



Energetische Aspekte von Lüftungssystemen

in Klassenzimmern

Schlussbericht

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

Stadt Zürich,
Amt für Hochbauten,
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Simulationen:

Jörg Dietrich, (AFC Air Flow Consulting, Zürich)
Joerg.dietrich@afc.ch

Projektleitung / Bericht:

Franz Sprecher
Markus Hilpert
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Amt für Hochbauten

Download als pdf unter
www.stadt-zuerich.ch/egt -> Projekte realisiert

Zürich, April 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Ausgangslage und Fragestellungen	8
2.1	Ausgangslage	8
2.2	Fragestellungen	9
2.3	Abgrenzung	9
3	Vorgehen	10
3.1	Definition Simulationen	10
3.2	Übersicht der Simulationen:	11
4	Modell Beschreibung der Grundlagen und Vorgaben	12
4.1	Allgemein - Vorgehen und Methode	12
4.2	Geometrie	13
4.3	Lage und Wetterdaten	15
4.4	Bauteile	16
4.5	Nutzungszeiten und innere Raumlaster	18
4.6	HLK	19
4.7	Infiltration	20
5	Vergleich Energiebedarf	21
5.1	Bewertung mittels nationalen Gewichtungsfaktoren	23
5.2	Bewertung nach Primärenergie (PE tot.)	25
5.3	Bewertung nach Treibhausgas-Emissionen (THG)	26
5.4	Einfluss der ausgetauschten Luftmengen	27
5.5	Einfluss einer bedarfsgerechten Regelung	28
5.6	Resultate Energiebedarf (Ausrichtung Nord vs. Süd)	30
5.7	Resultate Energiebedarf Vergleich mit SIA Merkblatt 2024	31
6	Heizleistungsbedarf und Heizperiode	32
7	Erstellungsenergie	33

1 Zusammenfassung

Ausgangslage und Vorgehen

Menschen brauchen CO₂-arme Luft, um eine hohe Lern- und Arbeitsleistung erbringen zu können. Gute Luftqualität und höchste Energieeffizienz sind aber ein Zielkonflikt. Wird über offene Fenster gelüftet, so muss die eintretende kalte Aussenluft auf Raumtemperatur gebracht werden. Bei mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) braucht die Förderung der Luft Energie.

Je besser die geforderte Raumluftqualität ist, umso grösser ist der Energieaufwand für die Lüftung. Beim Erstellen von energetischen Vergleichen ist es zentral, dass von denselben Luftwechseln ausgegangen wird.

In der vorliegenden Studie soll die Frage beantwortet werden, ob es aus energetischer Sicht bei gleicher angestrebter Luftqualität in Klassenzimmern sinnvoller ist, die Aussenluft mit der Heizung und den internen Lasten oder mit einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) auf Raumtemperatur zu erwärmen. Oder vereinfacht gefragt: Ist es energieeffizienter, über die offenen Fenster oder mittels einer mechanischen Lüftung mit WRG zu lüften?

Aufgrund der aktuell gültigen Normen und üblichen Nachweisverfahren ist die Beantwortung der gestellten Frage schwierig. Einerseits da den Berechnungen unterschiedliche Luftmengen zugrunde liegen. Andererseits da Monats- und Jahresbilanzrechnungen vermischt werden.

Da mit manueller Fensterlüftung nur mit sehr grossem Aufwand eine geforderte CO₂-Konzentration erreicht werden kann (CO₂-Ampel, Fenster öffnen während der Lektion, kein Überlüften in den Pausen), wird in dieser Studie von einer CO₂-geregelten, automatisierten Fensterlüftung ausgegangen.

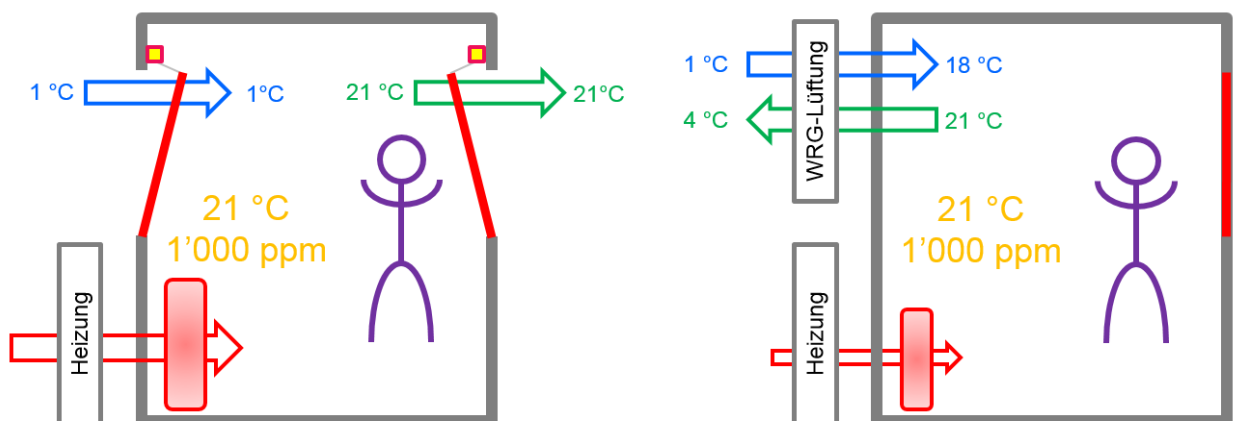


Abbildung 1: Darstellung der in der Studie verglichenen Varianten

Um Gleiches mit Gleichem zu vergleichen, wurde anhand eines typischen Klassenzimmers mit sieben verschiedenen Simulationsvarianten und je fünf Heizungssystemen der Einfluss des Lüftungskonzeptes auf den Energieverbrauch untersucht. Als Lüftungen wurden automatische Fensterlüftungen sowie zentrale und dezentrale Systeme mit Wärmerückgewinnung verglichen. Basis für alle Untersuchungen ist eine maximale CO₂-Konzentration von 1000 ppm im Klassenzimmer. Dieser Wert entspricht einer guten Luftqualität – also idealen Lernbedingungen. Gemäss SIA 382/1 ist 1000 ppm der Übergangswert zwischen „Raumluft mit hoher Luftqualität“ und „Raumluft mit mittlerer Luftqualität“. 1000 ppm entsprechen dem aktuellen Planungswert der Stadt Zürich für automatisierte Lüftungssysteme in Klassenzimmern. Bei der automatischen Fensterlüftung wird davon ausgegangen, dass eine genügende Durchlüftung des Klassenzimmers, z.B. durch Querlüftung, möglich ist.

Die vorliegende Studie macht keine Aussagen zu Vor- und Nachteilen und Einsatzgrenzen von automatischen Fensterlüftungen und mechanischen Lüftungsanlagen mit WRG. Ebenfalls werden die Themen sommerlicher Wärmeschutz, Zertifizierbarkeit und Kosten nicht behandelt.

Resultate

Die Simulationen zeigen, dass ein bedarfsgerecht betriebenes Lüftungssystem mit WRG gegenüber einer automatischen Fensterlüftung aus energetischer Sicht im Vorteil ist. Dies sowohl in der Jahresbilanz, als auch bei einer Betrachtung des Winterhalbjahres oder der reinen Heizperiode.

Die Simulationen zeigen auch, welche Parameter wichtig für ein energieoptimales System sind. Zentral ist z.B. dass das Lüftungssystem nur den gemäss SIA 382/1 zulässigen Strom verbraucht, bedarfsgerecht geregelt wird, korrekt installiert und gut einreguliert ist. Werden diese Punkte z.B. infolge Platzmangels bei einer Instandsetzung mit guter Wärmedämmung und eingebauter hoch effizienter Wärmepumpe nicht eingehalten werden, relativiert sich der energetische Vorteil einer mechanischen Lüftung mit WRG mehr oder weniger stark.

Die Simulationen bestätigen den Zielkonflikt zwischen hoher Luftqualität und tiefem Energieverbrauch. Je höher die maximal zulässige CO₂-Konzentration ist, umso weniger gross wird der Unterschied des Energieverbrauchs der verschiedenen Systeme.

Der energetische Vorteil des Lüftungssystems mit Wärmerückgewinnung ist umso grösser, je schlechter die energetische Qualität der Gebäudehülle ist. Das liegt daran, dass die Heizperiode in energetisch guten Gebäuden kürzer ist und die internen Lasten (Abwärme von Schülern und Computern, etc.) ausserhalb der Heizperiode die Lüftungsverluste wettmachen können.

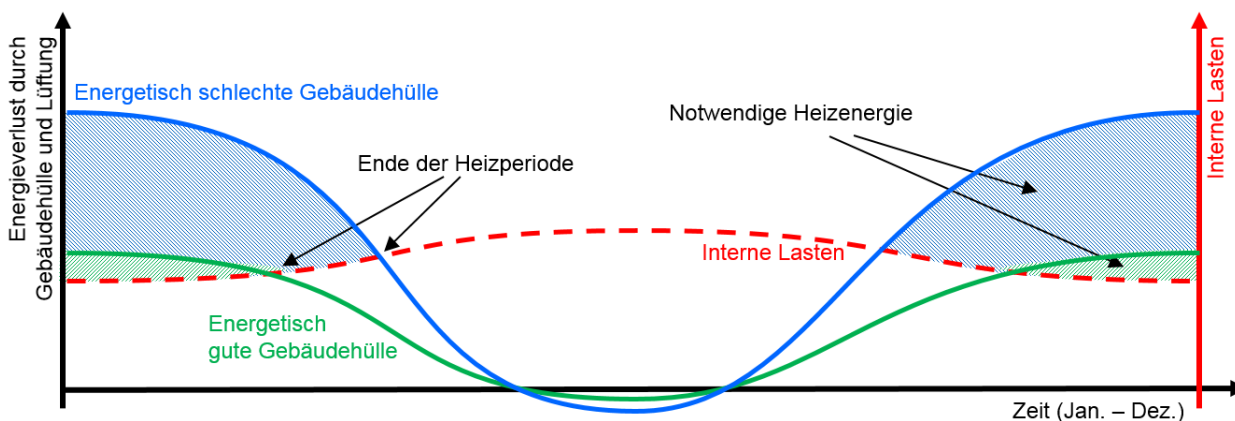


Abbildung 2: Dauer der Heizperiode in Funktion der energetischen Qualität der Gebäudehülle (Beispielbild)

Mechanische Lüftungsanlagen, welche den SIA-Zielwert erreichen, schneiden in der Energiebilanz erwartungsgemäss besser ab als nach dem SIA-Grenzwert ausgelegte Systeme. Dezentrale Lüftungssysteme sind gegenüber zentralen Anlagen aus energetischer Sicht meist im Vorteil, da die Luft aufgrund der dezentralen Anordnung der Lüftungsgeräte nur kurze Wege und entsprechend kleine Druckverluste überwinden muss.

Ebenfalls hat das eingesetzte Heizungssystem einen grossen Einfluss auf den in dieser Studie gemachten energetischen Vergleich. Die durch den Austausch von warmer Raum- mit kalter Aussenluft entstehenden Energieverluste müssen entweder mit einer Wärmerückgewinnung minimiert oder bei automatisierten Fensterlüftungen vollständig mit der Heizung und internen Lasten kompensiert werden. Je effizienter die Heizung die Lüftungsverluste decken kann, umso kleiner ist die energetische Wirkung der WRG.

Das Energieeinsparungspotential von CO₂-Regulierungen in Klassenzimmern ist gross.

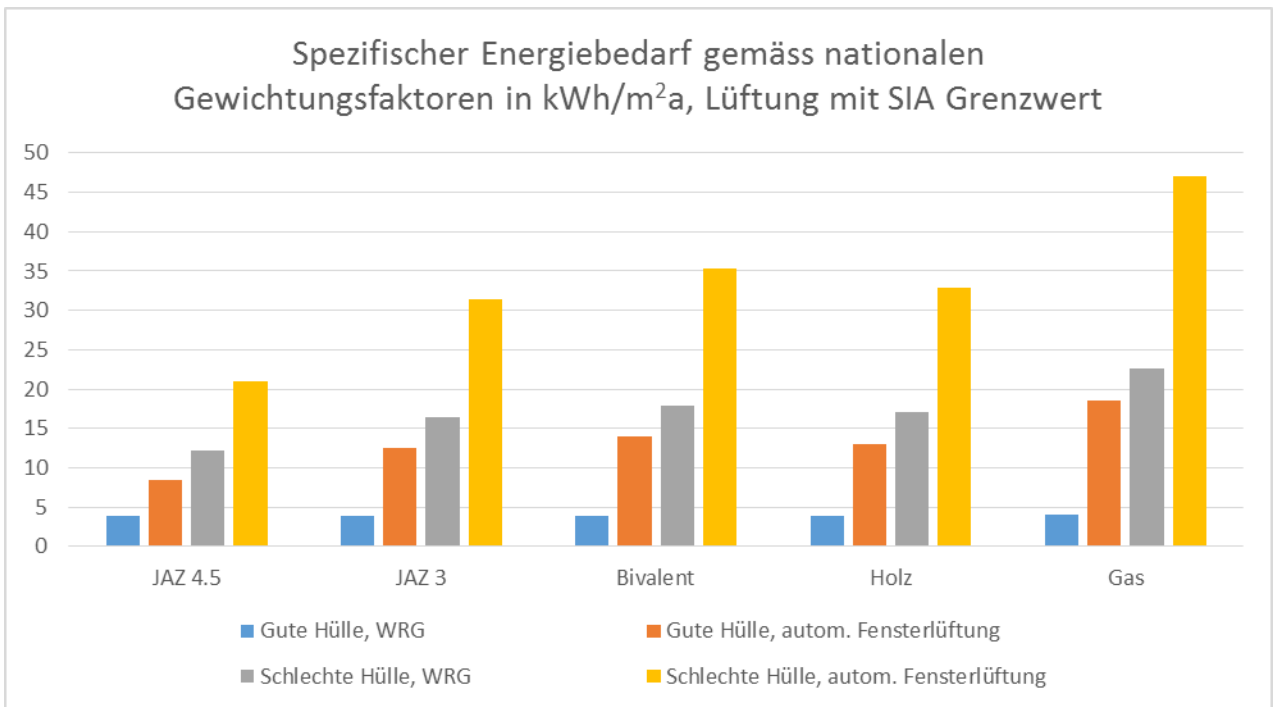


Abbildung 3: Spezifischer Energiebedarf gemäss nationalen Gewichtungsfaktoren, Lüftung mit SIA Grenzwert

Abbildung 3 zeigt die resultierenden gemäss den nationalen Gewichtungsfaktoren bewerteten Energieverbräuche pro Quadratmeter für die Lüftung und für verschiedene Wärme-Erzeugungssysteme.

Der erste, blaue Wert zeigt den Energieverbrauch in einem gut gedämmten Klassenzimmer, welches mit einer mechanischen Lüftung mit WRG ausgerüstet ist. Die orange Säule stellt den Energieverbrauch im selben Zimmer dar, wenn statt der mechanischen Lüftung mit WRG ein automatisches Fensterlüftungssystem zu Einsatz kommt. Der graue und der gelbe Balken stehen für eine mechanische, resp. eine automatische Fensterlüftung in einem schlecht gedämmten Klassenzimmer.

In der ersten Wertegruppe „JAZ 4.5“ in Abbildung 3 kommt eine Wärmepumpe (WP) mit einer Jahres-Arbeits-Zahl (JAZ) von 4.5 zum Einsatz. Die zweite Wertegruppe „JAZ 3“ bildet die Verhältnisse ab, wenn die JAZ 3 beträgt. Dem bivalenten System der dritten Gruppe „Bivalent“ liegt eine Heizung mit einer WP mit JAZ 3.0 und einer Gasheizung (25 % Energieanteil) zugrunde. Die Wertegruppen „Holz“ und „Gas“ zeigen den Vergleich in einem Gebäude mit einer Holz-, resp. einer Gasheizung.

Untersucht wurde ebenfalls die benötigte Heizleistung, welche für ein Klassenzimmer mit und ohne Lüftung mit WRG benötigt wird.

Variante	Spezifischer Heizleistungsbedarf W/m²
Energetisch gute Hülle, mechanische Lüftung mit WRG	20
Energetisch gute Hülle, automatische Fensterlüftung	57
Energetisch schlechte Hülle, mechanische Lüftung mit WRG	71
Energetisch schlechte Hülle, automatische Fensterlüftung	100

Tabelle 1: Zusammenfassung Heizleistung für ein Klassenzimmer

Aufgrund der notwendigen Leistungsunterschiede wurde auch der Aufwand für die Erstellungsenergie in Neubauten abgeschätzt. Dabei zeigte sich, dass die Erstellungsenergie insbesondere im Vergleich Erdwärmesonden-Wärmepumpen und Lüftung mit WRG eine untergeordnete Rolle spielt.

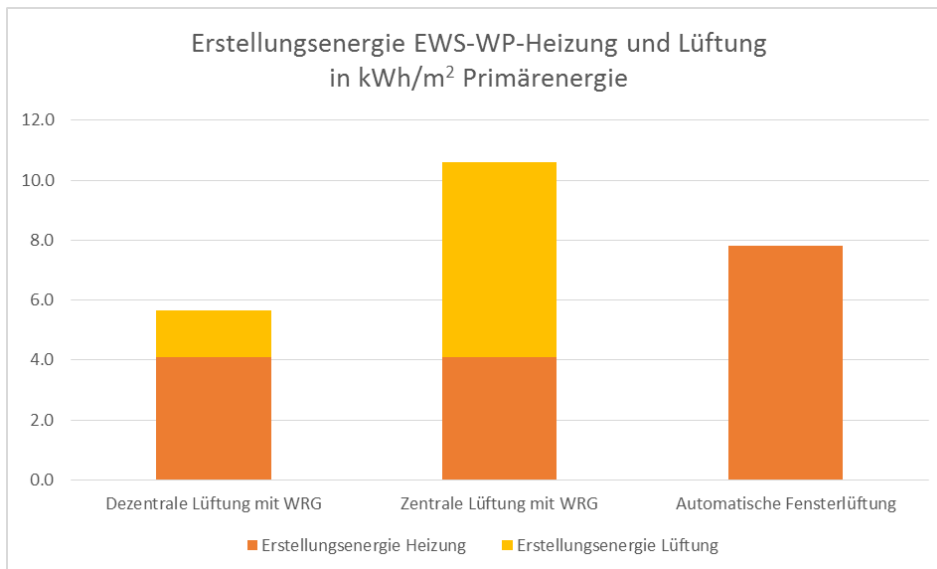


Abbildung 4: Spezifische Energieverbräuche Erstellung mit nationalen Gewichtungsfaktoren, Lüftung mit SIA Grenzwert

Empfehlungen

Aus rein energetischer Sicht lassen sich untenstehende Empfehlungen für das Lüften von Klassenzimmern ableiten.

- Lüftungssysteme mit einer effizienten Wärmerückgewinnung und kleinen Energieverbräuchen für die Luftförderung (kurze Wege, grosse Kanalquerschnitte) einsetzen. Oft können diese beiden Ziele mit dezentralen Lüftungsgeräten am besten erreicht werden.
- Alle Klassenzimmer sollen über grossflächig öffnenbare Fenster verfügen. Damit können der Luftwechsel bei einer höheren Belegung und im Sommer – je nach Situation (Wetter, Sicherheit) - eine Nachtauskühlung ermöglicht werden.
- Die Luftmengen mittels CO₂-Regelungen dem tatsächlichen Bedarf anpassen.
- Insbesondere bei zentralen mechanischen Lüftungsanlagen und automatisierten Fensterlüftungssystemen prüfen, ob eine schlechtere Luftqualität im Klassenzimmer zulässig ist. Mit einem reduzierten Luftwechsel können die Energieeffizienz gesteigert und die Investitions- und Betriebskosten gesenkt werden.
- Bei Klassenzimmern mit einer energetisch schlechten Hülle besonderen Wert auf eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung legen. Je länger die Heizperiode in einem Gebäude dauert und je weniger erneuerbare Energien für dessen Beheizung verwendet werden, umso grösser ist der ökologische Gewinn einer Wärmerückgewinnung.
- Den SIA-Zielwert für den Stromverbrauch der mechanischen Lüftungsanlage in der Planung anstreben und im Betrieb regelmässig überprüfen / optimieren.

2 Ausgangslage und Fragestellungen

2.1 Ausgangslage

Menschen brauchen CO₂-arme Luft, um eine hohe Lern- und Arbeitsleistung erbringen zu können. Entsprechend wichtig ist es in dicht belegten Räumen, wie z.B. Klassenzimmern, dass ein ausreichender Luftaustausch stattfindet. Je nach baulicher und örtlicher Situation setzt die Stadt Zürich auf unterschiedliche Lüftungskonzepte.

Im Winter ist die in den Raum eingebrachte Aussenluft kalt und muss auf Raumtemperatur gebracht werden. Die zentrale Fragestellung dieser Studie lautet: Ist es aus energetischer Sicht bei gleicher angestrebter Luftqualität in Klassenzimmern sinnvoller, die Aussenluft mit der Heizung oder mit einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG) auf Raumtemperatur zu erwärmen? Oder vereinfacht gefragt: Ist es energieeffizienter, eine grössere Heizung oder eine Lüftung mit WRG zu installieren?

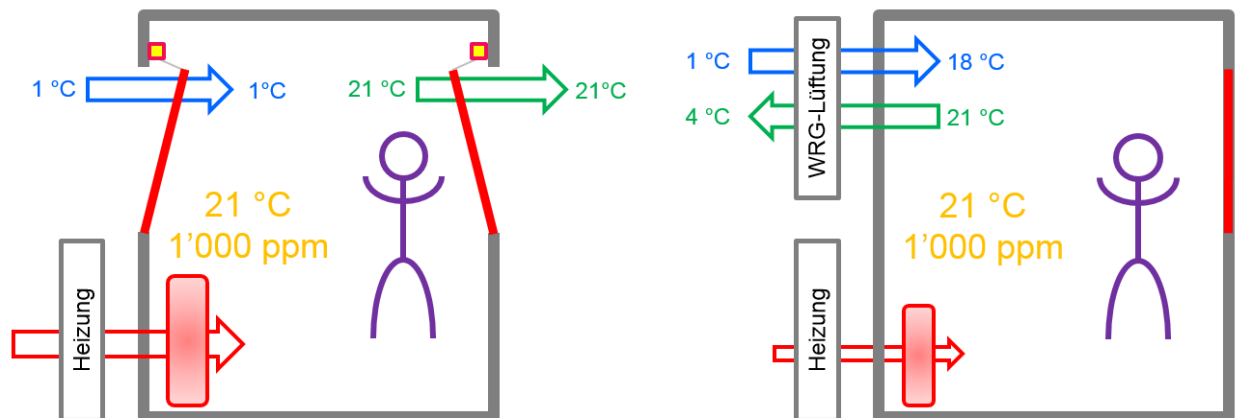


Abbildung 5: Darstellung der in der Studie verglichenen Varianten

Aufgrund der aktuell gültigen Normen und üblichen Nachweisverfahren ist die Beantwortung der gestellten Frage schwierig. In den Bauprojekten wird die Frage nach dem energetischen Einfluss von Lüftungssystemen oft mit einem Vergleich mit unterschiedlichen Luftmengen beantwortet. Gebäude mit mechanischen Lüftungssystemen werden mit den realen Luftwechsell gerechnet, Bauten mit manueller oder automatischer Fensterlüftung mit dem Standard-Aussenluftvolumenstrom gemäss SIA 380/1 - 2009. Dieser ist für die Kategorie Schulen mit $0.7 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ gleich gross wie für die Kategorie Einfamilienhäuser. Der effektiv notwendige Aussenluftvolumenstrom ist für die Erreichung einer Luftqualität von maximal 1000 ppm in den Klassenzimmern rund doppelt so gross wie der Standardwert gemäss SIA 380/1 - 2009.

Den Berechnungen liegen oft nicht nur unterschiedliche Luftmengen zugrunde, sondern es werden auch Monats- und Jahresbilanzrechnungen vermischt.

Um Gleiches mit Gleichem zu vergleichen, wurde anhand eines typischen Klassenzimmers mit sieben verschiedenen Simulationsvarianten und je fünf Heizungssystemen der Einfluss des Lüftungskonzeptes auf den Energieverbrauch untersucht. Als Lüftungen wurden automatische Fensterlüftungen sowie zentrale und dezentrale Systeme mit Wärmerückgewinnung verglichen. Basis für alle Untersuchungen ist eine maximale CO₂-Konzentration von 1000 ppm im Klassenzimmer. Die Luftqualität von 1000 ppm entspricht einer guten Luftqualität zum Lernen und ist der aktuelle Standard-Planungswert (Stand 2015) der Stadt Zürich. Gemäss SIA 382/1 ist 1000 ppm der Übergangswert zwischen „Raumluft mit hoher Luftqualität“ und „Raumluft mit mittlerer Luftqualität“.

2.2 Fragestellungen

Um den energetischen Vergleich zwischen den verschiedenen Varianten zu ermöglichen, sollen mithilfe von thermischen Gebäudesimulationen folgende Fragestellungen geklärt werden:

- Ist es aus energetischer Sicht sinnvoller, eine grössere Heizung oder eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung zu installieren?
- Hat die energetische Qualität der Gebäudehülle einen Einfluss auf die energetische Wirkung der Lüftungsanlage?
- Was passiert aus energetischer Sicht, wenn mehr oder weniger als dies für die Lufthygiene notwendig wäre gelüftet wird?
- Welchen Einfluss hat die Installation einer mechanischen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung auf die zu installierende Heizleistung und die Heizperiode?
- Wie gross ist der Einfluss der Erstellungsenergie?
- Haben CO₂-Regulierungen ein Energieeinsparungspotential?

2.3 Abgrenzung

Die vorliegende Studie macht keine Aussagen zu Vor- und Nachteilen (Komfort, Lüftungseffizienz, Pollenschutz, Bedienbarkeit, Witterungsabhängigkeit, Bauphysik, etc.) und Einsatzgrenzen (Eingriffstiefe, Raumbedarf, Standort, Fensteranordnung, etc.) von automatischen Fensterlüftungen und mechanischen Lüftungsanlagen mit WRG. Ebenfalls werden die Themen sommerlicher Wärmeschutz, Zertifizierbarkeit und Kosten nicht behandelt.

Damit eine automatische Fensterlüftung gut funktioniert, muss das Klassenzimmer über eine geeignete Geometrie verfügen. In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass diese gegeben ist.

3 Vorgehen

3.1 Definition Simulationen

Die gestellten Fragen werden mit thermischen Simulationen geklärt. Die Simulations-Resultate sind Endenergien, welche für die Vergleiche in Primärenergie (PE) und Treibhausgas-Emissionen (THG) umgerechnet werden. Verglichen werden die Resultate ebenfalls nach der Methodik der nationalen Gewichtungsfaktoren, wie sie auch von MINERGIE verwendet wird.

Für die einzelnen Varianten wurden folgende Daten ausgewertet:

- Heizenergiebedarf pro Klassenzimmer
- Betrachtung der Endenergie unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeerzeugungssysteme und Stromverbrauch Lüftung nach SIA-Zielwert und -Grenzwert.
- Heizperiode und Heizleistungsbedarf

Grundlagen der Simulationen sind bei allen Systemen eine angestrebte Luftqualität von 1000 ppm, richtig platzierte CO₂-Fühler und ein korrektes Nutzerverhalten. Bei den automatischen Fenstern wird davon ausgegangen, dass die räumliche Situation eine genügende Durchlüftung erlaubt. 1000 ppm ist der aktuell anzustrebende Planungswert für Klassenzimmer der Stadt Zürich.

Varianten 1 – 4: Grundvarianten

Die Hauptfrage nach dem energetischen Nutzen von Lüftungen mit Wärmerückgewinnung wird anhand von vier Grundvarianten geklärt. Diese vier Varianten ergeben sich aus der Kombination von energetisch guten und schlechten Hüllen, sowie einer mechanischen Lüftung mit WRG und einer automatischen Fensterlüftung.

- V01: Mechanische Lüftung und gute Dämmung
- V02: Automatische Fensterlüftung und gute Dämmung
- V03: Mechanische Lüftung und schlechtere Dämmung
- V04: Automatische Fensterlüftung und schlechte Dämmung

Variante 5 und 6: Einfluss der ausgetauschten Luftmengen

Die Frage nach dem Einfluss der umgewälzten Luftmenge wird dadurch geklärt, dass je eine Simulation mit automatischer Fensterlüftung mit halber, resp. doppelter Luftmenge gemacht wird. Mit diesen beiden Simulationen soll aufgezeigt werden, wie stark sich der Energieverbrauch bei unkontrollierter, manueller Fensterlüftung verändern kann.

- V05: Automatische Fensterlüftung mit dem halben Luftvolumenstrom (12.5 m³/h pro Schüler) und gute Dämmung
- V06: Automatische Fensterlüftung mit dem doppelten Luftvolumenstrom (50 m³/h pro Schüler) und gute Dämmung

Variante 7: Einfluss der Gebäudeorientierung

Die letzte Berechnung dient der Beantwortung der Frage nach dem Einfluss der Gebäudeorientierung.

- V07: Automatische Fensterlüftung, gute Dämmung und südorientiertes Klassenzimmer

Weitere Berechnungen

Die Erstellungsenergie kann aufgrund der simulierten Energieverbräuche und notwendigen Heizleistungen anhand des KBOB-Merkblattes Ökobilanzen im Baubereich abgeschätzt werden.

Anhand von Variante V01 wurde der Unterschied zwischen optimaler CO₂-Regelung und konstanter Luftmenge während der Nutzungszeit untersucht.

3.2 Übersicht der Simulationen:

Variante	Mechanische Lüftung	Automatische Fenster-Lüftung	Gute Dämmung	Schlechte Dämmung	Hygienischer Luftwechsel autom. Fensterlüftung / CO ₂ Regelung	Halbe Luftmenge (automatische Fensterlüftung) = 1600 ppm	Doppelte Luftmenge (automatische Fensterlüftung) = 700 ppm	SFP Zielwert	SFP Grenzwert	Konstanter Volumenstrom während Nutzungszeit	Raum Ausrichtung Nord	Raum Ausrichtung Süd	Simulation	Excel Berechnung
V01	x		x		x			x			x		x	
V02		x	x		x						x		x	
V03	x			x	x			x			x		x	
V04		x		x	x						x		x	
V05		x	x			x					x		x	
V06		x	x				x				x		x	
V07		x	x		x							x	x	
V01 Grenzwert	x		x		x				x		x			x
V01 Zielwert konst. Vol.	x		x					x		x	x			x
V01 Grenzwert konst. Vol	x		x						x	x	x			x

Tabelle 2: Variantenübersicht

4 Modell Beschreibung der Grundlagen und Vorgaben

4.1 Allgemein - Vorgehen und Methode

Zur Simulation von Gebäuden und Fassaden wird von AFC eine voll gekoppelte Berechnung von Zonenströmungssimulation mit thermisch-dynamischer Gebäudesimulation angewendet. Hierbei werden die für Gebäude und Fassadensysteme wesentlichen thermischen und dynamischen Vorgänge in einer angepassten geometrischen und zeitlichen Auflösung berechnet. Die Ergebnisse beziehen sich auf eine Zone oder Fläche als Stundenmittelwerte.

Mit dieser Methode wird die Wechselwirkung zwischen Fassade (externe Lasten, Wetterdaten), Lüftung (mechanisch, automatisch) und internen Lasten (Personen, Beleuchtung, Geräte) sowie der Speicherung in den verschiedenen Bauteilen umfänglich berücksichtigt. Die Berechnungen erfolgen in erforderlichen Zeitschritten von maximal einer Stunde über einen gewählten Zeitabschnitt bis zu einem Jahr und werden mit dem Simulationssystem IDA ICE durchgeführt.

Je nach spezifischer Aufgabenstellung und Anforderung werden die folgenden Daten ausgegeben:

- Temperaturverläufe, Max. Min. Werte, sowie Statistiken
- Heiz- und Kühllast, sowie Dynamik und Dauerlinien
- Heiz- und Kühlbedarf unter korrekter Berücksichtigung der internen Last
- Energie- und Massenströme

Im Detail erlaubt diese Methode die physikalisch korrekte Berechnung von:

- Thermischer Strahlung (kurz- und langwellig) inkl. Eigen- und Fremdverschattung
- Strahlung durch transparente Elemente (Gläser mit Beschichtungen, Storen, etc.)
- Wärmeströme unter Beachtung temperaturabhängigen Wärmeübertragungskoeffizienten
- Wärmespeicherung in Bauteilen nach detailliertem physikalischen Aufbau
- Massenströme in Zonen und Öffnungen induziert durch Thermik, Winddruck und Ventilatoren als Stundenmittelwerte
- Temperaturen von Zonen und gewählten Flächen als geometrische und Stundenmittelwerte

4.2 Geometrie

Die Geometrie basiert auf einem bestehenden Geometriemodell eines Schulzimmers.

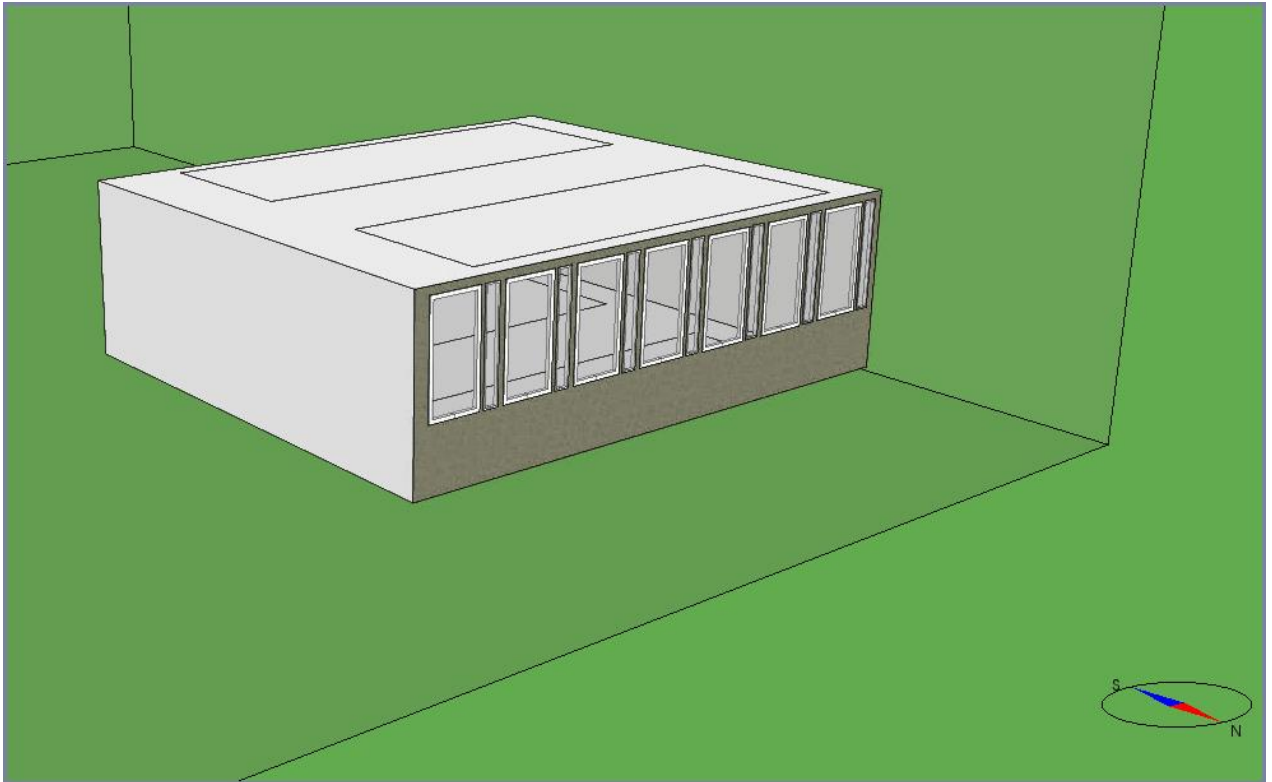


Abbildung 6: Simulationsmodell Glasanteil 45%

Grundfläche	70 m ²
Raumhöhe	2.8 m
Glasfläche	10.5 m ²
Glasflächenanteil bezogen auf Fassadenfläche	45 %

Tabelle 3: Geometrische Daten

4.2.1 Zonierung

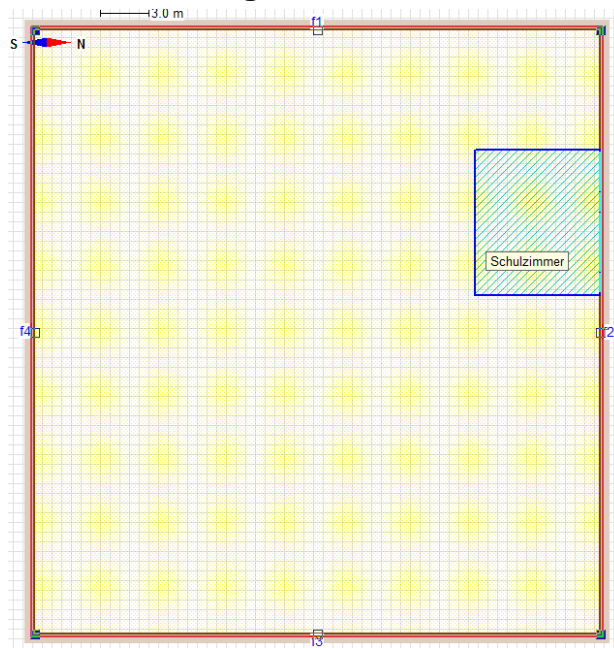


Abbildung 7: Zone Schulzimmer Ausrichtung Nord

4.3 Lage und Wetterdaten

Zur Bewertung der Situation werden die SIA 2028 Wetterdaten Zürich SMA ,normal' genutzt.

Variable	Einheit	Min.	Tag des Min.	Mittelwert	Max.	Tag des Max.
Globalstrahlung	W/m ²	0	0	124.7	933	160
Diffusstrahlung	W/m ²	0	0	67.2	469	182
Lufttemperatur	°C	-9.8	51	9.3	33.2	201
Windgeschwindigkeit	m/s	0	68	2.4	17.7	2
relative Feuchte	%	24	115	75.9	100	44

Tabelle 4: Charakteristische Daten des gewählten Wetterdatensatzes

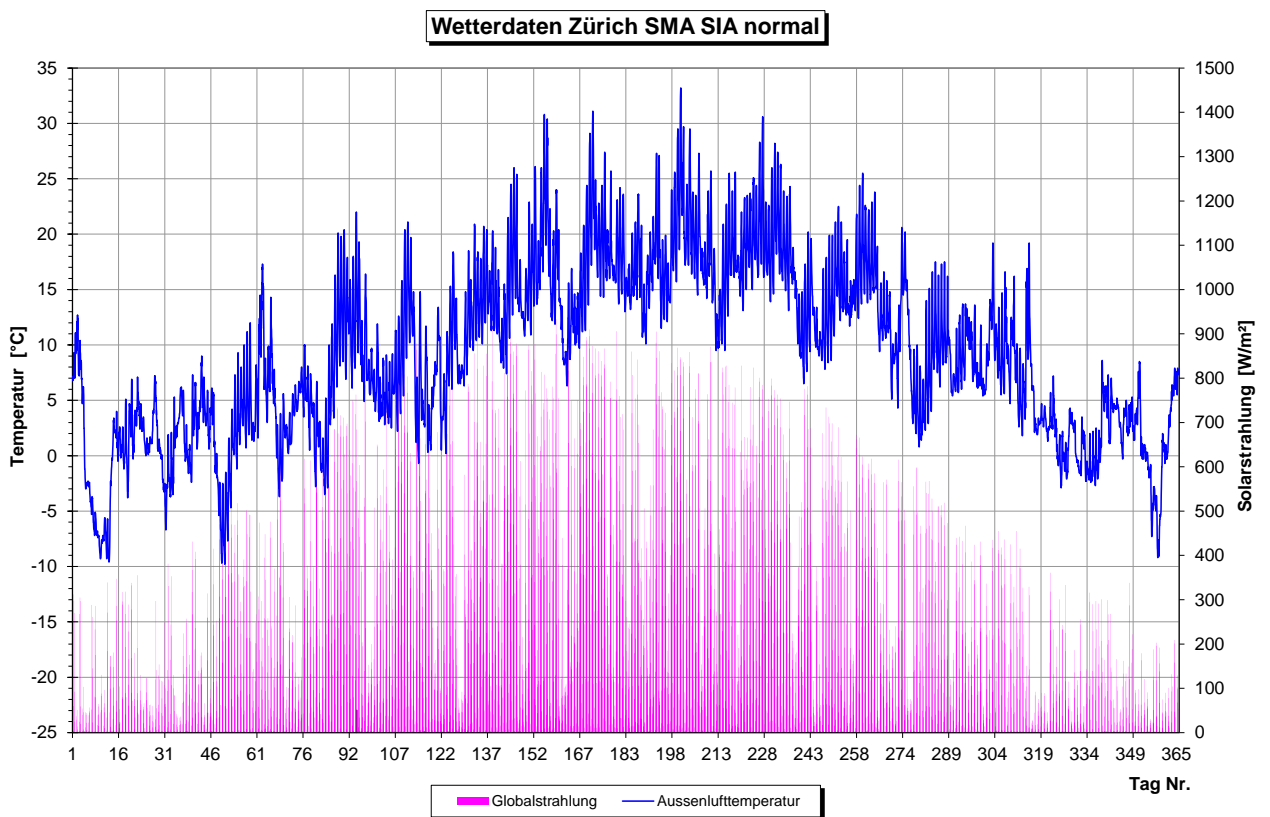


Abbildung 8: Verlauf von Temperatur und Globalstrahlung des gewählten Wetterdatensatzes

4.4 Bauteile

Die Bauteile des Simulationsmodells entsprechen dem vorhandenen Beispielschulzimmer.

Die im Modell verwendeten und für die Temperaturen und Klima wesentlichen Schichtaufbauten sind im Folgenden dokumentiert. Die entsprechenden U-Werte und g-Werte sind mit aufgelistet. In der Berechnung werden jedoch nur die physikalischen Eigenschaften berücksichtigt. Der Wärmeübergang wird für jeden Zeitschritt separat bestimmt.

Folgende Auflistung ersetzt nicht einen Bauteilkatalog. Der Bauteilaufbau entspricht von innen nach aussen.

4.4.1 Verglasungen und Sonnenschutz

4.4.2 Fenster

Typ	g-Wert [-]	U-Wert Glas [W/m ² K]	U-Wert Rahmen [W/m ² K]	Mittlerer Rahmenanteil
Gute Dämmung: 3-fach Wärmeschutzverglasung	0.52	0.60	1.40	20 %
Schlechtere Dämmung: 2-fach Wärmeschutzverglasung	0.6	1.10	1.80	20 %

Tabelle 5: Fenstervarianten

Als Sonnenschutz wurde eine Rafflamelle mit grauer Farbe (Reflektion 38 %) in einer 45° Stellung untersucht, welcher bei einer Einstrahlung von 190 W/m² betätigt wird.

4.4.3 Boden/Decken/Wände

Zwischendecke				
Material	Dicke [mm]	λ [W/(m*K)]	Dichte [kg/m ³]	C [J/(kg*K)]
Linoleum	2.5	0.17	1200	1400
Zementestrich	70	1.4	1000	2000
Beton	280	1.7	2300	880
Bei 50 % der Deckenfläche sind Akustikplatten Herakustik installiert	25	0.09	420	1470
Aussenwand U=0.1 W/m²K (gute Dämmung)				
Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	Dichte [kg/m ³]	C [J/kgK]
Putz	10	0.7	1400	1000
Beton	280	1.7	2300	880
Dämmung Steinwolle	280	0.035	80	130
Metall hinterlüftet	2.5			
Aussenwand U=2.5 W/m²K (schlechte Dämmung)				
Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	Dichte [kg/m ³]	C [J/kgK]
Putz	10	0.7	1400	1000
Sandstein	450	2.3	2600	1000
Innenwände				
Material	Dicke [mm]	λ [W/mK]	Dichte [kg/m ³]	C [J/kgK]
Gipskarton	20	0.25	900	1000
Dämmung	50	0.036	20	750
Gipskarton	20	0.25	900	1000

Tabelle 6: Bauteilaufbauten

4.5 Nutzungszeiten und innere Raumlaster

Folgender Ferienplan (entspricht Daten 2011) ist berücksichtigt:

	Von	Bis
Schulbeginn:		3.1
Sportferien	12.2.	27.2.
Frühlingsferien	25.4.	8.5.
Sommerferien	17.7.	21.8.
Herbstferien	8.10.	23.10.
Weihnachtsferien	24.12.	31.12.

Tabelle 7: Schulferien

Personen: 25 Kinder + 1 Lehrperson

Gemäss einer Abschätzung des AHB's stossen Primarschüler rund einen Sechstel weniger CO₂ als erwachsene Personen aus. Dadurch kann die notwendige Luftmenge pro Person von 30 m³/h auf 25 m³/h reduziert werden. Dies kann in erster Näherung auch für die Abwärme benutzt werden, d.h. 58 W statt 70 Watt. Im Modell wurde diese Annahme umgesetzt, indem die 25 Kinder als 21 Erwachsene betrachtet wurden:

21 Erwachsene + 1 Lehrperson = 22 Personen (Personenaktivität 1.2 Met)

Geräte: Es wird von einer Standardgeräteleistung gemäss SIA 2024 von maximal 4 W/m² ausgegangen.

Beleuchtung: Die Beleuchtung wurde tageslichtgesteuert angenommen (Zielwert der Stadt Zürich: 500 Lux). Als maximale Leistung wurde 8 W/m² eingesetzt. (Angabe AHB gemäss Bsp. Schulhaus Blumenfeld mit LED).

	Personen [W/m ²]	Geräte [W/m ²]	Beleuchtung [W/m ²]
Schulzimmer	22	4	8

Tabelle 8: Innere Lasten bei 100% Last

Tagesprofile gemäss Vorgabe SIA 2024:

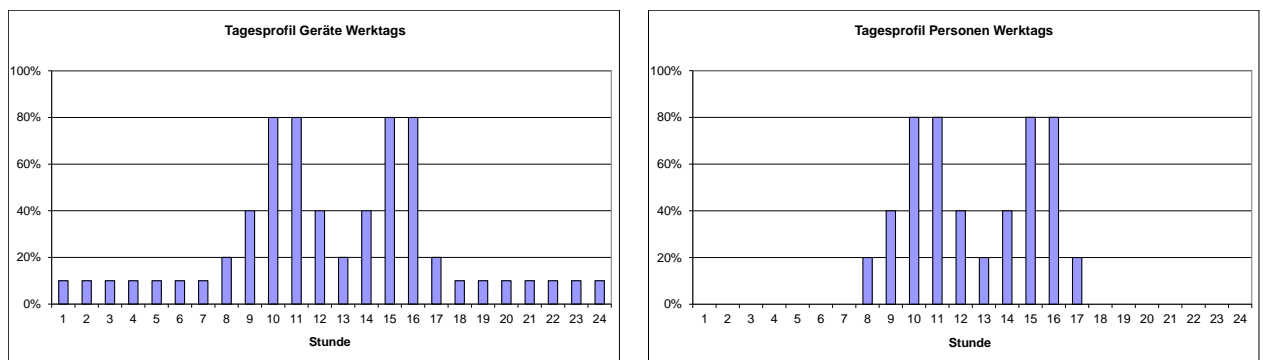


Abbildung 9: Tagesprofil Geräte und Personen Schulzimmer (SIA 2024)

4.6 HLK

4.6.1 Heizen

Der Sollwert für Raumlufttemperatur beträgt gemäss den Richtlinien der Stadt Zürich während der Nutzung 21°C.

4.6.2 Mechanische Lüftung

Die Luftmenge ist an das Belegungsprofil angepasst. Die Luftmenge beträgt 25 m³/h Person, d.h. total 625 m³/h. Bei einer maximalen Stundenauslastung von 80% (siehe Tagesprofil Personen) ergibt sich eine maximale Luftmenge von 500 m³/h resp 138 l/s.

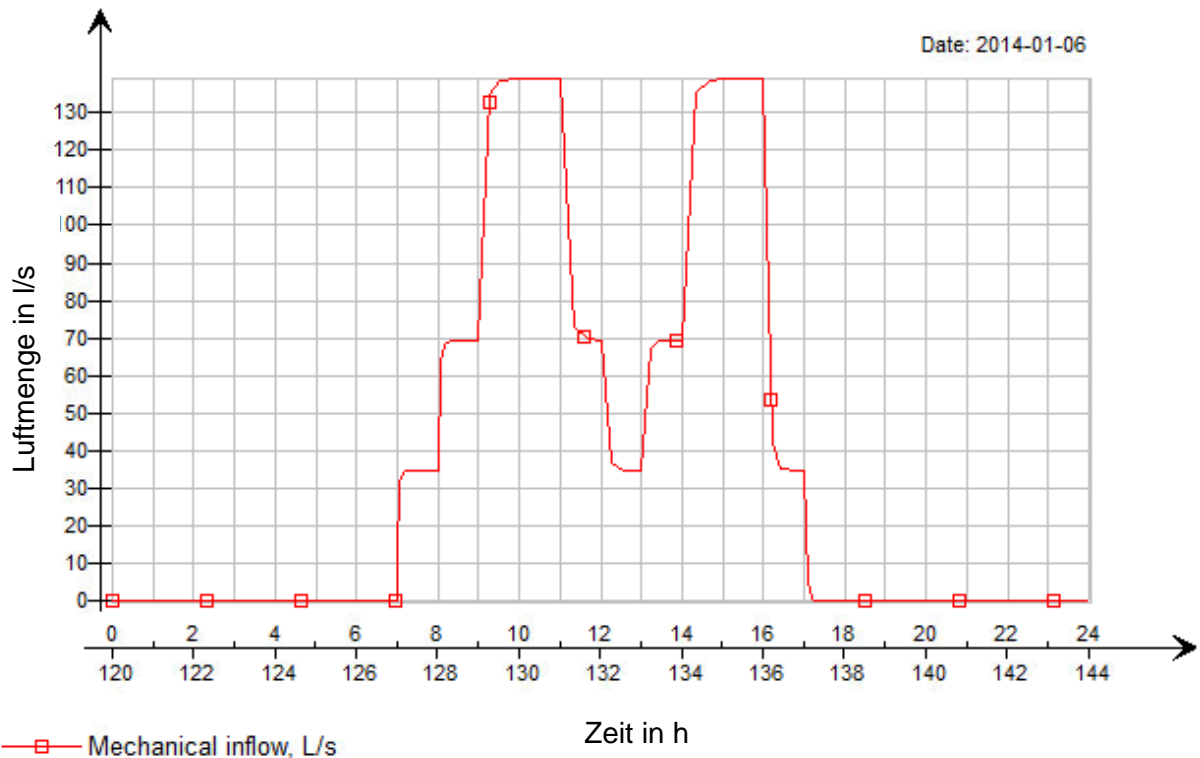


Abbildung 10: Tagesprofile Luftmenge angepasst an Belegung

Für den Fall mit mechanischer Lüftung wird angenommen, dass der Temperaturrückgewinnungsgrad der Wärmerückgewinnung 80% beträgt und die Zuluft-Temperatur minimal 18° C beträgt. Die Temperatur wird dabei durch den Ventilator um 1 K erhöht, d.h. das Heizregister muss die Temperatur auf 17 °C erwärmen. Die Wärmerückgewinnung ist im Modell geregelt, d.h. wenn die Ablufttemperatur > 24°C wird die Wärmerückgewinnung reduziert (falls die Aussenlufttemperatur tiefer als die Ablufttemperatur ist).

Specific Fan Power (SFP):

Für eine einfache Lüftungsanlage mit Lufterwärmung gilt gemäss SIA 382/1

	Grenzwert W/(m ³ /h)	Zielwert W/(m ³ /h)
Zuluft	0.21	0.14
Abluft	0.14	0.083

Tabelle 9: SFP Ziel – und Grenzwert gemäss SIA 382/1 Tabelle 20

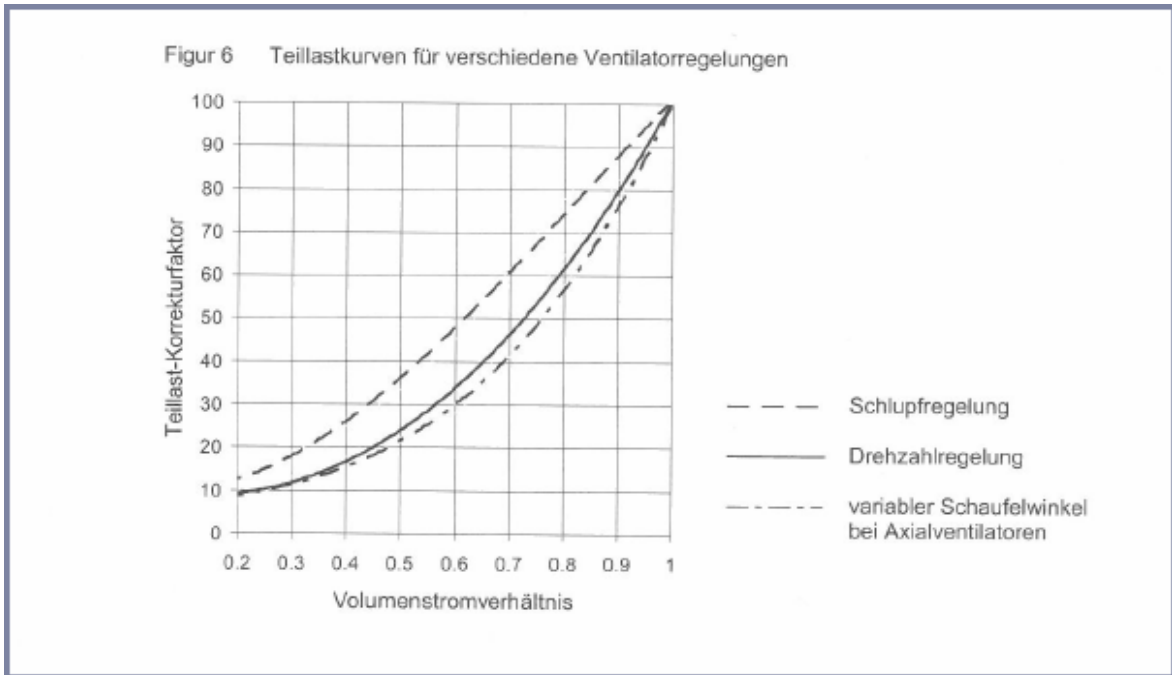


Abbildung 11: Ventilator Teillastkorrekturfaktor gemäss SIA Merkblatt 2044 (Drehzahlregelung)

Für die Berechnung des Elektrizitätsbedarfs der Ventilatoren wurden neben den SFP-Faktoren auch das Teillastverhalten bei reduzierter Luftmenge gemäss Merkblatt SIA 2044 berücksichtigt (Drehzahlregulierung). Als minimale Luftmenge der Lüftungsanlage wurde 20 % angenommen.

Die Energien für die Nacherwärmung der Luft im Monobloc und für die Frostsicherheit sind eingerechnet.

4.6.3 Automatische Fensterlüftung

Um die gleiche Luftqualität wie im Fall mit mechanischer Lüftung zu erhalten, wurde die gleiche Luftmenge eingebracht, aber mit Aussenluftkonditionen.

Bei der automatischen Fensterlüftung (V02 und V04) benötigen auch die Antriebe Elektrizität. Gemäss Angaben AHB / Lieferant ist mit 6 Wh / Tag und Antrieb zu rechnen: Bei der Annahme von 4 Antrieben pro Klassenzimmer und 40 Wochen Schule pro Jahr ergibt sich ein Jahres-Elektrizitäts-Bedarf für die Antriebe von $6 \text{ Wh/Tag} \cdot 4 \text{ Stück} \cdot 5 \text{ Tage} \cdot 40 \text{ Wochen} = 4.8 \text{ kWh pro Jahr}$.

4.7 Infiltration

Für die Infiltration wurde ein Luftvolumenstrom von $0.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ Aussenfläche angenommen.

5 Vergleich Energiebedarf

Die Simulationen führten zu untenstehenden End-Energie-Verbräuchen.

Stromverbrauch der mit einer CO₂-Regulierung bedarfsgerecht betriebenen Lüftung:

- Mechanische Lüftung, welche den SIA-Zielwert einhält 1.2 kWh/m²a
- Mechanische Lüftung, welche den SIA-Grenzwert einhält 1.9 kWh/m²a
- Automatische Fensterlüftung (Regulierung, Antriebe, ...) 0.1 kWh/m²a

Heizenergie-Bedarf:

- V01: gute Hülle, mechanische Lüftung mit WRG 0.2 kWh/m²a
- V02: gute Hülle, automatische Fensterlüftung 18.4 kWh/m²a
- V03: schlechte Hülle, mechanische Lüftung mit WRG 18.9 kWh/m²a
- V04: schlechte Hülle, automatische Fensterlüftung 46.8 kWh/m²a

Die Simulationen zeigen, dass ein bedarfsgerecht betriebenes Lüftungssystem mit WRG gegenüber einer automatischen Fensterlüftung aus energetischer Sicht ein Gewinn ist. Der energetische Vorteil des Lüftungssystems mit Wärmerückgewinnung (WRG) ist umso grösser, je schlechter die energetische Qualität der Gebäudehülle ist. Das liegt daran, dass die Heizperiode in energetisch guten Gebäuden kürzer ist und die internen Lasten (Abwärme von Schülern und Computern, etc.) ausserhalb der Heizperiode die Lüftungsverluste wettmachen können.

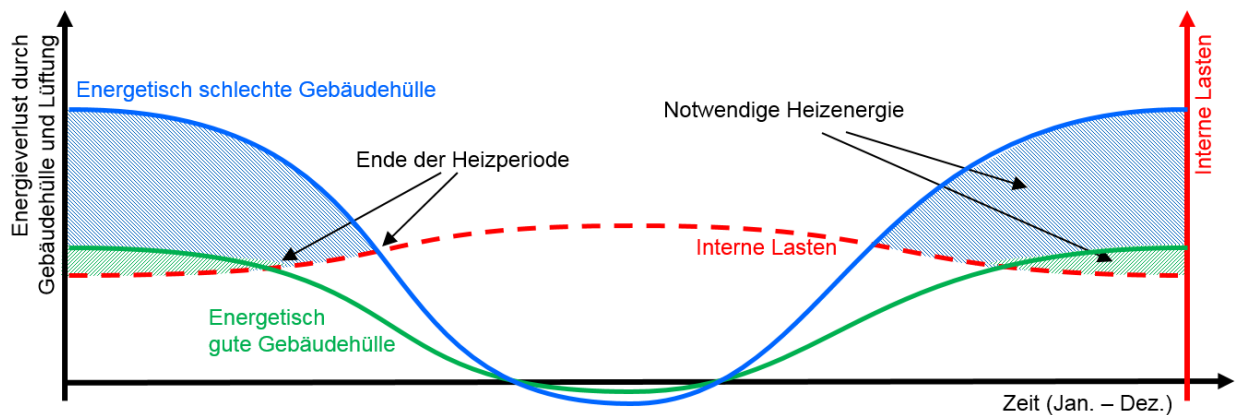


Abbildung 12: Dauer der Heizperiode in Funktion der energetischen Qualität der Gebäudehülle (Beispielbild)

Der Heizenergie-Bedarf kann je nach Wärmeerzeugungssystem mehr oder weniger effizient gedeckt werden. Wird der energetische Nutzen von Lüftungssystemen in mit Wärmepumpen beheizten Gebäuden bestimmt, so kann einfach der Strom für die Lüftung mit dem Strom für die Wärmepumpe verrechnet werden.

Kommen Brennstoffe wie Holz oder Gas zur Beheizung des Hauses zum Einsatz, verändern sich die Resultate je nach gewählter Methodik. Die gemachten Vergleiche basieren auf folgenden Varianten:

- Wärmepumpe mit JAZ = 4.5
- Wärmepumpe mit JAZ = 3.0
- Bivalentes System mit 75 % Wärmepumpe mit JAZ = 3.0 und 25 % Gas
- Holz-Pellet-Heizung
- Gasheizung

Die nationalen Gewichtungsfaktoren – wie sie auch von MINERGIE verwendet werden – sind:

- Strom 2.0
- Gas 1.0
- Holz 0.7

Werden Primärenergie (PE) oder Treibhausgas-Emissionen (THG) miteinander verglichen, so muss die Stromqualität und die Art des Holzbrennstoffes festgelegt werden. Für diese Arbeit wird von Holz-Pelletheizungen und dem schweizerischen Verbraucher-Strom-Mix ausgegangen. Der städtische Verwaltungsmix von Zürich ist dem schweizerischen Strommix aus ökologischer Sicht überlegen und würde die Ergebnisse zugunsten der strombasierten Technik - sprich der Lüftungssysteme - verschieben.

Der Studie liegt die Annahme zugrunde, dass die Lüftungsanlagen aus hygienischen Gründen auch ausserhalb der Heizperiode betrieben werden. Würde die Lüftung als reine Energie-Effizienz-Massnahme betrachtet und wäre nur während der Heizperiode in Funktion, würde der Stromverbrauch für die Lüftung massiv sinken.

Alle Resultate sind Jahresbilanzen. Es wird nicht berücksichtigt, dass Strom im Sommer ökologisch und ökonomisch weniger Wert ist als im Winter. Würde dieser Effekt berücksichtigt, würden die mechanischen Lüftungsanlagen besser abschneiden, da diese im Gegensatz zu den Heizsystemen ganzjährig Strom verbrauchen.

Der in der SIA 382/1 definierte Zielwert für den Stromverbrauch von Lüftungssystemen ist grundsätzlich für zentrale Lüftungssysteme erreichbar, erfordert aber kurze Wege und grosse Kanäle. Dies ist insbesondere bei Instandsetzungsprojekten sehr anspruchsvoll, da in vielen Fällen der Platz für zentrale Lüftungssysteme fehlt. Mit dezentralen Geräten – also z.B. einem Gerät pro Klassenzimmer - ist die Erreichung des SIA-Zielwertes aufgrund der kurzen Wege einfacher.

Zu den verschiedenen Heizungssystemen sei erwähnt, dass in Neubauten Holz- und Gasheizungen nur selten eingesetzt werden und dass in Gebäuden mit einer schlechten Hülle das Erreichen einer JAZ von 4.5 sehr anspruchsvoll ist.

5.1 Bewertung mittels nationalen Gewichtungsfaktoren

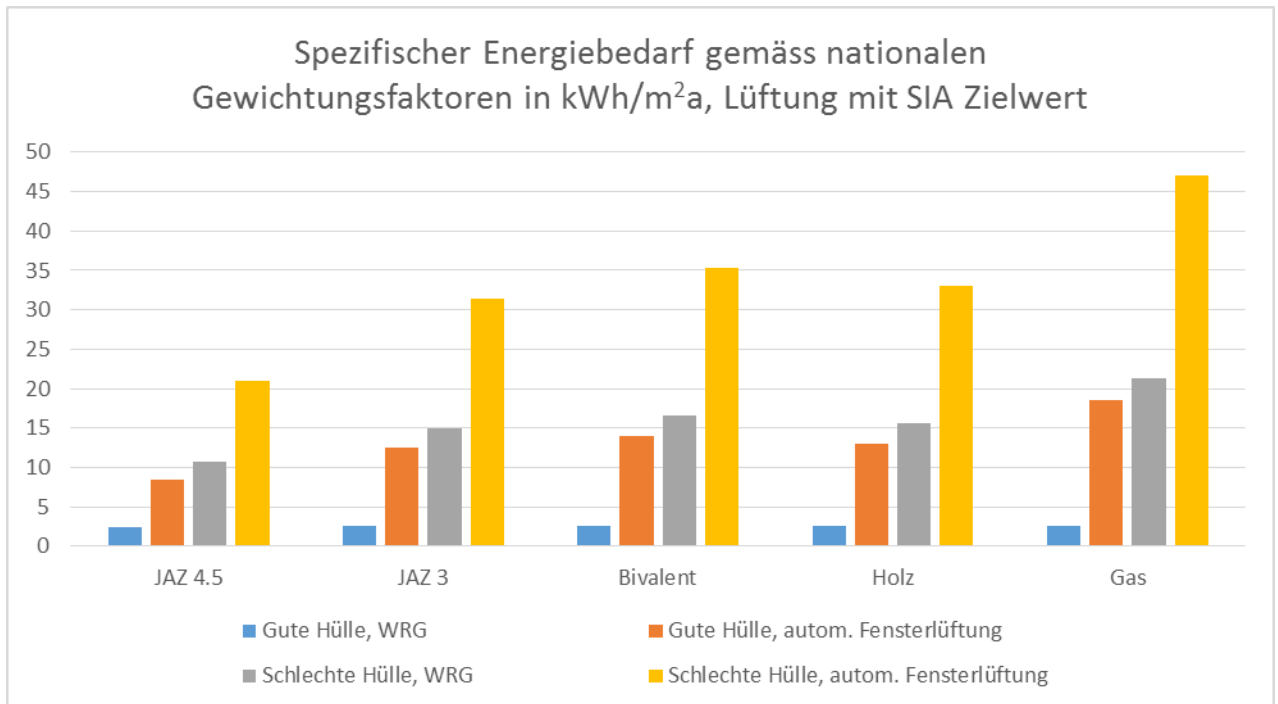


Abbildung 13: Spezifischer Energiebedarf gemäss nationalen Gewichtungsfaktoren, Lüftung mit SIA Zielwert

Abbildung 13 zeigt die resultierenden, gemäss den nationalen Gewichtungsfaktoren bewerteten Energieverbräuche pro Quadratmeter für die Lüftung und für verschiedene Wärme-Erzeugungssysteme.

Der erste, blaue Wert zeigt den Energieverbrauch in einem gut gedämmten Klassenzimmer, welches mit einer mechanischen Lüftung mit WRG ausgerüstet ist. Die orange Säule stellt den Energieverbrauch im selben Zimmer dar, wenn statt der mechanischen Lüftung mit WRG ein automatisches Fensterlüftungssystem zu Einsatz kommt. Der graue und der gelbe Balken stehen für eine mechanische, resp. eine automatische Fensterlüftung in einem schlecht gedämmten Klassenzimmer.

In der ersten Wertegruppe „JAZ 4.5“ in Abbildung 13 kommt eine Wärmepumpe (WP) mit einer Jahres-Arbeits-Zahl (JAZ) von 4.5 zum Einsatz. Die zweite Wertegruppe „JAZ 3“ bildet die Verhältnisse ab, wenn die JAZ nur noch 3 beträgt. Dem bivalenten System der dritten Gruppe „Bivalent“ liegt eine Heizung mit einer WP mit JAZ 3.0 und einer Gasheizung (25 % Energie-anteil) zugrunde. Die Wertegruppen „Holz“ und „Gas“ zeigen den Vergleich in einem Gebäude mit einer Holz-, resp. einer Gasheizung.

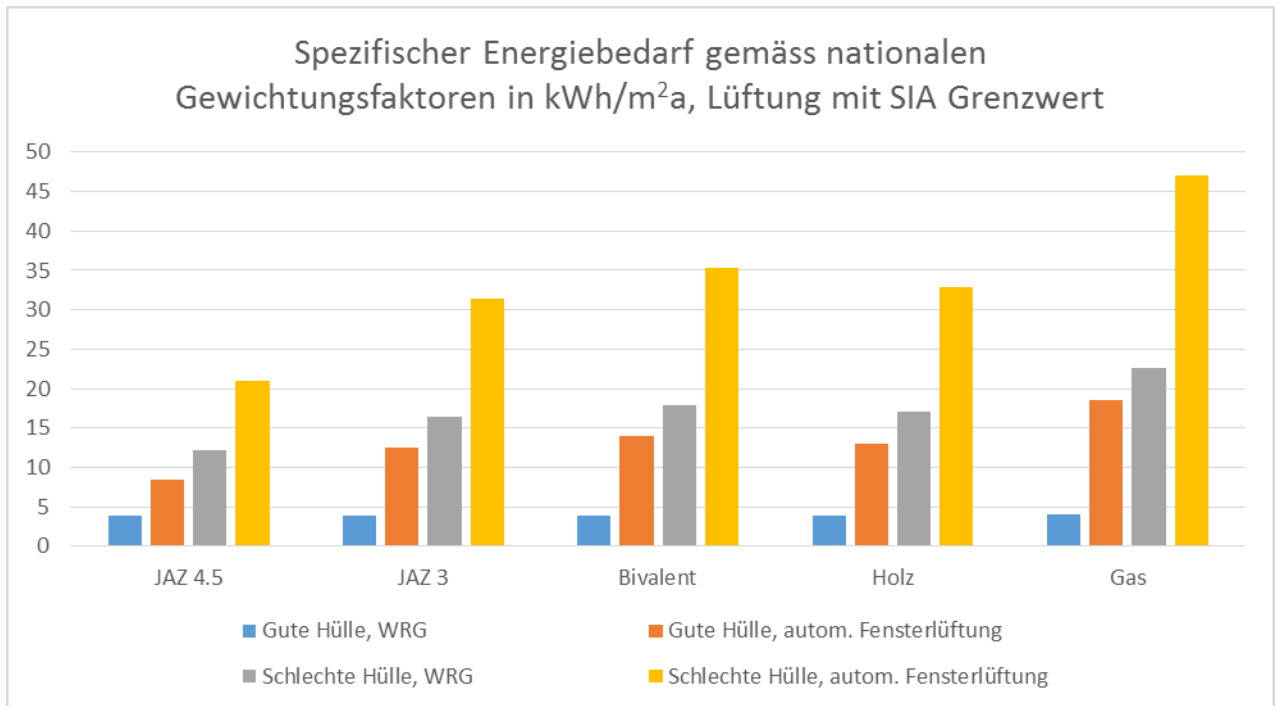


Abbildung 14: Spezifischer Energiebedarf gemäss nationalen Gewichtungsfaktoren, Lüftung mit SIA Grenzwert

Eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist in jeder untersuchten Variante energetisch ein Gewinn. Dies gilt für Gebäude mit guten und noch viel mehr mit schlechten Hüllen.

Das Amt für Hochbauten setzt mehr Schulgebäude instand, als es neue baut. Bei Instandsetzungsprojekten ist der Einbau einer zentralen Lüftungsanlage baulich oft sehr schwierig. Die engen Platzverhältnisse können zu kleinen Kanälen und langen Wegen führen. Dadurch steigt auch der Strombedarf einer Lüftung. Ab welchem Stromverbrauch der Lüftung wäre es aus energetischer Sicht effizienter, automatische Fenster statt einer mechanischen Lüftung mit WRG einzusetzen? Werden dem Vergleich die Varianten 3 und 4 und eine WP-Heizung mit JAZ = 3 zugrunde gelegt, so liegt die Grenze bei einem Endenergie-Stromverbrauch für die Lüftung von 9.4 kWh/m²a. Mit bedarfsgerecht geregelten Lüftungen ist dieser Wert gut einzuhalten. Bei Lüftungsanlagen mit konstantem Volumenstrom (vgl. Kap. 5.5), beträgt die Reserve 40 % einer mit dem SIA-Grenzwert betriebenen Lüftungsanlage.

5.2 Bewertung nach Primärenergie (PE tot.)

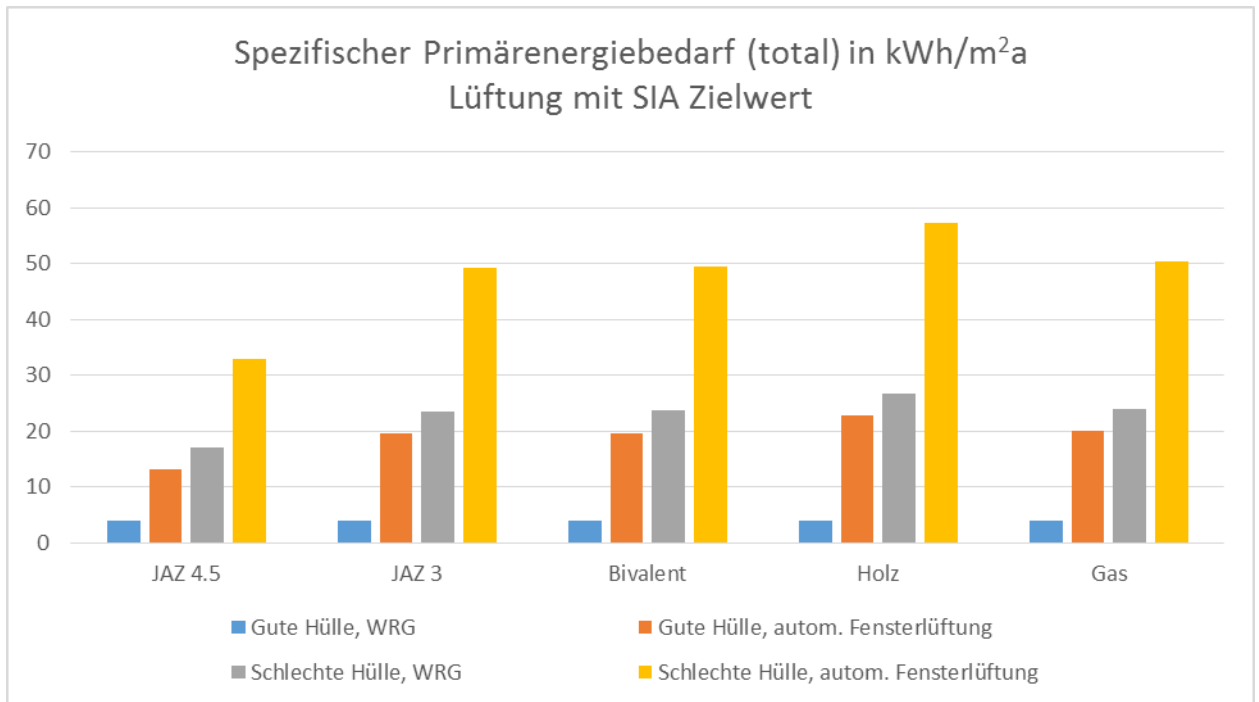


Abbildung 15: Spezifischer Primär-Energiebedarf, Lüftung mit SIA Zielwert, Schweizer Verbraucher-Strommix

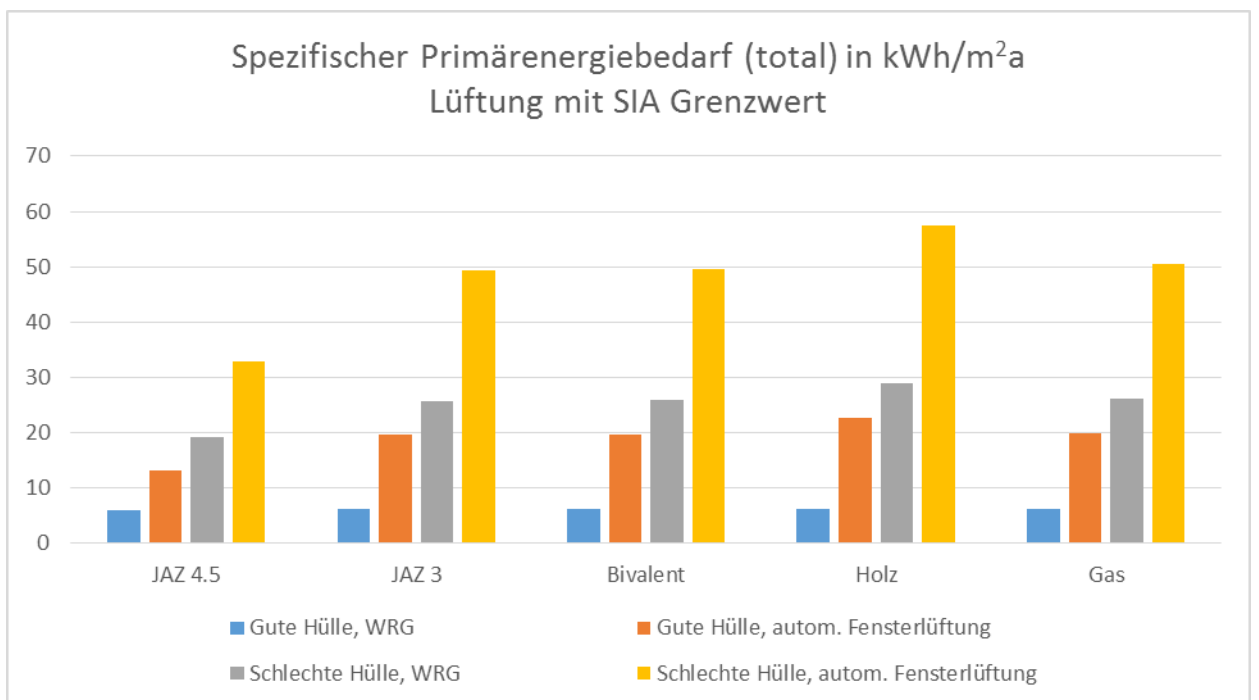


Abbildung 16: Spezifischer Primär-Energiebedarf, Lüftung mit SIA Grenzwert, Schweizer Verbraucher-Strommix

Der Vergleich mittels Primärenergie total zeigt dasselbe Bild wie der Vergleich mit den nationalen Gewichtungsfaktoren.

5.3 Bewertung nach Treibhausgas-Emissionen (THG)

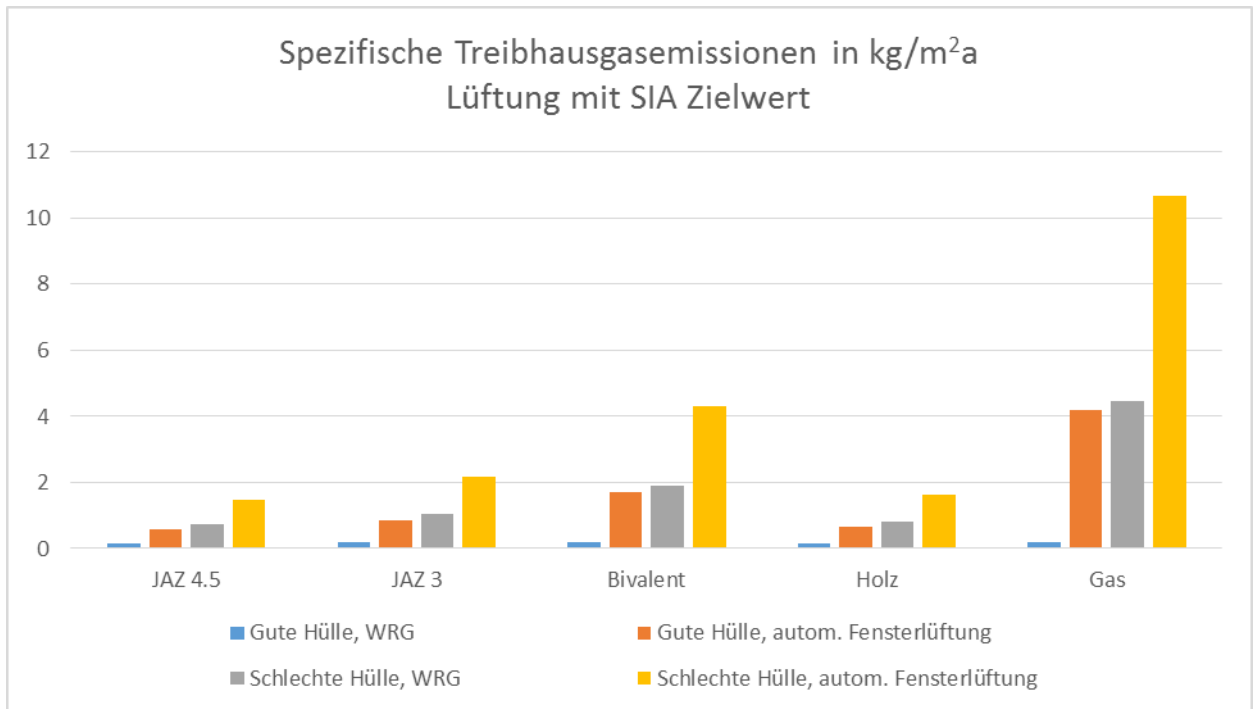


Abbildung 17: Spezifische Treibhausgasemissionen, Lüftung mit SIA Zielwert, Schweizer Verbraucher-Strommix

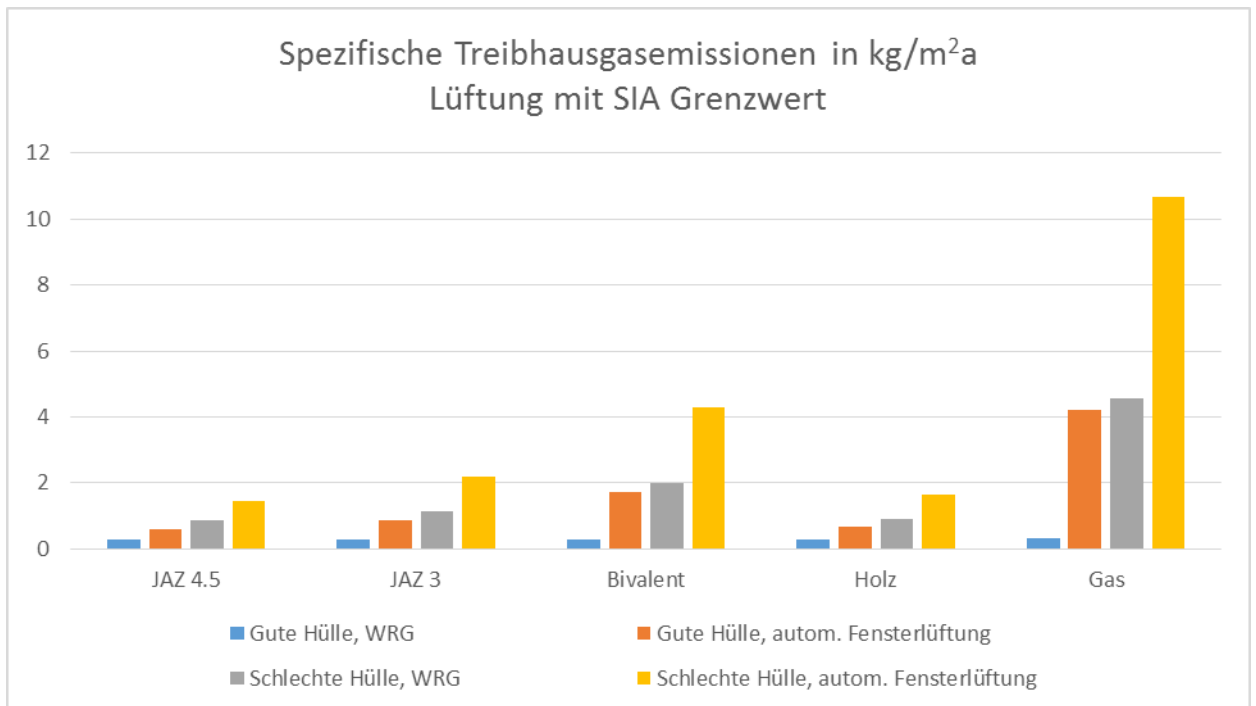


Abbildung 18: Spezifische Treibhausgasemissionen, Lüftung mit SIA Grenzwert, Schweizer Verbraucher-Strommix

Bei Wärmepumpenlösungen zeigt auch der Vergleich mittels THG dasselbe Bild wie bei der Bewertung gemäss den nationalen Gewichtungsfaktoren. Bei Gebäuden welche auf Gas-Heizungen basieren, wird die Lüftung besonders effizient, da sie vom CO₂-armen Strom-Mix der Schweiz profitiert.

5.4 Einfluss der ausgetauschten Luftmengen

Wie verändert sich der Energieverbrauch, wenn Klassenzimmern mehr oder weniger gelüftet werden? Als Referenzen dienen Varianten V01 und V02. Also ein gut gedämmtes Klassenzimmer, welches einmal mit einer energetisch hochwertigen Lüftung (SIA Zielwert) und einmal mit einer automatischen Fensterlüftung ausgestattet ist.

Als Vergleich wird der Energieverbrauch mit doppeltem und halbem Standard-Luftwechsel (SLW) verglichen. Mit diesen Luftwechseln würden Luftqualitäten von 700 ppm, resp. 1600 ppm resultieren.

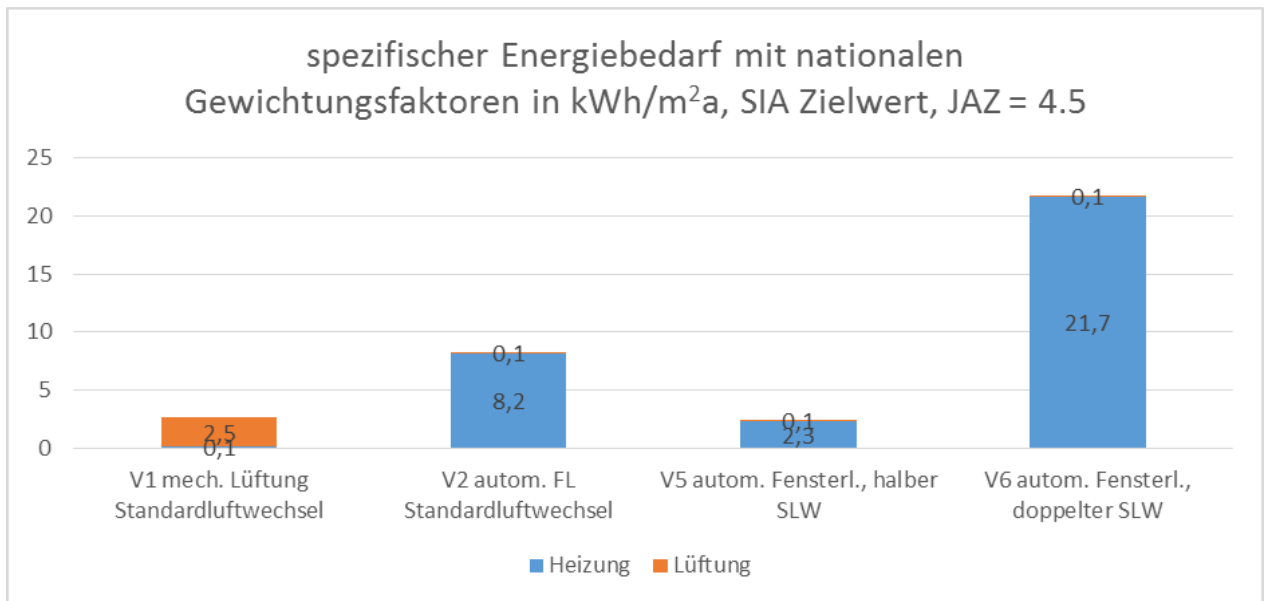


Abbildung 19: Spezifischer Energiebedarf mit JAZ 4.5 und mit nationalem Gewichtungsfaktor für Elektrizität (=2)

Die obige Abbildung zeigt, dass der Energiebedarf bei automatischer Fensterlüftung in der Variante V05, d.h. bei halber Standard-Luftmenge und einer sehr guten Wärmepumpe (JAZ = 4.5), geringfügig kleiner ist als bei der mechanischen Lüftung mit dem Standard-Luftwechsel. Wird hingegen zu viel gelüftet (V06), so steigt der Energieverbrauch markant an.

Würde der Vergleich bei einem weniger effizienten Heizungssystem wie z.B. einer WP mit JAZ = 3 oder einer Gasheizung gemacht, so würde der Heizenergiebedarf aller verglichenen Varianten ohne WRG entsprechend grösser werden.

Was ist der Einfluss der geforderten Luftqualität? Würde auch bei der mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung der Standardluftwechsel halbiert, so wäre der resultierende Energiebedarf wieder kleiner als derjenige bei einer automatischen Fensterlüftung. Eine Veränderung der Luftqualität streckt, resp. staucht die Resultate. An der Aussage, dass eine WRG aus energetischer Sicht gegenüber einer automatischen Fensterlüftung im Vorteil ist, ändert sich durch das Verändern des Luftwechsels nichts.

Die gefundenen Resultate zum Luftwechsel lassen den Schluss zu, dass bei einem manuell gelüfteten Klassenzimmer der Nutzereinfluss auf den Energieverbrauch sehr gross ist.

5.5 Einfluss einer bedarfsgerechten Regelung

Welchen Einfluss hat eine bedarfsgerechte Regelung - also ein System, welches die umgewälzte Luftmenge immer an den effektiven Lüftungs-Bedarf anpasst?

Wird die Luftmenge nicht wie in dieser Studie angenommen an den Bedarf angepasst, sondern läuft die Lüftungsanlage während der Nutzungszeit trotz Teilbelegung des Klassenzimmers immer mit der vollen Leistung, so erhöht sich der Stromverbrauch der Lüftung markant.

Da die Primarschüler für Speziallektionen wie Turnen, Werken oder Kochen das Klassenzimmer regelmässig verlassen, sind diese Unterrichtsräume sehr unterschiedlich belegt. Eine bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge spart entsprechend viel Energie.

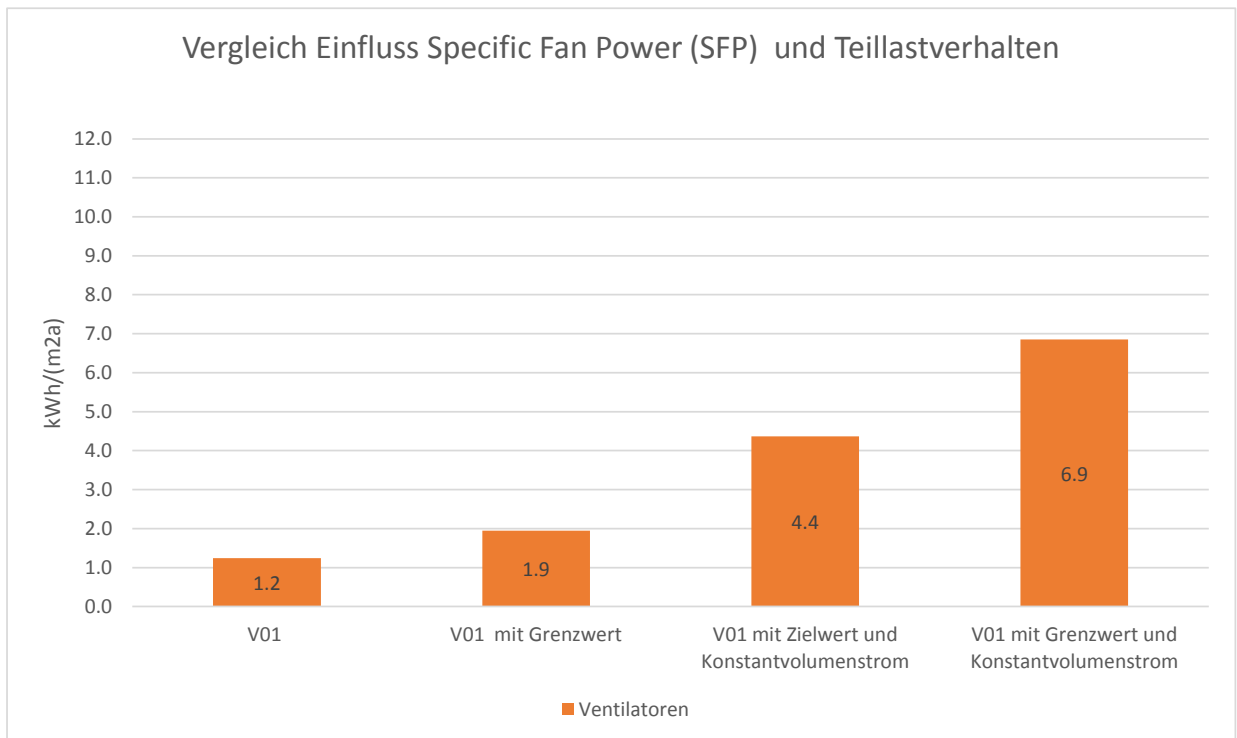


Abbildung 20: Spezifischer Elektrizitätsbedarf Ventilatoren

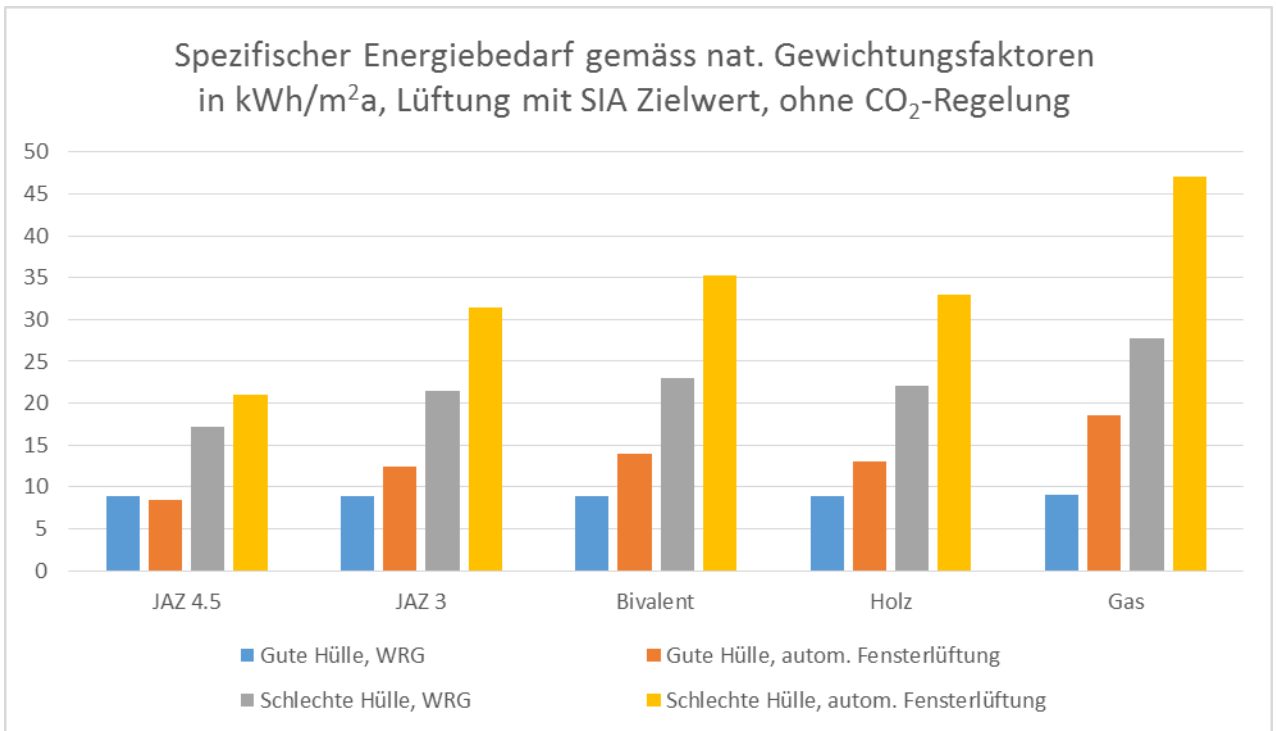


Abbildung 21: Spezifischer Energiebedarf gemäss nationalen Gewichtungsfaktoren, Lüftung mit SIA Zielwert, ohne CO₂-Regulierung

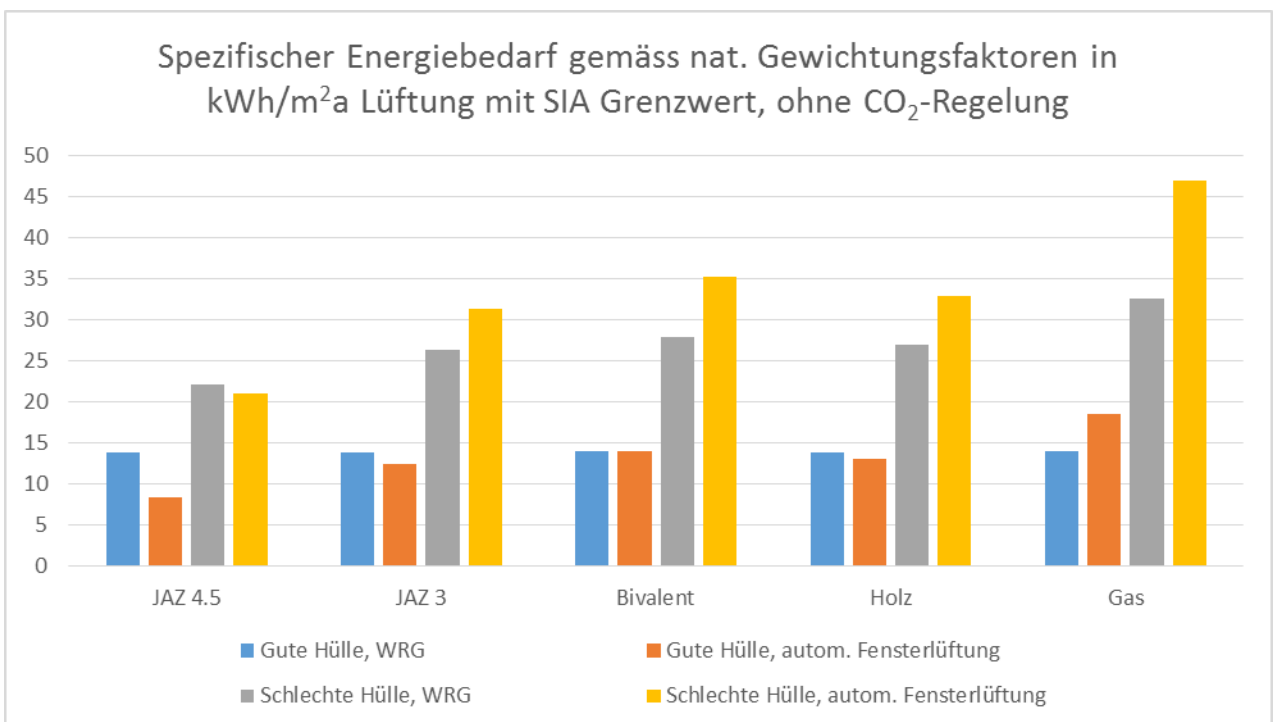


Abbildung 22: Spezifischer Energiebedarf gemäss nationalen Gewichtungsfaktoren, Lüftung mit SIA Grenzwert, ohne CO₂-Regulierung

Gemäss den obigen Abbildungen ist aus energetischer Sicht eine Lüftung ohne bedarfsgerechte Regulierung in Neubauten mit effizienten Wärmepumpensystemen (JAZ 4.5) schlechter als eine automatische Fensterlüftung. Bei energetisch schlechten Hüllen ist die Lüftung mit WRG nur im Fall einer JAZ von 4.5 nicht besser als eine automatische, bedarfsgerecht geregelte Lüftung. Allerdings ist das Erreichen einer JAZ von 4.5 bei einem Gebäude mit einer energetisch schlechten Hülle sehr anspruchsvoll. Bei einer energetisch guten Hülle in Kombination mit einer hoch-effizienten Wärmepumpe und einer nicht bedarfsgerecht geregelten Lüftung ist folglich der Systemscheid Lüftung nicht mehr so relevant. Hingegen bleiben bei einer energetisch schlechten Hülle die Unterschiede auch bei mechanischen Lüftungen ohne CO₂-Regelungen markant.

5.6 Resultate Energiebedarf (Ausrichtung Nord vs. Süd)

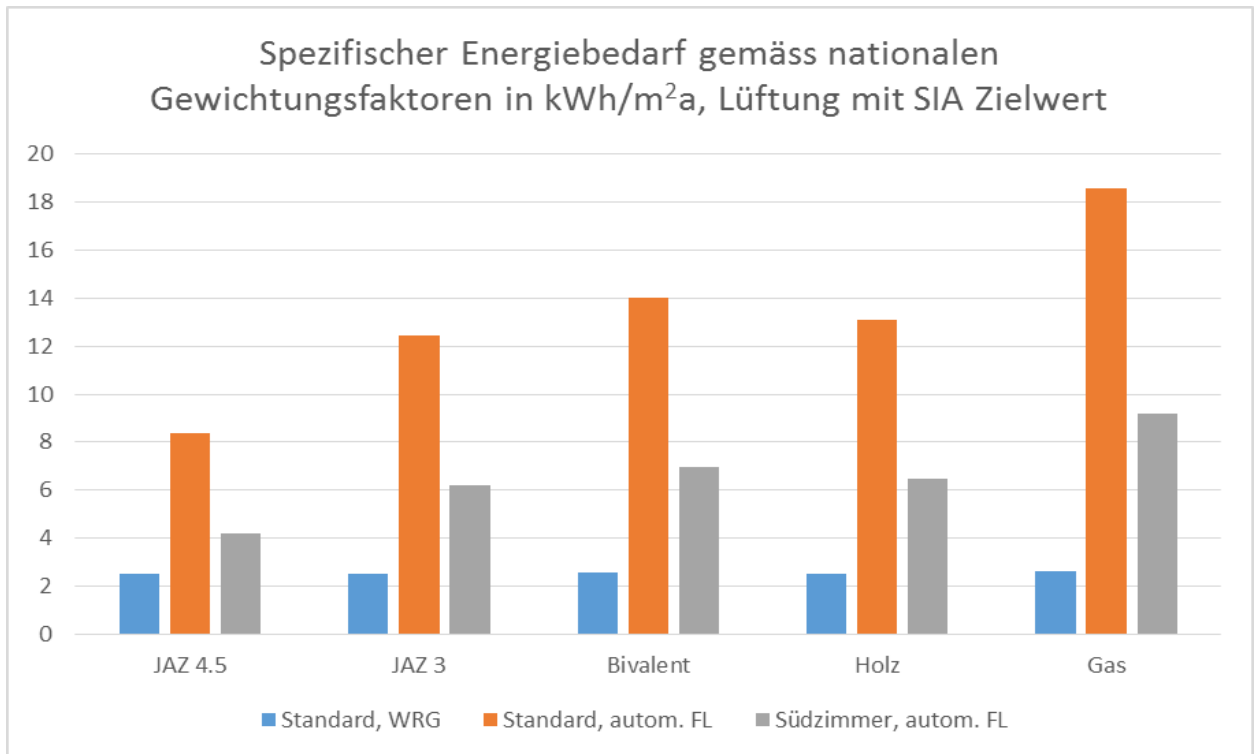


Abbildung 23: Spezifischer Elektrizitätsbedarf Ventilatoren und Heizenergie gemäss nationalen Gewichtungsfaktoren

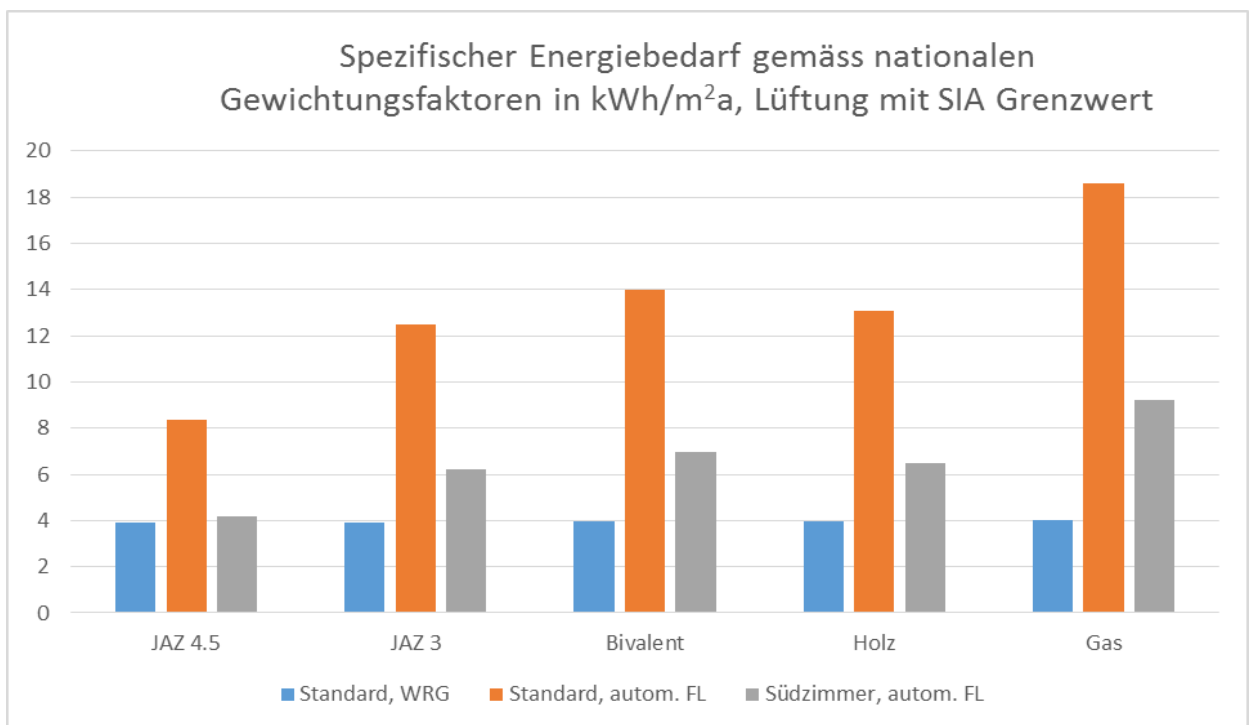


Abbildung 24: Spezifischer Elektrizitätsbedarf Ventilatoren und Heizenergie gemäss nationalen Gewichtungsfaktoren

Der Fall mit Zimmerausrichtung Süd (V07) zeigt eine deutliche Reduktion des Heizenergiebedarfs bei der Variante automatische Fensterlüftung und guter Dämmung. Der Grund dafür ist, dass im Winter die solare Einstrahlung zum Aufwärmen der kalten Aussenluft genutzt werden kann. Je mehr überschüssige Energie im Raum ist, welche nicht die Transmissionsverluste der Aussenwände decken muss, umso besser kann die Energie genutzt werden, um bei der automatischen Fensterlüftung die kalte Aussenluft aufzuwärmen. Die Simulation wurde mit einem Klassenzimmer mit einer Aussenfläche gemacht. Findet ein Wärmeverlust nach aussen über weitere Flächen statt, verschlechtert sich die energetische Bilanz der automatischen Fensterlüftung.

5.7 Resultate Energiebedarf Vergleich mit SIA Merkblatt 2024

Um einen Vergleich mit den SIA-Standardwerten für ein Schulzimmer zu erhalten, sind in folgender Abbildung die zwei simulierten Grundvarianten V01 (mechanische Lüftung) und V02 (automatische Fensterlüftung) mit den Standardwerten (sowie Min- und Maximalwerten) für ein Schulzimmer gemäss Merkblatt 2024 aufgezeigt. Für den Heizenergiebedarf wurde dabei eine Jahresarbeitszahl von 4.5 verwendet, um die Heizenergie in Elektrizität umzurechnen.

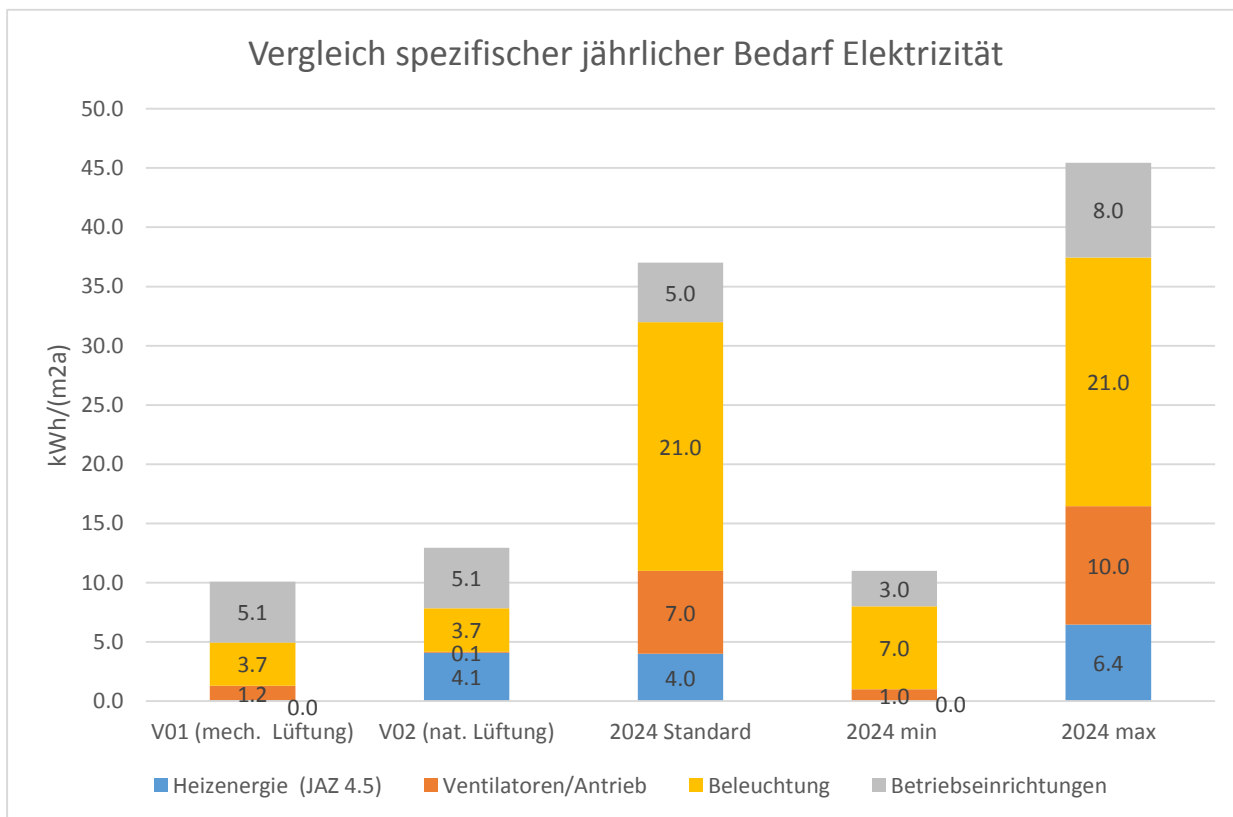


Abbildung 25: Vergleich spezifischer Elektrizitätsbedarf Variante V01 und V02 mit Schulzimmer gemäss SIA 2024

Wie die obige Abbildung zeigt, liegt der simulierte Wert für die Betriebseinrichtung leicht über dem SIA Standardwert von 5.0 kWh/(m²a). Bei der Beleuchtung sind die Werte deutlich unter den SIA Werten. Dies aufgrund der Annahme, dass heute LED-Beleuchtungen zum Einsatz kommen (spezifische Leistung von 8 W/m²). Eine ineffiziente Beleuchtung würde auf unerwünschte Weise (Elektrodirektheizung) das Klassenzimmer heizen.

Bei der Antriebsenergie der Ventilatoren liegt der berechnete Elektrizitätsbedarf (1.2 kWh/(m²a)) leicht über dem SIA-Minimalwert Ventilatoren. Dieser Wert der Variante V01 entspricht dem SIA-Zielwert für Lüftungsanlagen. Bei den anderen Simulations-Varianten wurden auch die Werte des SIA-Grenzwertes eingesetzt. Beide sind nur mit effizienten EC-Ventilator-Antrieben und bedarfsgerechten Betrieb erreichbar.

Die Heizenergie ist bei der Variante mit einer mechanischen Lüftung praktisch null, dies entspricht auch beim Merkblatt SIA 2024 dem Minimalwert. Bei der Variante automatische Fensterlüftung entspricht der Bedarf praktisch dem Standardwert.

Wie das Diagramm zeigt, ist bei einem Schulzimmer mit den hohen internen Lasten die Heizenergie nicht der wichtigste Faktor für den Energieverbrauch - die Beleuchtung und die Betriebseinrichtungen spielen zusammen eine grössere Rolle.

6 Heizleistungsbedarf und Heizperiode

Variante	Spezifischer Heizleistungsbedarf W/m ²	Heizperiode (während Lüftungsbetrieb)
V01	20	27.2.-3.3.
V02	57	23.10.-19.4.
V03	71	23.10.-13.5.
V04	100	27.9.-13.5.
V05	36	21.11.-27.3.
V06	114	27.9.-13.5.
V07	36	17.11.-25.3.

Tabelle 10: Heizleistungsbedarf und Heizperioden der Varianten

Der Heizleistungsbedarf wurde unter Berücksichtigung der internen Lasten mit den vorgegebenen Tagesprofilen gerechnet, d.h. es handelt sich nicht um eine Auslegung für einen unbelegten Raum. Die Räume wurden nachts nicht geheizt, deshalb ergab sich ein Peak in der ersten Morgenstunden der in der Auswertungstabelle nicht berücksichtigt wurde und durch die die vorgegebene Leistung im Raum auch begrenzt wurde. Der Wärmeabgabetyt und die Regelstrategie (Nachtabenkung, Aufheizung) beeinflussen ebenfalls die Heizleistung. Dies wurde nicht im Detail untersucht.

Der Einfluss der Lüftung auf die Heizleistung ist bei einer Betrachtung des Klassenzimmers gross. Es kann davon ausgegangen werden, dass gemittelt über die ganze Fläche des Schulhauses die Unterschiede kleiner sein werden.

Aufgrund der errechneten Heizperioden liegt der Schluss nahe, dass bei einer auf Monats- statt Jahresbilanzen basierenden Methodik der energetische Vorteil von Lüftungsanlagen mit WRG gegenüber automatischen Fensterlüftungen grösser werden wird.

7 Erstellungsenergie

Die Erstellungsenergie von gebäudetechnischen Anlagen ist ohne konkretes Bauprojekt mit entsprechendem Materialauszug nur grob abschätzbar. Der folgende Vergleich basiert auf den Zahlen des KBOB-Merkblattes Ökobilanzen im Baubereich, resp. SIA 2032 und zeigt die Grössenordnungen für Neubauten auf.

Für eine durchschnittliche zentrale Lüftungsanlage wird im KBOB-Merkblatt ein Bedarf an Erstellungsenergie von 703 MJ/m² angegeben. Bei einer mittleren Abschreibedauer von 30 Jahren ergibt sich ein Erstellungs-Energie-Bedarf für die Lüftung von 6.5 kWh/m²a.

In der KBOB-Richtlinie sind für dezentrale Lüftungsgeräte für Klassenzimmer keine Werte vorhanden. Als Abschätzung wird der fünfzehnfache Wert eines dezentralen Lüftungsgerätes aus der Wohnungslüftung verwendet. Mit dieser Annahme resultiert ein Bedarf an Erstellungsenergie von einem Viertel eines zentralen Lüftungssystems.

Da bei einer Fensterlüftung die nachströmende kalte Luft durch die Heizung wieder erwärmt werden muss, muss die Heizung grösser ausgelegt werden und benötigt entsprechend mehr Erstellungsenergie.

Der Mehr-Bedarf an Erstellungsenergie nur für die Lüftungsanlage kann bei keinem der in Kapitel 5 gemachten Vergleiche die Differenz zwischen den Betriebsenergien mit oder ohne WRG ausgleichen. Am geringsten ist der Unterschied bei einer guten Hülle mit einer sehr guten Wärmepumpe (JAZ = 4.5), weshalb an diesem Fall die Erstellungsenergie für die zusätzlich notwendige Heizung gegengerechnet werden soll. Eine Gasheizung benötigte zwar weniger graue Energie, wäre aber im Betrieb wesentlich ineffizienter als eine EWS-WP.

	MJ/m ²	kWh/m ²	Lebensdauer	kWh/m ² a
Zentrale Anlage	703.0	195.3	30.0	6.5
Dezentrale Lüftung ¹⁾	169.9	47.2	30.0	1.6
EWS-WP 20 W/m²				4.1
Erdwärmesonde (Entzug 35 W/m)	266.0	73.9	50.0	1.5
Heizungs-Zentrale ²⁾	16.3	4.5	20.0	0.2
Wärmeverteilung	173.0	48.1	30.0	1.6
Wärmeabgabe (Bodenheizung)	84.0	23.3	30.0	0.8
EWS-WP 57 W/m²				7.8
Erdwärmesonde (Entzug 35 W/m)	757.0	210.3	50.0	4.2
Heizungs-Zentrale ³⁾	46.4	12.9	20.0	0.6
Wärmeverteilung ⁴⁾	216.0	60.0	30.0	2.0
Wärmeabgabe (Bodenheizung) ⁴⁾	105.0	29.2	30.0	1.0

Tabelle 11: Berechnung der grauen Energie: 1) Abschätzung: 15 x KWL-Einzelgerät gem. Referenz-Datensatz (RDS) 32.010, 2) abgeleitet von RDS 32.001, 3) abgeleitet von RDS 32.003, 4) Aufschlag von 25 % für die dreifache Leistung gegenüber dem 20 W/m²-System

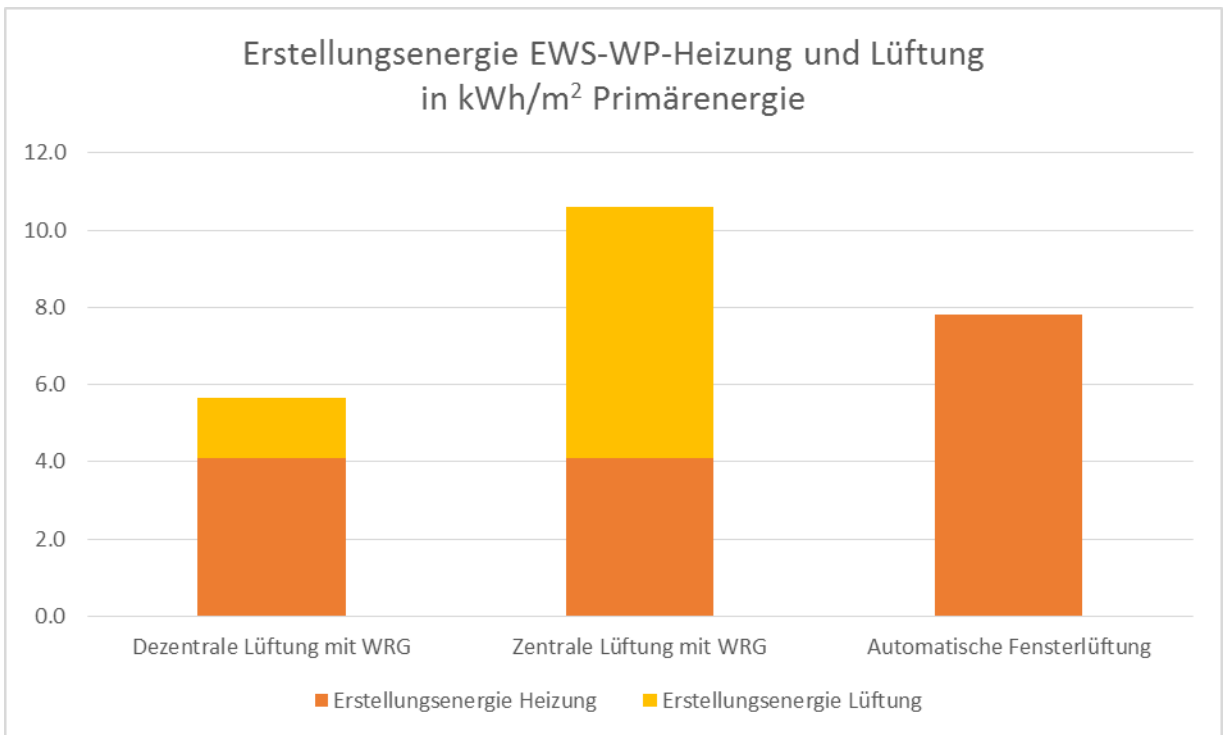


Abbildung 26: Vergleich Erstellungsenergie

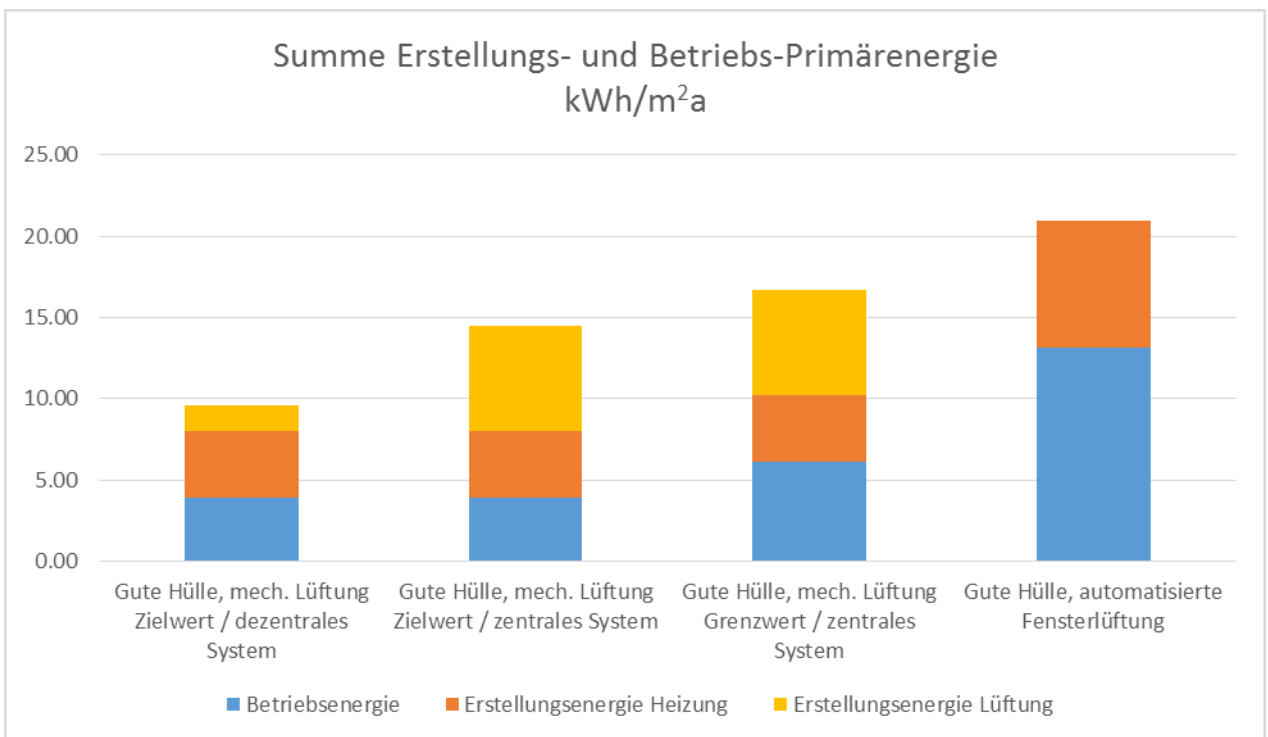


Abbildung 27: Primärenergievergleich (Betrieb und Erstellungsenergie) auf Basis V01 und V02

Aus Sicht der Erstellungsenergie von Neubauten ist es besser, eine dezentrale Lüftungsanlage als eine leistungsfähige Erdwärmesonden-basierte-Wärmepumpe einzubauen. Nicht in den Vergleich eingerechnet sind die Erstellungsenergien für die Regeneration der Erdwärmesonden und für die Automatisierung der Fenster.