschenden Gebäudehülle zur Energiebezugsfläche von 1,9 auf 2,5 m²/m². Der gestiegene Wärmeverlust muss zur Erreichung des Passivhausstandards durch ein Mehr an Dämmung ausgeglichen werden. In der Effizienzhausberechnung nach GEG gibt es diesen Effekt (je kleiner das Gebäude wird, je mehr muss gedämmt werden) aufgrund der Grenzwermittlung mittels Referenzgebäudeverfahrens nicht.

Variante		B-1	B-2	B-3	B-4
		Schule EG-40	Schule PH-15	Schule PH-20	PH-15 Kita PH-15
Heizwärmebedarf	kWh/m ² a	26,2	15,0	20,0	15,0
Heizwärmebedarf	kWh/a	21.874	12.524	16.698	12.524
Strom Lüftung Winter	kWh/a	2.689	2.689	2.689	2.334
Strom Lüftung Sommer	kWh/a	2.215	2.215	2.215	1.922
Nettogrundfläche	m ²	966	966	966	966
Energiebezugsfläche PHPP	m ²	835	835	835	835
Therm. Hüllfläche	m ²	2.102	2.102	2.102	2.102
Nettovolumen	m ³ /h	3.069	3.069	3.069	3.069
Auslegungsvolumenstrom Lüftungsanlage	m ³ /h	6.600	6.600	6.000	4.000
$A_{\text{Hüllfläche}}/A_{\text{Energiebezugsfläche PHPP}}$	m ² /m ²	2,5	2,5	2,5	2,5
$A_{\text{Hüllfläche}}/V_{\text{netto}}$	m ² /m ³	0,68	0,68	0,68	0,68
n50	1/h	0,6	0,6	0,6	0,6
mittlerer Luftwechsel Lüftungsanlage	m ³ /h	0,51	0,51	0,51	0,44
Interne Gewinne	W/m ² a	3,2	3,2	3,2	2,5
WRG Lüftungsanlage	%	84	84	84	84
Endenergiebedarf		Absolut	Differenz	Differenz	Differenz
Strom Heizung Luft-WP	kWh/a	6.629	-2.834	-1.569	-2.834
Strom Heizung Erd-WP	kWh/a	5.087	-2.175	-1.204	-2.175
Pellet	kWh/a	25.735	-11.001	-6.090	-11.001
Erdgas (Bestandsanlage) HS	kWh/a	24.305	-10.390	-5.752	-10.390
Pellet (Bestandsanlage) Anteil 70 %	kWh/a	19.140	-8.182	-4.529	-8.182
Erdgas (Spitzenlast) Anteil 30% Hs	kWh/a	7.291	-3.117	-1.725	-3.117
Pellet (Bestandsanlage) HS	kWh/a	26.432	-11.299	-6.255	-11.299
Strom Lüftungsanlage Ganzjahresbetrieb	kWh/a	4.904	0	0	-648
Dämmung					
Flachdach Dämmung i.M. (WLS 035)	mm	220	340	275	390
Außenwand Dämmung (WLS 035)	mm	180	260	240	300
Kragdecke unterseitig (WLS 035)	mm	80	160	120	200
Bodenplatte Perimeter (WLS 044)	mm	0	160	80	200
Aufzugsunterfahrt-Außenwände (WLS 044)	mm	60	160	140	160
Aufzugsunterfahrt-Sohle (WLS 044)	mm	60	160	140	160
Fenster	W/m ² K	1,0	0,70	0,86	0,70
Pfosten-Riegelkonstruktion	W/m ² K	1,0	0,70	0,86	0,70
Eingangstür	W/m ² K	1,6	1,1	1,1	1,1
<i>alternativ Außenwanddämmung in WDVS</i>	mm	160	220		

Tabelle 9: Gebäude B – Thermische Gebäudehülle u. Energiewärmebedarf

Variante B-1

Der Spezifische Heizwärmebedarf steigt von 20,9 kWh/m²a auf 26,2 kWh/m²a gegenüber dem größeren Gebäude in der Variante A-1 stark an.

Variante B-2

Um den Heizwärmebedarf von $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ zu erreichen, muss die Dämmung am Gebäude stark erhöht und thermisch sehr gute Fenster mit einem U-Wert von $0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ eingebaut werden. Hierfür sind Fensterrahmen notwendig, die den Passivhauskriterien bei zertifizierten Fensterrahmen entsprechen, wodurch sich die Gebäudekosten deutlich erhöhen. Die Stromersparung beim Einbau einer Luftwärmepumpe beträgt 2.834 kWh/a (Variante 2384 kWh/a).

Variante B-3

Um den Heizwärmebedarf von $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ zu erhalten, sind energetisch bessere Außenbauteile als bei der Variante A-3 erforderlich.

Variante B-4

Da bei Kindergärten unüblich, wurde bei dieser Variante keine CO_2 -Regelung der Lüftungsanlage berücksichtigt. Da in einer neu gebauten Kindertagesstätte ein höherer Anteil an Nebenräumen besteht, die belüftet werden müssen, ergibt sich hierdurch ein hoher Luftwechsel von $0,44 \text{ 1/h}$. Gleichzeitig sind die internen Gewinne deutlich niedriger als in einer Schule, auch wenn bei der Berechnung der internen Gewinne die Essenszubereitung vor Ort berücksichtigt wird. Zur Erreichung des Passivhausstandards müssen sehr hohe Dämmstoffschichtdicken von z.B. 390 mm i. M. im Flachdach und 300 mm in der Außenwand sowie Fenster mit Passivhausrahmen eingebaut werden.

6.2 Kosten und Wirtschaftlichkeit

In den folgenden Tabellen werden die Kosten der Varianten im Vergleich zur Basisvariante als Differenzkosten und die Wirtschaftlichkeit als Annuität ausgewiesen. Für die Bezugsvarianten wurden absolute Kosten für die Energie, Lüftungsanlage und Wärmeerzeuger angegeben.

Mittels der Annuitätenmethode lassen sich die Wirtschaftlichkeit von Bauteilen unterschiedlicher Nutzungsdauer unter Berücksichtigung des kalkulatorischen Zinssatzes, der Inflation und der Energiepreissteigerungen vergleichen. Die Energiepreissteigerung wurde für Strom und Pellet mit 4% angenommen und für Erdgas mit 5%. Damit liegt der Prozentsatz 2% über der angenommenen Inflation von 2%. Zurzeit ist die Inflation zwar höher, für die Berechnung ist jedoch das langfristige Mittel und darüber hinaus der Abstand von Energiepreissteigerung und Inflation von Bedeutung. Bei einer Energiepreissteigerung von 4% und einer Inflation von 2% steigt der Strompreis im Betrachtungsraum inflationsbereinigt um knapp das 2,7-fache und bei 5% um das 4,3-fache an. Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass in der Inflation anteilig eine Energiepreiserhöhung enthalten ist.

In den Einzelergebnissen im Anhang befindet sich auch jeweils die Berechnung mit einer Energiepreissteigerung von 5% (Strom, Pellet) bzw. 6% (Erdgas) über Inflation.

Mehrkosten stellen sich als positive und Minderkosten als negativen Zahlenwerte dar.

Bei den Annuitäten verhält es sich entgegengesetzt. Eine negative Annuität zeigt eine unwirtschaftliche Variante an. Mit Ansteigen des negativen Zahlenwertes wird eine Variante unwirtschaftlicher. Im Rahmen der Differenzkostenbetrachtung hat eine wirtschaftliche Variante eine positive Annuität.

Die Energiekosten beziehen sich auf den aktuellen Energiepreis.

6.2.1 Gebäude A

Variante	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
	Schule EG-40	Schule PH-15	Schule PH-20	Schule Halbtags. PH-15	Sch. ohne CO ₂ -Reg. PH-15	Büro PH-15	Büro ohne Lüft. EG-40	Schule ohne Lüft. EG-40
	Absolut	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz	Differenz
	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a
Energiekosten								
Strom Heizung Luft-WP	3.006	-849	-144	-849	-849	-849	2.057	4.143
Strom Heizung Erd-WP	2.307	-651	-110	-651	-651	-651	2.019	3.179
Pellet	2.951	-833	-141	-833	-833	-833	1.343	4.066
Erdgas (Bestandsanlage) HS	1.963	-554	-94	-554	-554	-554	1.502	2.705
<i>Pellet (Bestandsanlage) Anteil 70 %</i>	2.195	-620	-105	-620	-620	-620	1.502	3.024
<i>Erdgas (Spitzenlast) Anteil 30% Hs</i>	589	-166	-28	-166	-166	-166	403	811
Summe Bestand Pellet	2.783	-786	-133	-786	-786	-786	1.905	3.835
Strom Lüftung Ganzjahresbetrieb	2.739	0	0	-1.059	1.101	1.764**	-1.764	-2.739
Kosten Gebäudehülle								
Summe Kostendifferenz Gebäudehülle		136.282	6.038	153.420	177.140	48.793	0	0
<i>Alternativ AW-WDVS</i>		101.716		0	0	0	0	0
Kosten Wärmeerzeuger								
Einsparung Erzeuger Nenneleistung - 5KW								
Pelletkessel	19.992	-3.927	0	-3.927	-3.927	-3.927	0	0
Luft-Wärmepumpe	27.370	-4.760	0	-4.760	-4.760	-4.760	0	0
<i>Erd-Wärmepumpe</i>	16.065	-2.975	0	-2.975	-2.975	-2.975	0	0
<i>Erdsonde</i>	47.243	-7.973	0	-7.973	-7.973	-7.973	0	0
Summe Erd-Wärmepumpe	63.308	-10.948	0	-10.948	-10.948	-10.948	0	0
Kosten durch Lüftungsanlage						absolut*		
Kostendifferenz Lüftungsanlage	484.330	0	0	0	-11.900	350.812	-350.812	-484.330
<i>Filterwechsel Kosten jährlich</i>	10.948	0	0	0	0	7.116	-7.116	-10.948
Erhöhung Geschoss 40 cm (Büro 20 cm)	308.794	0	0	0	0	202.488	-202.488	-308.794
Kellerraum Lüftungsanlage	78.240	0	0	0	0	58.680	-58.680	-78.240
Summe Kosten Lüftungsanlage + Geb.	871.364				-11.900	611.980	-611.980	-871.364
Planungskosten KG 700								
Gebäudehülle		16.354	725	18.410	21.257	5.855	0	0
Keller+Geschosshöhe	46.444	0	0	0	0	0	-31.340	-46.444
<i>Alternativ Planung mit WDVS</i>		12.206						
Passivhausnachweis		12.495	12.495	12.495	12.495	12.495	0	0
TGA-Lüftungsanlage	72.650	0	0	0	-1.785	0	-52.622	-72.650
TGA-Heizung								
Pelletkessel		-589	0	-589	-589	-589	0	0
Luft-Wärmepumpe		-714	0	-714	-714	-714	0	0
Erd-Wärmepumpe		-1.642	0	-1.642	-1.642	-1.642	0	0
Annuität der Differenzkosten								
Energiepreisssteigerung		4 % (5%)	4 % (5%)	4 % (5%)	4 % (5%)	4 % (5%)	4 % (5%)	4 % (5%)
Heizsystem Luftwärmepumpe								
Gesamtannuität		-5.028 €	-471 €	-3.952 €	-9.320 €	-739 €	55.403 €	78.330 €
Heizsystem Erdwärmepumpe								
Gesamtannuität		-5.059 €	-553 €	-3.984 €	-8.653 €	-770 €	56.557 €	80.657 €
Heizsystem Pelletkessel								
Gesamtannuität		-4.372 €	-478 €	-4.367 €	-9.735 €	-1.154 €	55.494 €	78.516 €
Heizsystem Erdgaskessel (Bestand)								
Gesamtannuität		-6.263 €	-524 €	-3.883 €	-11.064 €	-1.614 €	57.432 €	81.826 €
Heizsystem Pelletkessel (Bestand)								
Gesamtannuität		-5.953 €	-472 €	-4.137 €	-10.036 €	-1.173 €	55.745 €	78.859 €

*angepasste Kosten Lüftungsanlage Büronutzung; A-6, die geringeren Kosten der Lüftungsanlage werden nicht als Einsparung bewertet

** absoluter Wert

Tabelle 10: Gebäude A – Kosten und Wirtschaftlichkeit

Variante A-1

Die Energiekosten liegen bei aktuellem Energiepreis je nach Heizsystem zwischen 1.963 €/a für Erdgas-Brennwertkessel als Bestandsanlage und 3.006 €/a für eine Luftwärmepumpe.

Die Investitionskosten für die Lüftungsanlage betragen 484.330 €. Der Kellerraum für die Lüftungsanlage ist mit 78.240 € zu bewerten. Hinzu kommen die Kosten für die Erhöhung der Geschosse um 40 cm für die Installation der Luftkanäle, was zu zusätzlichen Kosten von 308.794 € führt. Die Summe dieser Lüftungsbezogenen Kosten beträgt 871.364 €.

Die Planungskosten der Lüftungsanlage belaufen sich auf 72.650 € und die der Objektplanung für Kellerraum und die Geschosserhöhung 46.444 €. Die infolge der erhöhten Bauwerkskosten (KG 300) erhöhten Planungskosten der Statik und der TGA wurden vernachlässigt. Die Gesamtkosten der Lüftungsbezogenen inklusive Planungskosten betragen 990.458 €.

Da die Lüftungsanlage in Schulen bei dieser Untersuchung vorausgesetzt wird, fließen die Kosten nicht in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein.

Variante A-2

Die jährliche Energiekosteneinsparung durch das Passivhaus liegt je nach Heizsystem zwischen 849 € bei Luftwärmepumpe und 554 € bei Erdgas.

Bei den Investitionskosten betragen die Einsparungen durch die geringere Gebäude-Heizlast zwischen 3.927 € (Pelletkessel) und 10.948 € (Erd-Wärmepumpe).

Demgegenüber entstehen Mehrkosten für die energetische Verbesserung der Gebäudehülle von 136.282 € (Vorhangfassade) bzw. 101.716 € (Wärmedämmverbundsystem). Einen hohen Anteil der Mehrkosten (knapp 40.000 €) wird durch die stoßfeste unterseitige Kellerdeckendämmung ausgelöst.

Die Annuität des Passivhausstandards ist negativ, die Maßnahme ist nicht wirtschaftlich. Die Energiekosten gleichen nicht die höheren Investitionskosten aus.

Beispielsweise beträgt für den Anschluss an eine Bestandsheizung mit Pellet die Annuität der Investitionsmehrkosten -8.002 € (VHF) und steht der Annuität der eingesparten Energiekosten von 2.050 € (Energiepreissteigerung 4%) bzw. 2.679 € (Energiepreissteigerung 5%) gegenüber. Die Gesamtannuität beträgt -5.953 €. Im Falle des WDVS beträgt die Annuität der Mehrkosten -6.096 € (Einzelergebnisse im Anhang).

Mehrkosten in Bezug auf Bauwerkskosten		
Bauwerkskosten	5.073.216 €	
Mehrkosten KG 300	136.282 €	2,7%

Tabelle 11: Kosteneinsparung (KG 300+400) durch Wegfall Lüftungsanlage

Variante A-3

Die Gesamt-Annuität ist negativ, die Maßnahme ist nicht wirtschaftlich. Aufgrund der geringeren Investitionsmehrkosten ist diese Variante im Vergleich zu den Varianten A-2 bis A-5 die wirtschaftlichste.

Variante A-4

Die Annuität ist negativ und aufgrund der höheren Investition ungünstiger als bei der Ganztagsnutzung der Schule (A-2).

Variante A-5

Durch den Wegfall der CO₂-Regelung werden Kosten von 18.000 € eingespart (inkl. Gewerk Elektro und Automation). Demgegenüber entstehen Mehrkosten für eine größere Lüftungsanlage von 8.000 €. Die Mehrinvestition in die Gebäudehülle beträgt ca. 40.000 € im Vergleich zu Variante A-2 mit CO₂-Regelung. Allein die Strommehrkosten - bedingt durch den höheren Luftwechsel - belaufen sich auf 1.101 € und übersteigen die Stromkosteneinsparung durch den des

Passivhausstandard (A-2, Luft-, Erd-Wärmepumpe).

Im Umkehrschluss ist eine CO₂-Regelung in Schulen wirtschaftlich.

Variante A-6

Bei dieser Variante konnten die Kosten der Lüftungsanlage wegen der Auslegung für die Büronutzung angepasst werden. Die zusätzlich Geschosshöhe wurde mit 20 cm zu Grund gelegt. Die Gesamtkosten der Lüftungsanlage inklusive höherer Geschosshöhe, Kellerraum und zusätzlichen Planungskosten betragen 695.942 €. Im Verhältnis sind die bauliche Aufwendungen zur Erreichung des Passivhauses mit 54.608 € inklusive Planungskosten gering. Die Kosten der Lüftungsanlage übersteigen den finanziellen baulichen Aufwand zum Erreichen des Passivhauses um mehr als das 10-fache.

Variante A-7

Wird bei der Büronutzung auf eine Lüftungsanlage verzichtet, wird eine Gesamtannuität über 55.000 € erzielt. Dieser Betrag würde jährlich eingespart. Hierdurch drückt sich die Unwirtschaftlichkeit der Lüftungsanlage aus. Vergleichsweise kurze Lebensdauern für die einzelnen Komponenten der Lüftungsanlage nach VDI 2067 bedingen die Höhe der Annuität.

Da für die Luftwärmepumpe die Mehrkosten für Energie von 2.503 €/a betragen und gleichzeitig Kosten von 1.498 €/a beim Strombedarf der Lüftungsanlage eingespart werden, verbleiben 1.005 €/a höhere Energiekosten. Für Erdwärmepumpe beträgt der Wert 255 €.

Variante A-8

Es wird eine Gesamtannuität durch den Wegfall der Lüftungsanlage je nach Heizsystem zwischen ca. 78.000 € und 82.000 € erreicht. Die Annuität ist aufgrund der höheren eingesparten Investitionskosten höher als bei der Variante A-7.

Nach aktuellem Preisstand betragen die Mehrkosten für Strom bei der Luftwärmepumpe 1.404 €/a und für die Erdwärmepumpe 440 €/a.

Die Kosteneinsparung durch den Wegfall der Lüftungsanlage betragen im Vergleich zu den Bauwerkskosten:

Kostenanteil Lüftungsanlage in Bezug auf Bauwerkskosten		
Bauwerkskosten	5.073.216 €	
Kosten Lüftungsanlage KG 300	387.034 €	7,6%
Kosten Lüftungsanlage KG 400	484.330 €	9,5%
Summe KG 300+400	871.364 €	17,2%

Tabelle 12: Kosteneinsparung (KG 300+400) durch Wegfall Lüftungsanlage

6.2.2 Gebäude B

Variante	B-1	B-2	B-3	B-4
	Schule EG-40	Schule PH-15	Schule PH-20	Kita PH-15
	Absolut	Differenz	Differenz	Differenz
Energiekosten	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a	brutto €/a
Strom Heizung Luft-WP	2.360	-1.009	-558	-1.009
Strom Heizung Erd-WP	1.811	-774	-429	-774
Pellet	2.316	-990	-548	-990
Erdgas (Bestandsanlage) HS	1.541	-659	-365	-659
Pellet (Bestandsanlage) Anteil 70 %	1.723	-736	-408	-736
Erdgas (Spitzenlast) Anteil 30% Hs	462	-198	-109	-198
Summe Bestand Pellet	2.185	-934	-517	-934
Strom Lüftung Ganzjahresbetrieb	1.746	0	0	-194
Kostendifferenz Gebäudehülle				
Summe Kostendifferenz Gebäudehülle		119.800	70.150	149.584
<i>Alternativ AW-WDVS</i>		96.996		0
Kostendifferenz Wärmeerzeuger				
Einsparung Erzeuger PH - 5kW				
Pelletkessel	-2.409	-2.409	0	-2.409
Luft-Wärmepumpe	-2.920	-2.920	0	-2.920
<i>Erd-Wärmepumpe</i>	-1.825	-1.825	0	-1.825
<i>Erdsonde</i>	-4.891	-4.891	0	-4.891
Summe Erd-Wärmepumpe	-6.715	-6.715	0	-6.715
Kostendifferenz Lüftungsanlage				
Summe Kostendifferenz Lüftungsanlage	329.630	0	0	0
<i>Filterwechsel Kosten jährlich</i>	8.902	0	0	0
Erhöhung Geschoss 40 cm (Kita 20 cm)	193.047	0	0	0
Kellerraum Lüftungsanlage	38.080	0	0	0
Differenz Planungskosten KG 700				
Gebäudehülle		14.376	8.418	17.950
Keller+Geschosshöhe		0	0	0
<i>Alternativ Planung mit WDVS</i>		11.640		
Passivhausnachweis		10.115	10.115	10.115
TGA-Lüftungsanlage	49.445	0	0	0
TGA-Heizung				
Pelletkessel		-361	0	-361
Luft-Wärmepumpe		-438	0	-438
Erd-Wärmepumpe		-1.007	0	-1.007
Annuität der Differenzkosten				
Energiepreissteigerung		4 % (5%)	4 % (5%)	4 % (5%)
Heizsystem Luftwärmepumpe				
Gesamtannuität		-4.430 €	-3.183 €	-6.072 €
Heizsystem Erdwärmepumpe				
Gesamtannuität		-4.811 €	-3.495 €	-6.454 €
Heizsystem Pelletkessel				
Gesamtannuität		-4.914 €	-3.743 €	-6.556 €
Heizsystem Erdgaskessel (Bestand)				
Gesamtannuität		-4.932 €	-3.116 €	-6.574 €
Heizsystem Pelletkessel (Bestand)				
Gesamtannuität		-4.565 €	-2.914 €	-6.208 €

Tabelle 13: Gebäude B – Kosten und Wirtschaftlichkeit

Variante B-2

Die Investitionskosten zur Erreichung des Passivhausstandards mit $124 \text{ €/m}^2_{\text{NGF}}$ sind im Vergleich zur Variante A-2 mit $102 \text{ €/m}^2_{\text{NGF}}$ deutlich gestiegen.

Variante B-3

Zur Erreichung eines Heizwärmebedarfes von $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ sind hier die Kosten im Vergleich zur Variante A-3 besonders stark gestiegen – von 6.038 € auf 70.150 € . Ursächlich ist, dass das Gebäude A in der Basisvariante einen Heizwärmebedarf von $20,9 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ aufweist und damit den Zielwert schon fast erreicht. Gebäude B-1 hat einen Heizwärmebedarf von $26,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, der Aufwand diesen Wert zu reduzieren ist entsprechend höher.

Variante B-3

Bei der Nutzung Kindergarten steigen die Kosten durch die Erhöhung Dämmdicken nochmals im Vergleich zur der Nutzung Schule (B-2) und die Wirtschaftlichkeit fällt noch ungünstiger aus.

6.3 Treibhausgasemissionen

6.3.1 Gebäude A

Im folgenden Abschnitt werden die Treibhausgasemissionen der verschiedenen Gebäudestandards mit der Basisvariante verglichen. Es werden die durch die Energieeinsparung vermiedenen CO₂-Emissionen und denen durch die Mehrdämmung verursachten Emissionen gegenübergestellt.

Variante	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
	Schule PH-15	Schule PH-20	Schule Halbtags. PH-15	Sch. ohne CO ₂ -Reg. PH-15	Büro PH-15	Büro ohne Lüft. EG-40	Schule ohne Lüft. EG-40
Differenz CO₂-Emissionen							
Energiebedarf	kg/a	kg/a	kg/a	kg/a	kg/a	kg/a	kg/a
Strom Heizung Luft-WP	-1.268	-215	-1.268	-1.268	-1.268	3.074	6.191
Strom Heizung Erd-WP	-973	-165	-973	-973	-973	2.359	4.751
Pellet	-195	-33	-195	-195	-195	473	952
Erdgas (Bestandsanlage) HS	-2.052	-348	-2.052	-2.052	-2.052	4.975	10.019
<i>Pellet (Bestand) Anteil 70 %</i>	<i>-145</i>	<i>-25</i>	<i>-145</i>	<i>-145</i>	<i>-145</i>	<i>352</i>	<i>709</i>
<i>+Erdgasbedarf Anteil 30% Hs</i>	<i>-616</i>	<i>-104</i>	<i>-616</i>	<i>-616</i>	<i>-616</i>	<i>1.492</i>	<i>3.006</i>
Pellet (Bestandsanlage)	-761	-129	-761	-761	-761	1.844	3.714
Strom Lüftungsanlage	0	0	-1.583	1.646	0	-2.636	-4.094
Gebäudehülle						Lüftungsanl.	Lüftungsanl.
Summe jährlich	734	161	887	1.021	267	-762	-1.012

Tabelle 14: Gebäude A – Treibhausgasemissionen

Variante A-2

Die Treibhausgasemissionen durch den Energiebedarf variieren erheblich je nach Heizsystem.

Das Passivhaus (A-2) hat bei Anbindung an einen Wärmeerzeuger mit Erdgas im Bestand die höchste CO₂-Einsparung mit 1,32 t pro Jahr im Vergleich zum Effizienzgebäude-40 (A-1). Bei Luftwärmepumpe beträgt die Einsparung noch 0,53 t/a und bei der Erdwärmepumpe nur noch 0,24 t/a.

Ist der Wärmeerzeuger jedoch ein neuer monoenergetischer Pelletkessel weist die Passivhausvariante 0,54 t/a höhere CO₂-Emissionen als das Effizienzgebäude-40 auf. Bei einer Pellet-Bestandsheizung mit Gas-Spitzenlastkessel sind die CO₂-Einsparungen minimal.

Variante A-3

Bei Variante mit einem zulässigen Heizwärmebedarf von 20 kWh/m²a (A-3) sind die CO₂-Einsparungen erheblich geringer als beim Passivhaus, z.B. bei Luftwärmepumpe 0,054 kg/a.

Variante A-4

Bei der Variante A-4 wurden die Effekte eines Halbtagschulbetrieb untersucht. Durch den geringeren Strombedarf sind hier höhere CO₂-Einsparungen als bei einem Ganztagsbetrieb (A-2) vorhanden. Die Bedeutung des Strombedarfs der Lüftungsanlagen für die energetische Gesamtbilanz wird sichtbar.

Variante A-5

So erhöhen sich bei der Variante A-5 ohne CO₂-Regelung die Emissionen durch die Zunahme der Dämmschichten und durch den zusätzlichen Strom der Lüftungsanlage auf 1,93 t (1.646 kg+1.021 kg -734 kg). Die Ausstattung der Lüftungsanlage mit CO₂-Regelung hat einen hohen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen und ist daher sehr sinnvoll.

Variante A-6

Bei dem Büro-Passivhaus (A-6) sind die CO₂-Einsparungen gegenüber der Schulnutzung (A-2) um 0,47 t/a höher, da aufgrund der internen Gewinne der Dämmaufwand zur Erreichung des Passivhauses geringer ist.

Variante A-7

Das Bürogebäude ohne Lüftungsanlage (A-7) spart durch den Wegfall der Lüftungsanlage inkl. Strom 3,40 t/a, durch den höheren Energiebedarf bei Luftwärmepumpe entstehen 4,34 t/a und bei Erdgas 7,03 t/a zusätzliche CO₂-Emissionen. Somit spart die Lüftungsanlage bei Luftwärmepumpe 0,96 t/a und bei Erdgas 3,63 t/a ein.

Variante A-8

Das Schulgebäude ohne Lüftungsanlage spart 5,1 t/a CO₂, die sich aus 1,01 t/a Graue Energie und 4,09 t/a für den Wegfall des Strombedarfes ergeben. Demgegenüber steht durch den Mehrbedarf Heizwärme je nach Erzeugungssystem und Energieträger ein unterschiedlicher Anstieg der CO₂-Emissionen:

CO ₂ -Emissionen	Einsparung Graue Energie und Strom Lüftungsanlage	Anstieg durch erhöhten Heizwärmebedarf	Differenz
	t/a	t/a	t/a
Strom Heizung Luft-WP	-5,10	+6,19	+1,09
Strom Heizung Erd-WP	-5,10	+4,75	-0,35
Pellet	-5,10	+0,95	-4,15
Erdgas HS	-5,10	+10,02	+4,92
Pellet (Bestandsanlage)	-5,10	+3,71	-1,39

Tabelle 15: Differenz Treibhausgasemissionen Variante A-8 im Vergleich zu A-1

Bei Berücksichtigung von Luftwärmepumpen entstehen durch den Wegfall der Lüftungsanlage Mehremissionen von 1,09 t/a und bei Erdgas-Bestandsanlagen 4,92 t/a. **Bei allen anderen Systemen führt der Wegfall zu einer CO₂-Einsparung.**

6.3.2 Gebäude B

Variante	B-2	B-3	B-4
	Schule PH-15	Schule PH-20	Kita PH-15
Differenz CO₂-Emissionen			
Energiebedarf	kg/a	kg/a	kg/a
Strom Heizung Luft-WP	-1.508	-835	-1.508
Strom Heizung Erd-WP	-1.157	-640	-1.157
Pellet	-232	-128	-232
Erdgas (Bestandsanlage) HS	-2.440	-1.350	-2.440
<i>Pellet (Bestand) Anteil 70 %</i>	<i>-172</i>	<i>-95</i>	<i>-172</i>
<i>+Erdgasbedarf Anteil 30% Hs</i>	<i>-732</i>	<i>-405</i>	<i>-732</i>
Pellet (Bestandsanlage)	-904	-501	-904
Gebäudehülle			
Summe jährlich	903	489	1.270

Tabelle 16: Gebäude B – Treibhausgasemissionen

Variante B-2

Gegenüber dem größeren Passivhaus nimmt die Einsparung bei Luftwärmepumpe von 0,53 auf 0,61 kg/a geringfügig zu. Die höchste Einsparung weist das Passivhaus bei einer Erdgas-Bestandsanlage mit 1,64 kg/a auf.

Die monoenergetische Pelletheizung weist höhere CO₂-Emmisionen von 0,67 kg/a auf.

Variante B-2

Diese Variante hat deutlich weniger CO₂-Reduktion als das Passivhaus. Bei der Luftwärmepumpe beträgt diese 0,35 kg/a.

Variante B-2

Aufgrund der höheren Dämmung im Vergleich zu B-2 beträgt die Einsparung des Treibhausgases nur 0,24 kg/a.

6.4 Kosten CO₂-Einsparung

Das Grundsätzliche Problem ist, dass die Kosten der Klimaschäden nicht vom Verursacher getragen werden. Dem soll europaweit mit CO₂-Zertifikaten für Unternehmen und einem in Stufen steigenden CO₂-Preis für Erdgas, Heizöl und Benzin Rechnung getragen werden. Zurzeit beträgt der Preis 30 €/t, er soll bis zum Jahr 2025 auf 55 € steigen. Der Preis gibt weitere Anreize zur CO₂-Einsparung. Dieser Preis bildet aber nicht die echten externalisierten Kosten ab, wobei wie bei Klimamigration nicht alle Aspekte monetär bewertbar sind.

CO₂-Vermeidungskosten dienen als Instrument der klimapolitischen Ziele unter ökonomischen Gesichtspunkten die effektivsten Maßnahmen aufzuzeigen.

Wird das Gebäude von einer Heizung mit dem Energieträger Pellet versorgt, sind durch das Passivhaus (A-2) keine CO₂-Einsparungen gegenüber dem Effizienzgebäude-40 (A-1) zu verzeichnen. Dementsprechend werden keine CO₂-Einsparkosten ausgewiesen.

Zur abschließenden Bewertung stellt sich die Frage, wie hoch die Kosten der CO₂-Einsparung des untersuchten Gebäudes sind und welche Berechnungsmethode hierfür geeignet ist.

Wird die Annuität der Mehraufwendungen für das Passivhaus (A-2) zu Grunde gelegt, beträgt diese 5.028 € und die CO₂-Einsparung 0,53 t/a. Die Annuität der CO₂-Einsparung beträgt somit rund 9.500 €/t. Bei der Erdgas-Bestandsanlage mit einer Annuität von 6.263 € und 1,32 t/a CO₂-Einsparung beträgt die Annuität rund 4.800 €.

Unter der Prämisse, dass die Stadt keine Finanzierungskosten hat, werden folgend die Kennwerte ohne Berücksichtigung eines kalkulatorischen Zinssatzes und mit unterschiedlichen inflationsbereinigten Energiepreissteigerungen ausgewiesen¹: Die Mehraufwendungen für das Passivhaus (Vergleich A-2 zu A-1) betragen ohne Berücksichtigung von Inflation und Kapitalkosten 1.973 €/a. Hieraus ergibt sich CO₂-Vermeidungskosten von 3.721 € pro Tonne und Jahr.

	CO ₂ -Differenz t/a	CO ₂ -Vermeidungskosten €/t*a		CO ₂ -Vermeidungskosten €/t*a	
		Vorhangfassade		WDVS	
reale Energiepreissteigerung		2%	3%	2%	3%
Luftwärmepumpe	- 0,53	3.721	2.817	2.608	1.702
Erdwärmepumpe	- 0,24	8.542	7.008	6.083	4.550
Pelletkessel	+ 0,54	-	-	-	-
reale Energiepreissteigerung		3%	4%	3%	4%
Erdgas-Bestandsanlage	- 1,32	2.071	1.736	1.354	1.019

Tabelle 17: CO₂-Vermeidungskosten des Passivhausstandards (A-2) im Vergleich zum Effizienzgebäude-40 (A-1)

Die CO₂-Einsparkosten liegen z.T. sehr hoch. Die geringsten CO₂-Einsparkosten hat das Passivhaus (A-2) bei der Wärmeversorgung über eine Erdgas-Bestandsanlage. Diese liegen bei der Energiepreissteigerung von 4 % bei 1.019 €/t und damit in der Größenordnung der realen Kosten durch Klimaschäden. Das Bundesumweltamt gibt diese Kosten auf Basis einer Studie² mit 809 Euro₂₀₂₂ pro Tonne Kohlendioxid bei Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünftiger Generationen an.

Die Erdwärmepumpe zeigt sich hier ungünstiger als die Luftwärmepumpe, da das Passivhaus mit Erdwärmenutzung mit dem EG-40-Gebäude ebenfalls mit Erdwärmenutzung verglichen wird. Weil die Erdwärmepumpe aufgrund ihrer höheren Effizienz insgesamt niedrige Energiekosten hat, fällt auch die Einsparung der Energiekosten geringer aus.

¹ Mehrkosten/(Lebensdauer*CO₂-Einsparungen)

² Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze; Stand 12/2020

Im Folgenden werden für das Effizienzgebäude-40 mit (A-1) und ohne (A-8) Lüftungsanlage verglichen. In diesem Fall wird die Variante A-8 als **Basisvariante (ohne Lüftungsanlage)** mit der die energetisch höherwertige Maßnahme A-1 (mit Lüftungsanlage) verglichen wird. Durch den Einbau einer Lüftungsanlage werden bei der Luftwärmepumpenanwendung 1,09 t/a CO₂-Emissionen eingespart: Die Kosten (ohne Kapitalkosten) betragen 41.157 €/t*a).

	CO ₂ -Differenz t/a	CO ₂ -Vermeidungskosten €/t*a	
reale Energiepreissteigerung		2%	3%
Luftwärmepumpe	- 1,09	41.157	40.430
Erdwärmepumpe	+ 0,35	-	-
Pelletkessel	+ 4,15	-	-
reale Energiepreissteigerung		3%	4%
Erdgas-Bestandsanlage	- 4,92	9.616	9.622

Tabelle 18: CO₂-Vermeidungskosten des Effizienzgebäudes-40 mit Lüftungsanlage (A-1) im Vergleich zum Effizienzgebäude-40 ohne Lüftungsanlage (A-8)

Für die CO₂-Bewertung von Strom ist zu bedenken, dass eine Verringerung des spez. CO₂-Emissionen mit zunehmendem Anteil Erneuerbare Energien zu erwarten ist. Zeitlich wird der CO₂-Wert im Tagesverlauf stark schwanken, da er vom Angebot an Solarstrom und Windenergie abhängt. Stehen diese nicht zur Verfügung, kommt der Strom überwiegend aus Erdgas- und bis 2038 aus Kohle-Kraftwerke (aktueller Stand der politischen Beschlüsse). Energiepolitisches Ziel ist die Umstellung dieser Stromerzeugung auf grünem Wasserstoff. Wann dieser einen nennenswerten Anteil in der Stromversorgung ausmacht, ist vor dem Hintergrund eines insgesamt zu erwartenden Anstiegs des Strombedarfes völlig offen.

Vor diesem Hintergrund und der allgemeinen Herausforderung den zunehmenden Strombedarf zu decken, ist ein möglichst geringer Strombedarf aller Anwendungen im Gebäude anzustreben. Bezüglich des Stroms für Lüftungsanlagen, ist hier z.B. zu empfehlen, die Vorspülphase, in der z.T. Anlage schon eine Stunde vor dem eigentlichen Nutzungsbeginn (Unterrichtsbeginn) mit Auslegungsvolumenstrom betrieben werden, zu hinterfragen.

7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung wurde der bauliche Mehraufwand, die Wirtschaftlichkeit, die Treibhausgasemissionen und die CO₂-Einsparungskosten des Passivhauses gegenüber dem Effizienzhaus-40-Standard ermittelt.

Die Berechnungsergebnisse haben gezeigt, dass das Passivhaus gegenüber dem Effizienzgebäude-40 wirtschaftlich nicht darstellbar ist. Dieses Ergebnis wurde unter der Bedingung ermittelt, dass die Kosten der Lüftungsanlage in beiden Niveaus nicht zu berücksichtigen waren, da diese für Schul- und Kindergartennutzung aus Gründen der Luftqualität fest eingeplant werden.

Die Kosten der Lüftungsanlage belaufen sich auf rund 1 Millionen € bzw. 666 € je Quadratmeter beheizter Nettogrundfläche beim Passivhaus (Variante A-2). Diese Technik treibt die Bauwerkskosten erheblich in die Höhe.

Für die Nutzung als Bürogebäude wurde durch den Wegfall der Lüftungsanlage ein wirtschaftlich sehr positiver Effekt mit jährlich eingesparten Kosten von rund 55.000 € ermittelt. Der Energieverbrauch für Heizung steigt dadurch deutlich an, gleichzeitig wird der Strom für der Lüftungsanlage eingespart. In der Summe betragen die Energiemehrkosten beim Einsatz einer Luftwärmepumpe unter aktuellen Energiepreisen rund 1000 €.

Die CO₂-Regelung für Schullüftungsanlagen führt zu Energieeinsparungen und ist wirtschaftlich vorteilhaft.

Wird das Gebäude verkleinert, nimmt der bauliche Aufwand und der Investitionsbedarf für das Passivhaus überproportional zu. Der Aufwand zu Erreichung des Passivhausstandards hängt aufgrund unterschiedlicher interner Gewinne von der Nutzung des Gebäudes ab. Für eine Büronutzung sinkt der Aufwand, für die Nutzung als Kindertagesstätte steigt er deutlich an. Gleiches gilt für eine ungünstige solare Ausrichtung des Gebäudes oder starke Verschattung.

Unabhängig von der reinen Wirtschaftlichkeit weist das Passivhaus eine CO₂-Einsparung im Vergleich zum EG-40-Standard auf, was ein wesentliches Ziel im Rahmen der Energiewende ist.

Die spezifischen CO₂-Einsparungskosten liegen je nach Rahmenbedingungen zwischen rund 1.000 und 8.500 Euro. Die günstigsten Einsparungskosten werden bei der Anbindung an eine bestehende Erdgas-Heizungsanlage erzielt. In Abhängigkeit von der zu Grunde gelegten Energiepreissteigerung liegen diese Kosten in der Größenordnung der vom Bundesumweltamt publizierten realen Kosten, die durch die Emission von Treibhausgasen verursacht werden.

Die Abhandlung bei der Passivhausberechnung einen Grenzwert von maximal 20 kWh/m²a zuzulassen, hat sich aus der Betrachtung als nicht zielführend erwiesen. Größere EG-40-Gebäude entsprechen diesem Niveau ohne nennenswerte zusätzliche Anpassungen, so dass kaum eine Aufwertung gegenüber dem Effizienzgebäude erreicht wird.

Abschließen sei darauf hingewiesen, dass der Strombedarf für den Betrieb der Lüftungsanlage außerhalb der Heizperiode bedeutend für die Gesamtbetrachtung ist. Der Stromverbrauch im Sommerbetrieb übersteigt die Einsparungen des Passivhauses (Luftwärmepumpe) deutlich. In der Konsequenz sollte im Sommer per Fenster gelüftet werden. Ausnahmen sollten eventuell bei sehr hohen Außentemperaturen gemacht werden. Das Lüftungskonzept sollte eine unabhängige Be- und Entlüftung der Sanitärräume vorsehen. Die Größe der Fensterlügel ist entsprechend zu bemessen.

Die nachträglich untersuchte Variante A-8 hat gezeigt, dass durch den Wegfall der Lüftungsanlage beim Schulgebäude eine sehr hohe positive Gesamtannuität und somit jährliche Kosteneinsparung erreicht wird. Der Heizwärmeverbrauch steigt um mehr als das Doppelte an, gleichzeitig entfällt der Energiebedarf für den Betrieb der Lüftungsanlage, so dass je nach Heizsystem und Energieträger ein jährlicher Anstieg der CO₂-Emissionen zwischen 1,09 t (Luft-WP) und 4,92 t (Erdgaskessel Bestand) oder CO₂-Einsparung zwischen 0,35 t (Erd-WP) und 4,15 t (Pelletkessel) entstehen. Das zeigt, dass der Einbau einer Lüftungsanlage bei einer sehr effizienten Heiztechnik oder CO₂-armen Energieträgern zu einer Zunahme der CO₂-Emissionen führt.

8. Empfehlung für die Energieleitlinie

Für den Neubau ist eine effiziente Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien anzustreben.

Empfehlung für Gebäude mit Anschluss an Bestandsanlagen auf Basis Erdgas:

Für den Fall, dass das Gebäude an eine bestehende Heizungszentrale mit Erdgasnutzung angeschlossen wird, ist der Passivhausstandard (15 kWh/m²a) - mit einer Einschränkung für energetisch sehr ungünstige Gebäude – zu empfehlen, wenn eine Lüftungsanlage aus Gründen der Luftqualität eingebaut werden soll. Dies gilt, wenn die Umstellung der Heizung auf einen 65 %-tigen Anteil an erneuerbaren Energien in den nächsten 5 Jahren nicht vorgesehen ist. Zur Begründung werden die CO₂-Vermeidungskosten angeführt, die in Höhe der realen Kosten der Klimaschäden liegen (siehe Kap. 6.4).

Zur Eingrenzung des Aufwandes bei Gebäuden mit ungünstigen Voraussetzungen (z.B. starke Verschattung, kleine Gebäude) sollte eine Grenze des baulichen Wärmeschutzes eingeführt werden.

Hierfür werden U-Werte vorgegeben, die nicht unterschritten werden sollen. Dadurch wird auch die Vorgabe Passivhausstandard für „größere Neubauten“ durch eine klare Regelung ersetzt. Wenn die Grenze greift, wird der Heizwärmebedarf von 15 kWh/m²a maßvoll überschritten. Dies wird zur Vermeidung von unverhältnismäßig hohen Aufwendungen beim baulichen Wärmeschutz toleriert.

Empfehlung für die nicht zu unterschreitenden U-Werte:

Bauteil	Min. U-Wert W/m ² K	entspricht ca. folgenden Dämmdicken
Flachdach und Kragdecken	0,11	≤ 300 mm WLS 035 (i.M.)
Schrägdächer	0,14	≤ 300 mm WLS 035 (Zwischen u. Untersparrendämmung)
Außenwand	0,14	≤ 240 mm WLS 035 WDVS ¹
Kellerdecke	0,15	≤ 220 mm WLS 035 (Summe ober- und unterhalb Betondecke)
Bodenplatte	0,15	≤ 100 mm WLS 035 u. Estrich + 160 mm Perimeterter WLS 044
Wände gegen unbeheizt	0,20	≤ 160 mm WLS 035
Wände gegen Erdreich	0,20	≤ 200 mm WLS 044
Fensterglas	0,50	
Fensterrahmen	1,00	
Pfosten-Riegel-Konstruktion	1,20	

¹VHF ist abhängig vom WB-Aufschlag Unterkonstruktion

Tabelle 19: Empfehlung nicht zu **unterschreitende** U-Werte

Diese Regel gilt auch für den Anschluss an eine Heizzentrale auf Basis von Erdgas-BHKWs, wenn der bereitgestellte Wärmeanteil des BHKWs geringer als 70 % ist (Durchschnitt der letzten 3 Jahre) sowie für Nah- und Fernwärme mit einem Primärenergiefaktor (fp-Wert) größer 0,50.

Für alle übrigen Neubauten sind folgende Vorgaben zu beachten:

- Berechnung nach Gebäudeenergiegesetz (GEG)
- Einzuhaltender Gebäudestandard: Effizienzgebäude-40
- Wärmebrücken: Gleichwertigkeitsnachweis nach DIN 4108 Bbl. 2 Niveau B
- Einhaltung maximale U-Werte (erhöhte bauliche Anforderungen gegenüber Effizienzgebäude-40)
- Der Einbau einer Lüftungsanlage wird nicht aus energetischen Gründen gefordert

Bauteil	Max. U-Wert W/m ² K	entspricht ca. folgenden Dämmdicken
Flachdach und Kragdecken	0,14	≥ 240 mm WLS 035 (i.M.)
Schrägdächer	0,16	≥ 260 mm WLS 035 (Zwischen u. Untersparrendämmung)
Außenwand	0,17	≥ 200 mm WLS 035 WDVS ¹
Kellerdecke	0,20	≥ 160 mm WLS 035 (Summe ober- und unterhalb Betondecke)
Bodenplatte	0,20	≥ 80 mm WLS 035 u. Estrich + 100 mm Perimeterter WLS 044
Wände gegen unbeheizt	0,23	≥ 140 mm WLS 035
Wände gegen Erdreich	0,23	≥ 180 mm WLS 044
Fensterglas	0,60	
Fensterrahmen	1,10	
Pfosten-Riegel-Konstruktion	1,30	
1VHF ist abhängig vom WB-Aufschlag Unterkonstruktion		

Tabelle 20: Empfehlung nicht zu **überschreitende** U-Werte (max. U-Werte)

Abweichungen von den einzelnen max. U-Werten sind zulässig, solange der mittleren U-Werten, der sich bei Einhaltung der max. U-Werte ergibt, weiter eingehalten wird (Berechnung nach Gebäudeenergiegesetz (GEG)).

Erläuterung: Der geforderte Wärmeschutz ist gegenüber dem Effizienzgebäude-niveau-40 moderat verbessert, um höheren Ansprüchen an den Wärmeschutz zu genügen.

In der aktuellen Gebäudeleitlinie soll eine Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 erfolgen, der zu berücksichtigende CO₂-Preis beträgt 50 €/t. Für das Passivhaus (Variante A-2) mit Luftwärmepumpe führt dies zu einer Erhöhung der Energiekosteneinsparung von 63 €. Da mittlerweile gesetzlich ein CO₂-Preis eingeführt wurde und die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu weiterer Erhöhung der Planungskosten führt, sollte die Wirtschaftlichkeitsberechnung nicht mehr in den Energieleitlinien gefordert werden.

Die Möglichkeit den auf dem Gebäude erzeugten Strom mit in die Bilanzierung zum Erreichen eines höheren Gebäudestandards einzurechnen, wie es Gebäudeleitlinien anderer Städte vorsehen, wird nicht als sinnvoll erachtet. Die Gebäude können Anforderungen leichter erfüllen, wobei die Optimierung des Energiebedarfs ausbleibt. Die Umstellung auf eine nachhaltige Energieversorgung gelingt umso mehr, je geringer der zu deckende Energiebedarf ist.

Aufgestellt:

**BRÖCKLING
VULLHORST**
ingenieureJosef-Förster-Straße 4
33161 Hövelhof

T 05257 9822-0

F 05257 9822-22

E info@bv-ingenieure.de

Hövelhof, den 25.10.2023



Dipl.-Ing. (FH) Claudia Reckefuß
(Projektingenieurin)

Dipl.-Ing. Dörte Ohst
(Projektleiterin)