

## Vergleich der beiden Lüftungskonzepte der Siedlung Klee bezüglich Ökologie und Ökonomie



Autoren

**Kevin Knecht, Diego Sigrist**

Auftraggeber

**Baugenossenschaft Hagenbrünneli**

## Impressum

Autoren	Kevin Knecht, <a href="mailto:knecht@s3-engineering.ch">knecht@s3-engineering.ch</a> Diego Sigrist, <a href="mailto:sigrist@s3-engineering.ch">sigrist@s3-engineering.ch</a>
Zitiervorschlag	Knecht, K., Sigrist, D., 2018, <i>Vergleich der beiden Lüftungskonzepte der Siedlung Klee bezüglich Ökologie und Ökonomie</i> , Sustainable System Solutions GmbH, Dübendorf
Auftraggeber	Baugenossenschaft Hagenbränneli Lerchenberg 21, 8046 Zürich
Auftragnehmer	Sustainable System Solutions GmbH Zürichstrasse 45, 8600 Dübendorf Tel. +41 44 554 87 98 <a href="http://www.s3-engineering.ch">www.s3-engineering.ch</a> <a href="mailto:info@s3-engineering.ch">info@s3-engineering.ch</a>
Objekt	Siedlung Klee Heinrich-Wolff-Strasse 7-21, 8046 Zürich Mühlackerstrasse 83-95, 8046 Zürich Weidmannstrasse 6-14, 8046 Zürich
Auftrag	17.019 – Studie Lüftungskonzepte Siedlung Klee
Titelbild	Siedlung Klee (Quelle: <a href="http://www.klee-gbmz.ch">www.klee-gbmz.ch</a> )
Inhaltliche Verantwortung	Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.
Haftungsausschluss	Die Informationen in diesem Bericht wurden auf Grundlage von als verlässlich eingeschätzten Quellen erhoben. Sustainable System Solutions GmbH und die Autoren geben keine Garantie bezüglich Eignung oder Vollständigkeit der im Bericht dargestellten Informationen. Die Sustainable System Solutions GmbH und die Autoren lehnen die rechtliche Haftung für jede Art von direkten, indirekten, zufälligen oder anderen Schäden, welcher Art auch immer, und Folgeschäden ausdrücklich ab.

## Zusammenfassung

Eine energetisch optimierte Lüftung reduziert den Wärmebedarf eines Gebäudes im Betrieb, indem einerseits die umgesetzten Luftmengen kontrolliert werden können, und andererseits die Wärme in der Abluft über eine Wärmerückgewinnung (WRG) genutzt werden kann. Allerdings führen Herstellung und Installation eines Lüftungssystems auch zu einer nicht unwesentlichen Umweltbelastung sowie Installations- und Unterhaltskosten. In der vorliegenden Studie wurde anhand der Siedlung Klee in Affoltern eine zentrale Lüftungsanlage mit Lufterwärmung und WRG sowohl finanziell als auch ökologisch mittels Lebenszyklusanalyse mit einer unkontrollierten (manuellen) Fensterlüftung mit Abluft verglichen. Die Siedlung Klee befindet sich zu fast gleichen Teilen im Besitz der Baugenossenschaft Hagenbrünneli (BGH) und der Gemeinnützigen Bau- und Mietergenossenschaft Zürich (GBMZ) und bietet optimale Rahmenbedingungen für diesen Vergleich, da alle 340 Wohnungen über die gleiche Gebäudehülle, Nutzungsart und Wärmeversorgung (Gasheizung) verfügen. Allerdings sind die BGH-Wohnungen mit einer Fensterlüftung und die GBMZ-Wohnungen mit einer zentralen Lüftungsanlage ausgestattet.

In einem ersten Schritt wurden die Allgeinstrom- sowie die Heizwärmeverbräuche der beiden Siedlungsteile ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass der Siedlungsteil mit zentraler Lüftungsanlage  $4.6 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  mehr Allgeinstrom verbraucht als der Siedlungsteil mit unkontrollierter Fensterlüftung, was einem Mehrverbrauch von über 60 % entspricht. Diese grosse Differenz ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auf die Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlage zurückzuführen. Bei der Heizwärme dagegen weist der Siedlungsteil mit zentraler Lüftungsanlage einen 2.4 % geringeren Verbrauch auf als der Siedlungsteil mit unkontrollierter Fensterlüftung. Das theoretisch mögliche Einsparungspotential beläuft sich allerdings auf fast 19 % und wird somit bei weitem nicht ausgeschöpft. Beim ökologischen Vergleich mittels Ökobilanzen schneidet die zentrale Lüftungsanlage bei allen drei Indikatoren schlechter ab, wobei die totale Umweltbelastung – ermittelt mit der Schweizer Methode der ökologischen Knappheit – 36 % höher ist als diejenige der Fensterlüftung mit Abluft. Finanziell über den gesamten Lebenszyklus betrachtet verursacht die zentrale Lüftungsanlage 74 % höhere Kosten, was auf die hohen Investitionskosten (der Lüftungskomponenten und zusätzlichen Betonarbeiten), die höheren Stromkosten sowie die Kosten für Unterhalt und Wartung zurückzuführen ist. Um generell gültige Aussagen zu zentralen Lüftungsanlagen mit WRG machen zu können, wurde in einem nächsten Schritt ein Szenario untersucht, in dem die theoretisch mögliche Reduktion an Heizwärme durch optimales Nutzerverhalten und optimal funktionierende WRG erreicht wird. Zudem wurden optimistisch lange Lebensdauern für die Lüftungskomponenten angenommen. Selbst in diesem idealen Szenario schneidet die zentrale Lüftungsanlage sowohl ökologisch wie auch finanziell schlechter ab. So werden zwar etwas weniger Treibhausgasemissionen verursacht, doch führt die zentrale Lüftungsanlage immer noch zu einer 12 % höheren Umweltbelastung gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Schliesslich wurde auch noch ein fiktives Szenario untersucht, in dem die Wärmeerzeugung nicht mittels Gasheizung, sondern Erdwärmesonden-Wärmepumpen erfolgt. Die zentrale Lüftungsanlage schneidet in diesem Szenario noch schlechter ab gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft. Grund dafür ist, dass es sich bei einer nachhaltigen Wärmeerzeugung sowohl ökologisch als auch finanziell noch weniger lohnt, durch enormen Mehraufwand bei Lüftungskomponenten, Stromverbrauch und Wartung den Heizwärmeverbrauch zu reduzieren. Deshalb verursacht die zentrale Lüftungsanlage – selbst bei einem fast 20 % tieferen Heizwärmeverbrauch gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung – über den ganzen Lebenszyklus betrachtet 27 % mehr Treibhausgasemissionen und eine 36 % höhere allgemeine Umweltbelastung. Die Lebenszykluskosten sind um 79 % höher als jene der unkontrollierten Fensterlüftung.

Die Deutlichkeit der Resultate, die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten und die hohe Eignung der Siedlung Klee als Studienobjekt legen die Vermutung nahe, dass die finanzielle und ökologische Bilanz sehr ähnlich aussieht für ein Grossteil der zentralen Lüftungsanlagen. Die Tendenz der Kantone und Gemeinden, kontrollierte Wohnraumlüftungen (KWL) vermehrt vorzuschreiben bzw. zu fördern sowie die KWL-Anforderungen gewisser Baustandards (z.B. Minergie-Standards) erscheinen mit Blick auf die Resultate der vorliegenden Studie zumindest ökologisch und finanziell als Irrweg.

## Glossar

a	Jahr (Einheitenkürzel)
Annuität	Indikator der Lebenszykluskostenrechnung (LCC): Jährlich fließende, gleichbleibende Zahlung. Setzt sich zusammen aus der Abzahlung des (fiktiv) aufgenommenen Darlehens für die Investition inklusive Zinsen, den jährlichen Kosten und einer Rückstellung für die Zahlung der Demontage und Entsorgung am Ende der Lebenszeit.
BGH	Baugenossenschaft Hagenbrünneli
BKP	Baukostenplan: Transparente Darstellung der Baukosten nach Arbeitsgattungen oder nach Bauteilen
CHF	Schweizer Franken (Einheitenkürzel)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid: Eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff. CO <sub>2</sub> ist ein Treibhausgas.
EBF	Energiebezugsfläche: Die Summe aller Grundflächen eines Gebäudes, die innerhalb der thermischen Gebäudehülle liegen und für deren Nutzung ein Beheizen notwendig ist.
GBMZ	Gemeinnützige Bau- und Mietergenossenschaft Zürich
GWP	Global Warming Potential (Dt. Treibhauspotential): Indikator der LCA-Methode IPCC 2013
Heizwärmeverbrauch	Thermische Energie [kWh], die innerhalb eines Jahrs zum Heizen verbraucht wird.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Dt. Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaveränderung)
JAZ	Jahresarbeitszahl: Kennzahl, die beschreibt, wie effizient ein Wärmepumpensystem am Standort arbeitet. Sie berücksichtigt jegliche Pumpenenergien und Verbräuche für Verdampfer und Kompressor, welche für die Erzeugung der Wärme notwendig sind. Eine JAZ von 4 bedeutet, dass elektrische Energie in der Höhe eines Viertel der erzeugten Heizwärme verbraucht wird.
kg CO <sub>2</sub> -Äqu.	Kilogramm CO <sub>2</sub> -Äquivalente: Einheit des Treibhausgaspotentials (GWP). Alle verursachten Treibhausgase eines Prozesses oder Produktes werden auf das Treibhausgaspotential von CO <sub>2</sub> umgerechnet.
kW	Kilowatt (Einheitenkürzel): Einheit der Leistung
kWh	Kilowattstunde (Einheitenkürzel): Einheit der Energie
KWL	Kontrollierte Wohnraumlüftung
LCA	Life Cycle Assessment/Analysis (Dt. Lebenszyklusanalyse): Ökobilanzierung über den gesamten Lebenszyklus
LCC	Life Cycle Costing (Dt. Lebenszykluskostenrechnung): Berechnung der Kosten eines Systems über den gesamten Lebenszyklus
LCI	Life Cycle Inventory (Dt. Ökologische Sachbilanz)

MJ	Megajoule (Einheitenkürzel): Energieeinheit
PENR	Primary Energy Non-Renewable (Dt. Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf) [MJ]: Indikator der LCA-Methode Cumulative Energy Demand
Sensitivitätsanalyse	Bei der Sensitivitätsanalyse wird durch das Variieren wichtiger Faktoren die Stabilität eines Systems evaluiert und die Unsicherheiten der Berechnungen bestimmt.
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
UBP	Umweltbelastungspunkte: Indikator der LCA-Methode Methode der ökologischen Knappheit
WRG	Wärmerückgewinnung

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	III
Glossar.....	IV
1 Einführung.....	1
1.1. Ausgangslage.....	1
1.2. Ziel der Studie.....	1
1.3. Siedlung Klee.....	1
1.4. Die beiden unterschiedlichen Lüftungskonzepte.....	3
2 Methodik und Modellierung.....	5
2.1. Lebenszyklusanalyse.....	5
2.2. Lebenszykluskostenrechnung.....	6
2.3. Funktionelle Einheit.....	6
2.4. Systemgrenzen.....	7
2.5. Daten.....	8
2.6. Annahmen.....	9
3 Ergebnisse und Diskussion der Bilanzierungen.....	10
3.1. Energiebilanz.....	10
3.2. Ökobilanz.....	13
3.3. Lebenszykluskostenrechnung.....	15
4 Sensitivitätsanalysen.....	16
4.1. Einfluss der finanziellen Parameter.....	16
4.2. Ergebnisse bei idealem Nutzerverhalten und idealer Wärmerückgewinnung.....	18
4.3. Ergebnisse bei längeren Lebensdauern der Komponenten.....	21
5 Verallgemeinertes Szenario mit Erdwärmesonden-Wärmepumpen und Schweizer Verbrauchermix...24	
5.1. Ergebnisse bei längeren Lebensdauern der Komponenten.....	29
6 Fazit und Ausblick.....	33
Abbildungsverzeichnis.....	35
Tabellenverzeichnis.....	36
Anhang.....	37
Anhang A – Formeln der Annuitätenmethode.....	37
Anhang B – Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen.....	38
Anhang C – Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen.....	38
Anhang D – Ökologische Sachbilanzen (LCI).....	39

# 1 Einführung

## 1.1. Ausgangslage

Die Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Primärenergieverbrauchs sind zentrale Ziele der Schweizer Umweltpolitik. Dabei bietet der Gebäudesektor ein besonders grosses Reduktionspotenzial, da er für ca. einen Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie 40 % des Energieverbrauchs in der Schweiz verantwortlich ist.<sup>1</sup>

Insbesondere bei stark gedämmten Neubauten wird ein guter Teil der Wärmeverluste eines Gebäudes durch die Lüftung der Räume verursacht. Die Höhe dieser Lüftungswärmeverluste hängt ab von der Art der Lüftung, der Steuerung sowie dem Vorhandensein einer Wärmerückgewinnung (WRG). Eine energetisch optimierte Lüftung reduziert den Wärmebedarf eines Gebäudes im Betrieb, indem einerseits die umgesetzten Luftmengen kontrolliert werden können, und andererseits ein grosser Teil der Wärme in der Abluft über die WRG genutzt werden kann. Des Weiteren kann mit einer Lüftung der Schallschutz gegen aussen auch während der Lüfterneuerung gewährleistet und die Luft hygiene auch bei hoher Aussenluftbelastung sichergestellt werden. Aus diesen Gründen schreiben gewissen Baustandards, wie zum Beispiel die Minergie-Standards, eine kontrollierte Aussenluftzufuhr vor.

Kaum beachtet wird jedoch häufig, dass Herstellung und Installation eines Lüftungssystems zu einer nicht unwesentlichen Umweltbelastung sowie Installations- und Unterhaltskosten führen. Es stellt sich die Frage, wie Lüftungskonzepte mit unterschiedlicher Materialintensität und unterschiedlichen energetischen Effekten über den ganzen Lebenszyklus ökologisch und finanziell abschneiden.

## 1.2. Ziel der Studie

Am Beispiel der Siedlung Klee in Zürich-Affoltern soll mithilfe einer ökologischen Lebenszyklusanalyse (LCA) untersucht werden, ob der Einbau einer zentralen Lüftungsanlage mit WRG (System mit hoher Materialintensität) im konkreten Fall zu einem ökologischen Mehrwert gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft (System mit geringer Materialintensität) geführt hat. Ausserdem soll anhand der Projekt- und Betriebskosten eine Lebenszykluskostenrechnung (LCC) durchgeführt werden, um die ökologische Betrachtung durch eine finanzielle Analyse zu ergänzen. Durch verschiedene Sensitivitätsanalysen soll diese Untersuchung so weit wie möglich verallgemeinert werden, um generelle Aussagen bezüglich der ökologischen und finanziellen Aspekte zentraler Lüftungsanlagen mit WRG abzuleiten.

## 1.3. Siedlung Klee

Die Siedlung Klee in Zürich-Affoltern mit insgesamt 340 Wohnungen wurde im Jahr 2011 fertiggestellt. Sie befindet sich zu fast gleichen Teilen im Besitz der Baugenossenschaft Hagenbrünneli (BGH) und der Gemeinnützigen Bau- und Mietergenossenschaft Zürich (GBMZ). Die Wohnungen im Teil der GBMZ werden über eine zentrale Lüftungsanlage be- und entlüftet. Die BGH verzichtete dagegen auf eine zentrale Lüftungsanlage und setzte auf das herkömmliche Lüftungskonzept der unkontrollierten (manuellen) Fensterlüftung mit mechanischer Abluft in den Nasszellen und Küchen (Betrieb nur bei Bedarf, keine kontinuierliche Belüftung). Da Gebäudestruktur und -hülle, die Nutzungsart sowie die Wärmeversorgung der beiden Gebäudeteile identisch sind, bietet die Siedlung Klee beinahe optimale Rahmenbedingungen, um die beiden Lüftungskonzepte ökologisch und finanziell zu vergleichen. So können die Effekte der Lüftung im Betrieb direkt anhand der energetischen Verbräuche der beiden Teile untersucht werden.

---

1 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klimapolitik/gebäude/gebäudeprogramm.html>

In Tabelle 1 sind die Eckdaten der beiden Gebäudehälften gegenübergestellt.

**Tabelle 1: Allgemeine Angaben zum BGH- und GBMZ-Gebäudeteil<sup>2</sup>**

	<b>BGH-Gebäudeteil</b>	<b>GBMZ-Gebäudeteil</b>
Lüftungskonzept der Wohnungen	Unkontrollierte (manuelle) Fensterlüftung mit Abluft	Zentrale Lüftungsanlage mit Lufterwärmung und WRG
Wärmeerzeugung	Gas (Heizung, Warmwasser), thermische Solarkollektoren (Warmwasser)	
Energiebezugsfläche (EBF) [m <sup>2</sup> ]	16'023	16'699
Geschossfläche [m <sup>2</sup> ]	28'816	28'789
Anzahl Bewohner	ca. 380	ca. 460
Anzahl Wohnungen	173	167

Zu den Energiebezugsflächen (EBF) liegen unterschiedliche Angaben vor, wobei die relativen Unterschiede der Energiebezugsflächen vom BGH- zum GBMZ-Gebäudeteil jeweils sehr ähnlich sind. Die in Tabelle 1 aufgeführten EBF-Werte stammen aus dem Jahr 2016 und wurden vom Leiter der technischen Liegenschaftsbewirtschaftung der BGH zur Verfügung gestellt. Der GBMZ-Gebäudeteil weist 4.2 % mehr EBF auf als der BGH-Gebäudeteil. In den von der Kopitsis Bauphysik AG erstellten Heizwärmebedarfs-Berechnungen (2007) sind andere EBF-Werte aufgeführt, wobei der GBMZ-Gebäudeteil diesmal 3.6 % mehr EBF enthält. In der vorliegenden Studie werden die neusten, in Tabelle 1 aufgeführten, EBF-Werte mit einer Differenz von 4.2 % verwendet.

<sup>2</sup> Objektangaben vom Leiter der technischen Liegenschaftsbewirtschaftung der BGH

## 1.4. Die beiden unterschiedlichen Lüftungskonzepte

### 1.4.1. BGH: Unkontrollierte (manuelle) Fensterlüftung mit Abluft

In den BGH-Wohnungen erfolgt der Luftaustausch über das manuelle Öffnen der Fenster durch die Bewohner. Die Nasszellen sowie die Küchen enthalten allerdings eine mechanische Abluft, die nach Bedarf anspringt. Die Fortluft wird durch die Nasszellen- bzw. Küchenventilatoren vertikal nach oben, übers Dach abgeführt, wobei auf dem Dach keine zusätzlichen Ventilatoren vorhanden sind. Die Nasszellenventilatoren weisen einen Volumenstrom von 60 m<sup>3</sup>/h und die Küchenventilatoren weisen einen Volumenstrom von 272-581 m<sup>3</sup>/h auf. In Abbildung 1 wird der Grundriss einer BGH-Wohnung gezeigt. Die Abluftkanäle sind jeweils mit oranger Farbe eingezeichnet.

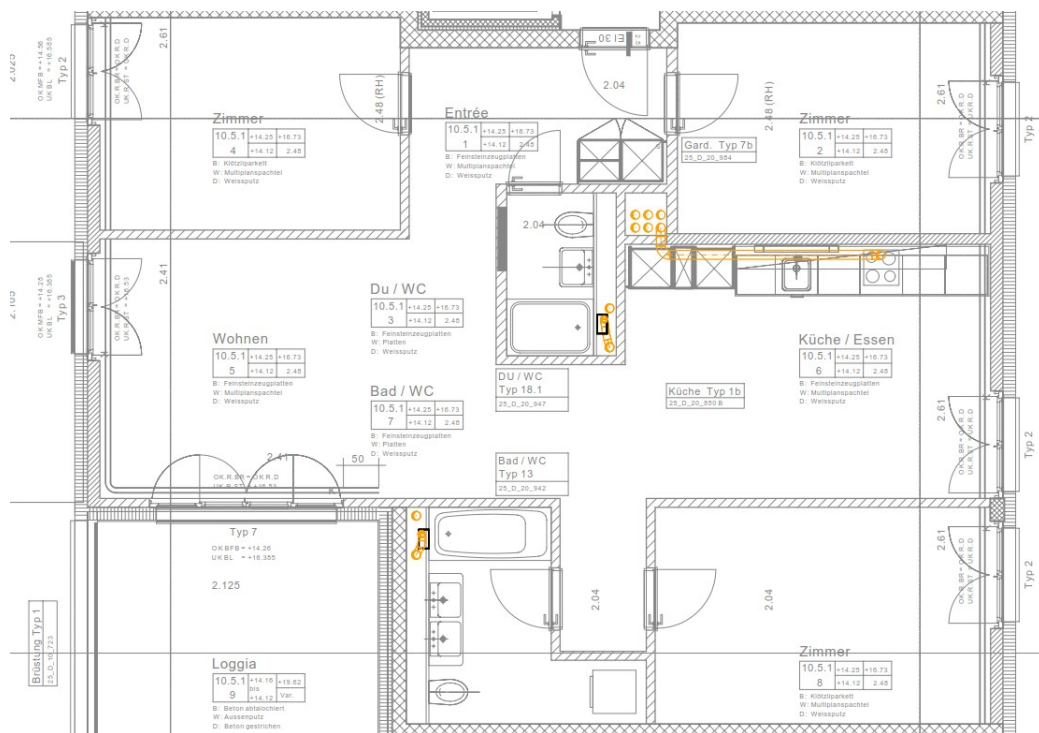


Abbildung 1: Lüftungsplan einer BGH-Wohnung (Toldt, Gmür und Partner AG 2011)

Zu erwähnen ist, dass in den BGH-Wohnungen Nachströmelemente fehlen. Aufgrund der luftdichten Gebäudehülle (ursprünglich war auch in den BGH-Wohnungen eine KWL geplant) und der mechanischen Abluft in den Nasszellen und Küchen entsteht beim Betrieb der Abluftanlagen ein Unterdruck in den Wohnungen. Da die Nachströmelemente deshalb theoretisch vorhanden sein müssten, wird im idealen Szenario (Kapitel 4.2) davon ausgegangen, dass pro BGH-Wohnung jeweils drei Nachströmelemente verbaut sind.<sup>3</sup> Somit wird ein fairer ökologischer und finanzieller Vergleich der beiden Lüftungskonzepte sichergestellt.

<sup>3</sup> Die Nachströmelemente werden so ausgelegt, dass sie den Luftvolumenstrom der Nasszellenventilatoren (Abluftvolumenstrom abzüglich der Gebäudeundichtigkeit) kompensieren können. Der Luftvolumenstrom der Küchenventilatoren wird nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass bei den Dunstabzugshauben ein Fensterkontaktschalter eingesetzt werden würde.

**1.4.2. GBMZ: Zentrale Lüftungsanlage mit Lufterwärmung und Wärmerückgewinnung**

Die GBMZ-Wohnungen werden über eine zentrale Lüftungsanlage kontrolliert be- und entlüftet, wobei jedes der zehn GBMZ-Häuser über eine eigene Lüftungszentrale verfügt. Die Zuluft wird jeweils in die Wohn- und Schlafzimmer hineingeführt und die Abluft in den Nasszellen und Küchen abgesaugt. Die Lüftungszentrale ist zudem mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet, wobei ein Gegenstrom-Plattentauscher verwendet wird. Damit wird bis zu 80 % der Abluftwärme auf die Zuluft übertragen.<sup>4</sup> Um die Zuluft auf das gewünschte Temperaturniveau anzuheben, verfügen die Lüftungszentralen ausserdem über Lufterhitzer. Die Zuluft wird dabei mit warmem Wasser erwärmt, welches durch das Heizsystem erzeugt wurde. Der thermisch wirksame Aussenluftvolumenstrom beträgt  $0.36 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Die Bewohner können die Betriebsstufe der Lüftung jedoch nicht selber einstellen, sprich der Volumenstrom ist nicht regulierbar. In Abbildung 2 ist der Grundriss einer GBMZ-Wohnung abgebildet. Die Zuluftrohre sind jeweils rot und die Abluftrohre gelb eingefärbt.

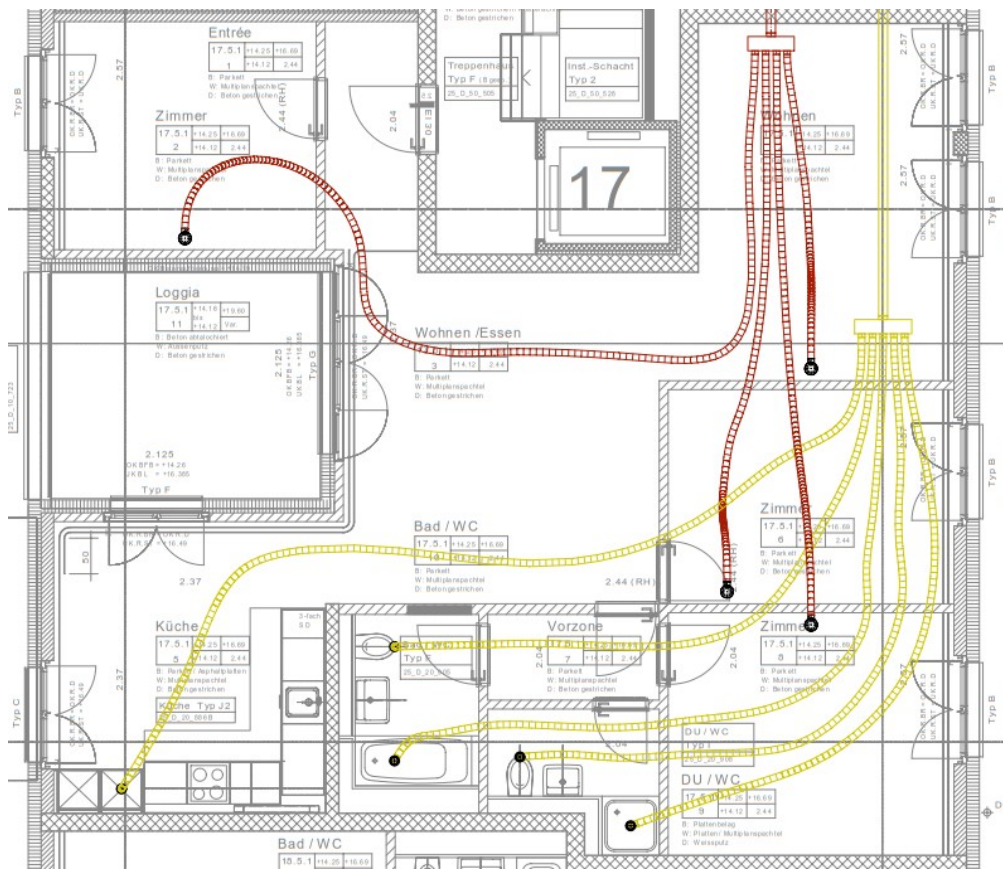


Abbildung 2: Lüftungsplan einer GBMZ-Wohnung (Todt, Gmür und Partner AG 2011)

4 Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung gemäss Minergie-Nachweis des GBMZ-Gebäudeteils

## 2 Methodik und Modellierung

Um die beiden Lüftungskonzepte ganzheitlich bewerten und vergleichen zu können, müssen alle verursachten Umweltauswirkungen und Kosten in allen Lebensphasen berücksichtigt werden. Neben der Herstellung und Installation wird dabei auch der Betrieb, die Wartung und die Entsorgung betrachtet.

### 2.1. Lebenszyklusanalyse

Die ökologische Bewertung der beiden Lüftungskonzepte erfolgt durch eine Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz, LCA). Dabei werden die Ressourcenverbräuche und Emissionen über alle Lebensphasen bilanziert. Betriebsmissionen werden dabei ebenso berücksichtigt wie die grauen Emissionen der Systemkomponenten. Die Grundlagendaten für die Ökobilanzierung stammen aus der ecoinvent-Datenbank (Version 3.1). Insgesamt werden drei Wirkungsabschätzungsmethoden verwendet, um die Umweltauswirkungen der beiden betrachteten Lüftungssysteme zu quantifizieren. Dabei werden jeweils die Endwerte jeder Methodik auf die gesamte Lebensdauer der verschiedenen Komponenten verteilt, um Werte pro Jahr zu erhalten und die beiden Lüftungssysteme (mit Komponenten unterschiedlicher Lebensdauer) vergleichbar zu machen. Im Folgenden werden die drei verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden kurz erklärt.

#### 2.1.1. Carbon Footprint (IPCC 2013, Treibhauspotential 100 Jahre)

Beim Carbon Footprint (Dt. CO<sub>2</sub>-Fussabdruck) handelt es sich um eine emissionsbasierte, international anerkannte Methode. Sie bewertet das Treibhauspotential sämtlicher zum Klimawandel beitragender Emissionen über einen Zeithorizont von 100 Jahren. Um unterschiedlich starke Treibhausgase miteinander zu vergleichen, werden alle emittierten Stoffe nach ihrem Treibhauspotential gewichtet und so in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgewandelt. CO<sub>2</sub>-Emissionen werden sowohl in der Politik als auch in der Baubranche intensiv diskutiert und oft als Indikatoren verwendet.

#### 2.1.2. Nicht erneuerbare Primärenergie (Cumulative Energy Demand, fossil)

Bei dieser Methodik wird der gesamte Primärenergieaufwand berechnet, der für die Erzeugung eines Produktes oder das Durchführen eines Prozesses nötig ist. Dabei wird lediglich der nicht erneuerbare Teil des kumulierten Energieaufwands berücksichtigt. Das bedeutet, dass nur Energie berücksichtigt wird, welche mit fossilen Energieträgern, nicht nachhaltiger Biomassennutzung oder nuklearen Brennstoffen erzeugt wurde. Damit gibt diese Methodik Aufschluss darüber, wie viel Energie aus nicht nachhaltigen Quellen über den gesamten Lebenszyklus verbraucht wird.

#### 2.1.3. Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Ecological Scarcity 2013)<sup>5</sup>

Die Methode der ökologischen Knappheit ist eine in der Schweiz entwickelte Methode, welche bei der Bewertung von Umweltbelastungen eine Gewichtung aufgrund der politischen Umweltziele der Schweiz vornimmt. Mithilfe von sogenannten Ökofaktoren wird die Umweltbelastung einer Schadstoffemission respektive Ressourcenentnahme in die Einheit Umweltbelastungspunkte (UBP) umgerechnet. Diese werden dann zu einer Gesamtpunktzahl aggregiert, welche schliesslich der Indikator für die totale Umweltbelastung der bewerteten Produkte oder Prozesse darstellt. In Abbildung 3 ist die Grundstruktur der Methode mit den verschiedenen Schritten, inkl. der Gewichtung mittels Ökofaktoren, zu sehen.

---

5 Frischknecht R., Büsser Knöpfel S. 2013: Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1330: 256 S.

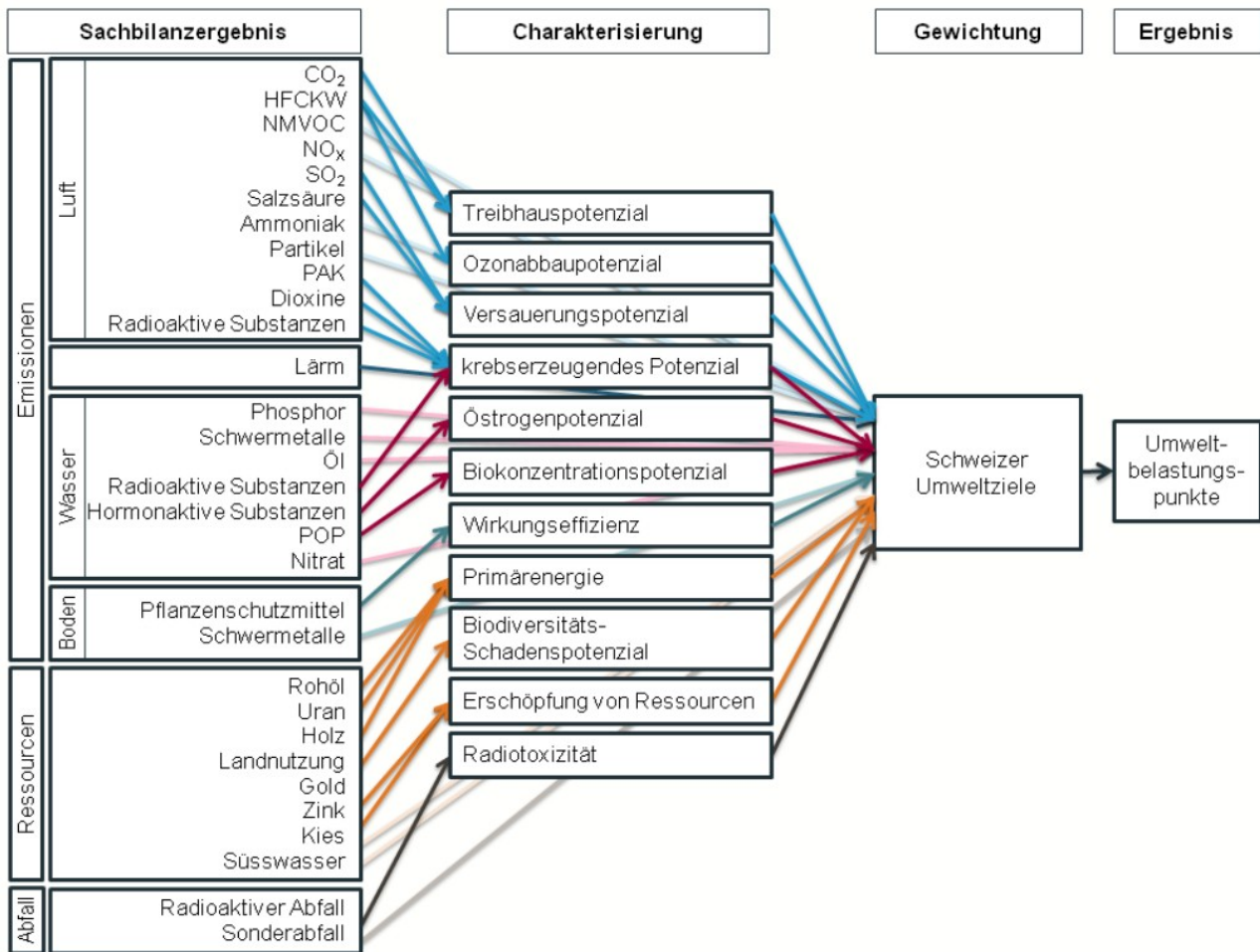


Abbildung 3: Struktur der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht R., Büsser Knöpfel S. 2013)

## 2.2. Lebenszykluskostenrechnung

Die finanzielle Bewertung der beiden Lüftungssysteme erfolgt durch eine Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing; LCC). In der vorliegenden Studie wird hierzu die Annuitätenmethode verwendet. Dabei werden Investitions-, Kapital-, Energie-, Unterhalts- sowie Entsorgungskosten aggregiert, in Annuitätskosten umgerechnet und verglichen. Anfängliche Investitionen sowie Entsorgungskosten, welche am Lebensende des Systems anfallen, werden mit einem Zinssatz verrechnet und auf gleichmässige Zahlungen pro Jahr verteilt. Jährliche Kosten, wie z.B. Unterhaltsarbeiten und Energieverbräuche, sowie jährliche Einnahmen können direkt mit diesen Annuitäten verrechnet werden, da die Teuerung aus der Betrachtung ausgeschlossen wird. Die Gesamtannuität eines Lüftungssystems ergibt sich dann, indem alle Annuitäten der verschiedenen Lebensphasen (Anfangsinvestition, Unterhaltsarbeiten, Energieverbräuche und Entsorgung) aufsummiert werden. Sämtliche verwendete Formeln zur Annuitätenmethode befinden sich im Anhang A.

## 2.3. Funktionelle Einheit

Alle berechneten Endwerte der LCA und der LCC werden pro Quadratmeter EBF und Jahr angegeben. Die funktionelle Einheit beträgt somit:

$$\frac{\text{Indikatorwert} / \text{Einheit}}{m_{EBF}^2 * a}$$

## 2.4. Systemgrenzen

Bei der LCA und LCC werden die Umweltauswirkungen bzw. Kosten auf fünf verschiedene Verursacher verteilt. Nachfolgend werden diese fünf Kategorien sowie ihre Systemgrenzen kurz erläutert. Grundsätzlich werden die Systemgrenzen so gefasst, dass Komponenten oder Prozesse ausgeschlossen werden, die bei den beiden zu vergleichenden Lüftungssystemen identisch und daher nicht vergleichsrelevant sind.

### 2.4.1. Komponenten

Diese Kategorie umfasst sämtliche Bestandteile des jeweiligen Lüftungssystems, wobei nur die Lüftungssysteme für die Wohnungen betrachtet werden. Alle Lüftungsanlagen, welche nicht der Belüftung der Wohnungen dienen, sind in beiden Gebäudeteilen praktisch in identischer Ausführung verbaut und somit vergleichsneutral. Dazu gehören die Lüftungsanlagen für die Nebenräume, die Quartierräume, die Heizzentralen und die Tiefgarage. All diese Komponenten liegen ausserhalb der Systemgrenzen und werden nicht weiter berücksichtigt.

Konkret werden folgende Komponenten der Lüftungssysteme in dieser Studie berücksichtigt:

- **BGH-Gebäudeteil:**
  - Abluft Nasszellen (BKP 244.1<sup>6</sup>)
  - Abluft Küchen (BKP 244.2)
- **GBMZ-Gebäudeteil:**
  - Lüfterhitzeranschlüsse<sup>7</sup> (BKP 242.9)
  - Aussenluftfassung (BKP 244.10)
  - Zentrale Lüftungsanlage für kontrollierte Wohnraumlüftung (BKP 244.11-20)

Dabei werden die Herstellung, die Installation, der Ersatz (nach Ablauf der individuellen Lebensdauer einer Komponente) und die Entsorgung (inkl. Demontage) der einzelnen Komponenten berücksichtigt. Die Lebensdauern der einzelnen Komponenten wurden aus der Norm SIA 382/1 übernommen.<sup>8</sup> Dabei wurde jeweils eine mittlere Beanspruchung der Komponenten angenommen. Da die Norm eher konservative Lebensdauern vorschreibt, spricht die Lebensdauern eher unterschätzt, wird zudem in einem späteren Schritt eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Lebensdauern der Komponenten durchgeführt.

### 2.4.2. Zusätzliche Beton- und Stahlbetonarbeiten (Rohbau)

Diese Kategorie umfasst den aufgrund der dickeren Decken im GBMZ-Gebäudeteil (gegenüber dem BGH-Gebäudeteil) zusätzlich verbauten Beton und Betonstahl. Die Decken in den GBMZ-Wohnungen sind aufgrund der zentralen Lüftungsanlage rund 4 cm dicker als die Decken in den BGH-Wohnungen. Die deswegen zusätzlich anfallenden Materialien (Beton und Betonstahl) werden in einer separaten Kategorie ausgewiesen damit die Resultate auch auf einen Holzbau übertragbar sind (wo diese Zusatzaufwände nicht oder in einem wesentlich geringeren Ausmass anfallen würde). Die Lebensdauer des Rohbaus wurde aus der Norm SIA 480 (mittlere Beanspruchung) übernommen.<sup>9</sup>

### 2.4.3. Betrieb: Stromverbrauch

Diese Kategorie beinhaltet den totalen Verbrauch an Allgemiestrom des BGH- bzw. GBMZ-Gebäudeteils.<sup>10</sup>

---

6 BKP-Nummer des Werkvertrages

7 Es werden nur die (gegenüber dem BGH-Gebäudeteil) 10 zusätzlichen Lüfterhitzeranschlüsse für die zentrale Lüftungsanlage betrachtet

8 SIA 382/1: Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen

9 SIA 480: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau

10 Mit „Strom“ ist elektrische Energie gemeint

Nicht darin inbegriffen ist daher der Haushaltsstrom, sprich der Strom, welcher von bzw. in den einzelnen Wohnungen verbraucht wird, wie beispielsweise die Stromverbräuche der Waschmaschinen und Trockner.<sup>11</sup> Der Verbrauch an Allgemeinstrom wird berücksichtigt, da er unter anderem den Stromverbrauch des jeweiligen Lüftungssystems enthält (neben dem Stromverbrauch für die Beleuchtung der allgemein zugänglichen Flächen, etc.) und keine Einzelmessungen der Lüftungsstromverbräuche zur Verfügung stehen.

### **2.4.4. Betrieb: Heizwärmeverbrauch**

Der Heizwärmeverbrauch gibt an, wie viel thermische Energie zum Heizen verbraucht wird und wird berücksichtigt, da er massgeblich durch das Lüftungssystem beeinflusst werden kann. Der Warmwasserverbrauch dagegen ist völlig unabhängig vom gewählten Lüftungssystem und wird separat vom Heizwärmeverbrauch gemessen. Deshalb wird er nicht berücksichtigt.

### **2.4.5. Unterhalt & Wartung**

In dieser Kategorie sind alle Unterhalts- und Wartungsarbeiten, wie z.B. die Lüftungsreinigung oder das Auswechseln der Filter, enthalten. Für die LCA, sprich die ökologische Bewertung, werden dabei nur die Anfahrten der Wartungsfahrzeuge berücksichtigt. Sie stellen die einzige relevante Umweltbelastung von Unterhalt und Wartung dar, da der Ersatz der einzelnen Komponenten (z.B. Filter) schon in der Kategorie Komponenten berücksichtigt wird. Bisher sind durch die unkontrollierte Fensterlüftung im BGH-Gebäudeteil keine Schäden (z.B. Feuchtigkeitsschäden) aufgetreten oder absehbar. Deshalb wird auf die Berücksichtigung solcher Schäden verzichtet.

## **2.5. Daten**

Ein Grossteil der für die vorliegende Studie verwendeten Daten wurde von der BGH bzw. GBMZ zur Verfügung gestellt. Zusätzlich benötigte Daten stammen direkt vom jeweiligen Hersteller. Im Folgenden werden die wichtigsten Datenquellen der fünf Kategorien aufgelistet:

- **Komponenten**
  - Ausführungspläne (Stand: Dezember 2010)
  - Revisionspläne und Prinzipschemas der Lüftung (Stand: Januar bzw. Februar 2011)
  - Werkverträge und Schlussabrechnungen der Lüftungsanlagen (BKP 244)
  - Werkverträge und Schlussabrechnungen der Heizungsanlagen (BKP 240)
  - Datenblätter diverser Hersteller bzw. telefonische Auskünfte
  - Auskünfte vom Leiter der technischen Liegenschaftsbewirtschaftung der BGH bzw. dem Geschäftsführer der GBMZ
- **Zusätzliche Beton- und Stahlbetonarbeiten (Rohbau)**
  - Ausführungspläne (Stand: Dezember 2010)
  - Werkverträge und Schlussabrechnungen der Beton- und Stahlbetonarbeiten (BKP 211.5)
- **Betrieb: Stromverbrauch**
  - Abrechnungen der ewz<sup>12</sup> über die Zeitperiode vom 04.09.2013 bis 01.09.2016

---

11 Im BGH-Gebäudeteil sind die Waschmaschinen und Trockner jeweils direkt in den Wohnungen, wohingegen der GBMZ-Gebäudeteil über gemeinsame WaschsaloNs verfügt (deren Stromverbräuche jedoch ebenfalls nicht im Allgemeinstrom enthalten sind)

12 Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (Öffentlichrechtliche Anstalt)

- **Betrieb: Heizwärmeverbrauch**
  - Abrechnungen der *ista swiss ag* über die Zeitperiode vom 01.07.2013 bis 30.06.2016<sup>13</sup>
- **Unterhalt & Wartung**
  - Serviceverträge und Rechnungen von Wartungsarbeiten
  - Auskunft der beiden Hauswarte der Siedlung Klee

## 2.6. Annahmen

Der BGH- und der GBMZ-Gebäudeteil beziehen ein unterschiedliches Stromprodukt, sprich einen unterschiedlichen Strommix. Dies hat sowohl einen Einfluss auf die LCA wie auch auf die LCC. Da in dieser Studie jedoch ausschliesslich die beiden unterschiedlichen Lüftungssysteme – und nicht generell die beiden Gebäudeteile – miteinander verglichen werden sollen, wird in der Bilanzierung für beide Gebäudeteile jeweils der gleiche Strompreis und -mix verwendet. Dabei werden der über die betrachtete Zeitperiode durchschnittlich von der BGH bezahlte Strompreis sowie der von der BGH bezogene Strommix verwendet.

Beim Heizwärmeverbrauch wurde der über die betrachtete Zeitperiode durchschnittliche Gaspreis berechnet und verwendet.<sup>14</sup>

Die wichtigsten verwendeten Parameter für den Vergleich der Lüftungskonzepte finden sich in Tabelle 2.

**Tabelle 2: Verwendete Parameter**

Bezeichnung	Wert
Strompreis	20.08 Rp./kWh
Verwendeter Strommix LCA	Market for Electricity, Low Voltage, Label-Certified, CH <sup>15</sup>
Gaspreis	6.14 Rp./kWh
Jahresnutzungsgrad Gaskessel	95 % <sup>16</sup>
Zinssatz	1.5 %

13 Die ersten zwei Jahre nach Fertigstellung der Siedlung werden bewusst nicht betrachtet, da in diesen Jahren Störfaktoren wie die Bautrocknung und die Einregulierung der Heizung vorhanden sind.

14 Angaben zum Gaspreis von der *Energie 360° AG*

15 Strommix aus ecoinvent Datenbank: Elektrische Energie stammt grösstenteils aus Wasserkraft, genau wie beim tatsächlich (von der BGH) bezogenen Strommix *ewz.basis*

16 Gemäss *Leistungsgarantie Haustechnik* vom Bundesamt für Energie, suissetec und Verein Minergie

### 3 Ergebnisse und Diskussion der Bilanzierungen

#### 3.1. Energiebilanz

Die absoluten Strom- und Heizwärmeverbräuche des BGH- und GBMZ-Gebäudeteils sind in Tabelle 3 dargestellt. Dabei handelt es sich jeweils um den Durchschnittswert über den Zeitraum Mitte 2013 bis Mitte 2016.

**Tabelle 3: Absolute Strom- und Heizwärmeverbräuche**

Bezeichnung	BGH-Gebäudeteil (Fensterlüftung mit Abluft)	GBMZ-Gebäudeteil (zentrale Lüftungs- anlage mit WRG)
Stromverbrauch gemessen [kWh/a]	113'149	198'148
Stromverbrauch korrigiert [kWh/a]	117'328	198'148
Heizwärmeverbrauch [kWh/a]	787'373	800'721

Da der Allgemiestrom den Haushaltsstrom nicht beinhaltet, sind auch die Stromverbräuche der Ventilatoren der Dunstabzüge (BGH- und GBMZ-Gebäudeteil) und der Abluft-Ventilatoren der Nasszellen (BGH-Gebäudeteil) nicht enthalten. Die Ventilatoren der Abluft-Dunstabzüge im BGH-Gebäudeteil und der Umluft-Dunstabzüge im GBMZ-Gebäudeteil weisen gemäss Hersteller einen fast identischen Stromverbrauch auf, weshalb sie vergleichsneutral sind und nicht weiter berücksichtigt werden. Die Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen sind jedoch ein Bestandteil des Lüftungskonzepts ‚Fensterlüftung‘ und daher nur im BGH-Gebäudeteil vorhanden. Deshalb muss ihr Strombedarf berücksichtigt und zum gemessenen Allgemiestromverbrauch dazu addiert werden.<sup>17</sup> Damit ergibt sich der korrigierte Stromverbrauch, welcher ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführt ist.

Die Stromverbräuche pro Quadratmeter EBF sind in Abbildung 4 und die Heizwärmeverbräuche pro Quadratmeter EBF in Abbildung 5 dargestellt. Bei den Stromverbräuchen handelt es sich bereits um die korrigierten Werte, d.h. der Stromverbrauch der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen ist enthalten.

<sup>17</sup> Die detaillierte Berechnung des Strombedarfs der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen ist im Anhang B zu finden.

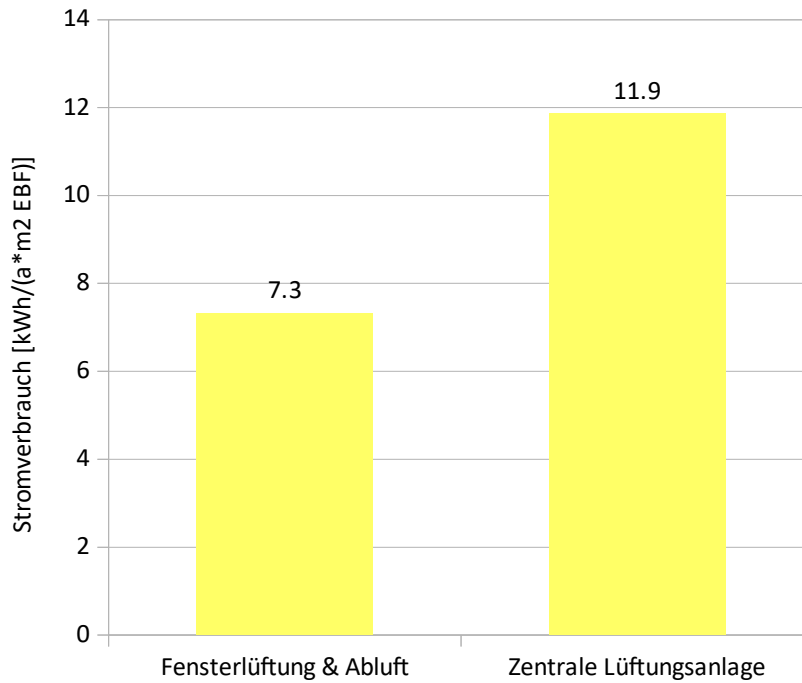


Abbildung 4: Allgemeine Stromverbräuche pro Quadratmeter EBF

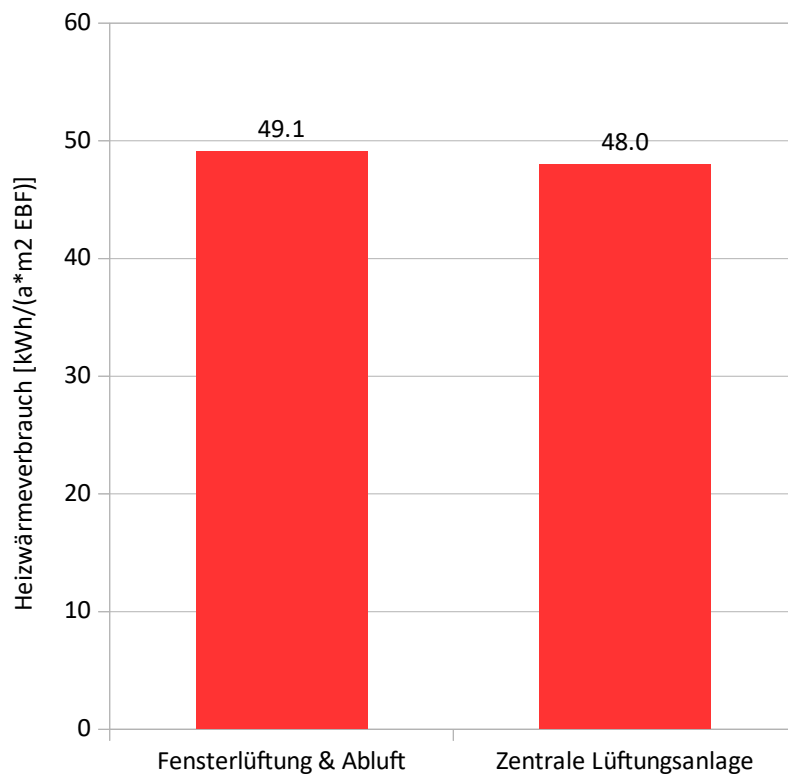


Abbildung 5: Heizwärmeverbräuche pro Quadratmeter EBF

Der GBMZ-Gebäudeteil weist einen um 62 % höheren allgemeinen Stromverbrauch auf als der BGH-Gebäudeteil. Um zu evaluieren, ob die Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen für diesen deutlichen Mehrverbrauch an Strom verantwortlich sein könnten, wurde der theoretische Strombedarf der Ventilatoren aller zentralen Lüftungsanlagen berechnet. Der mittels elektrischen Leistungsaufnahme, Auslastung und jährlichen Betriebsstunden berechnete Strombedarf der Ventilatoren beläuft sich auf ca. **86'000 kWh/a** (ausführliche Berechnung im Anhang C). Der gemessene Mehrverbrauch des GBMZ-Gebäudeteils beträgt **80'820 kWh/a** und stimmt somit sehr gut mit dem berechneten Wert überein. Aufgrund dieser geringen Abweichung ist davon auszugehen, dass die zentralen Lüftungsanlagen für den höheren Stromverbrauch des GBMZ-Gebäudeteils verantwortlich sind. Des Weiteren ist im Minergie-Nachweis des GBMZ-Gebäudeteils ein Strombedarf von **5.1 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>)** für die zentralen Lüftungsanlagen aufgeführt. Der gemessene Mehrverbrauch des GBMZ-Gebäudeteils beträgt **4.6 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>)** und stimmt somit wiederum gut mit dem (gemäss Minergie-Nachweis) erwarteten Wert überein. Der SIA 382/1 Grenzwert für Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung beträgt bei dem (gemäss Minergie-Nachweis) in den 167 GBMZ-Wohnungen eingestellten Luftvolumenstrom ebenfalls **4.6 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>)**.<sup>18</sup> Somit kann der SIA-Grenzwert gerade noch eingehalten werden.

Beim Heizwärmeverbrauch schneidet der GBMZ-Gebäudeteil leicht besser ab. Sein Heizwärmeverbrauch ist 2.4 % tiefer als jener des BGH-Gebäudeteils, es werden pro Jahr und EBF-Quadratmeter 1.2 kWh weniger Heizwärme verbraucht. Allerdings sollte gemäss den Berechnungen im Minergie-Nachweisformular des GBMZ-Gebäudeteils eine Einsparung von 9.2 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>) möglich sein, was einer Einsparung von 18.7 % gegenüber dem BGH-Gebäudeteil entsprechen würde. Das theoretisch mögliche Potential wird also bei weitem nicht ausgeschöpft. Mögliche Gründe könnten ein falsches Nutzerverhalten (wenn etwa während der Heizperiode trotz KWL oft mit den Fenstern gelüftet wird) oder eine nicht optimal funktionierende WRG (z.B. eine Vereisung des Plattenwärmetauschers) sein. Wie die zentrale Lüftungsanlage unter optimalen Bedingungen abschneiden würde, spricht wenn die maximal mögliche Einsparung an Heizwärme erreicht wird, wird in Kapitel 4.2 näher untersucht.

---

18 SIA 382/1 Grenzwert für Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung = 0.35 W/(m<sup>3</sup>/h), Nennvolumenstrom gemäss Minergie-Nachweis = 25'000 m<sup>3</sup>/h

### 3.2. Ökobilanz

Die Umweltauswirkungen der beiden betrachteten Lüftungssysteme sind in den folgenden Grafiken anhand der Indikatoren Umweltbelastungspunkte (UBP), nicht erneuerbare Primärenergie (PENR) und Global Warming Potential (GWP; CO<sub>2</sub>-Emissionen) dargestellt.

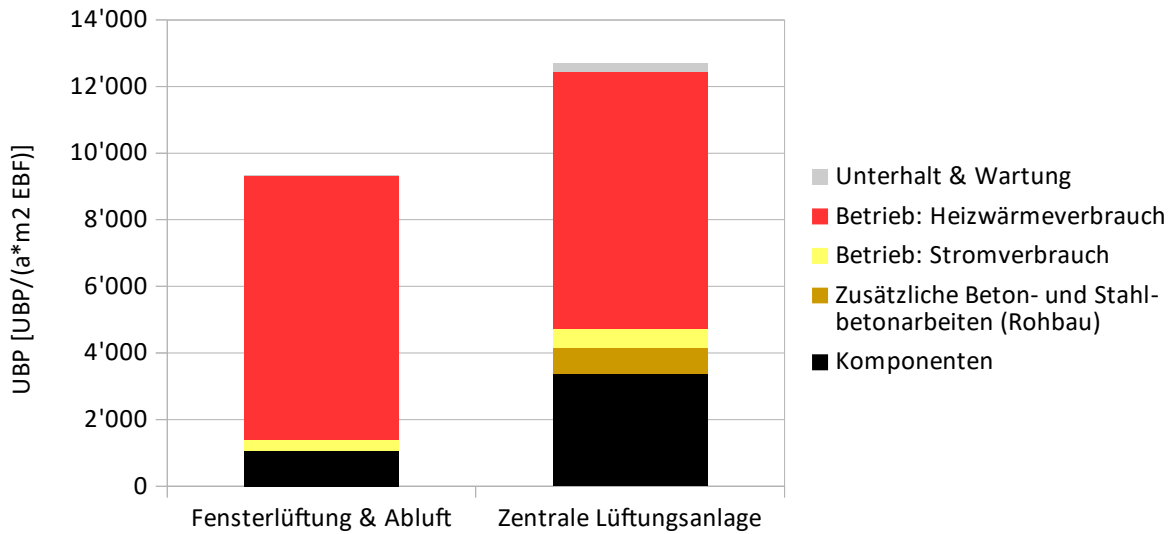


Abbildung 6: Umweltauswirkungen der Lüftungskonzepte, ausgedrückt in UBP

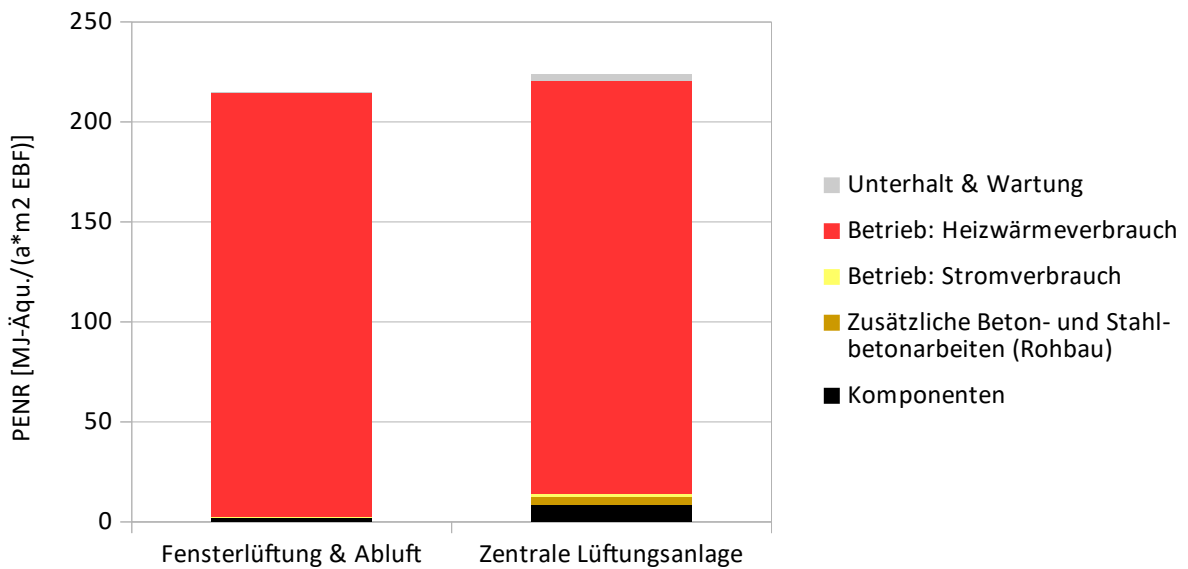
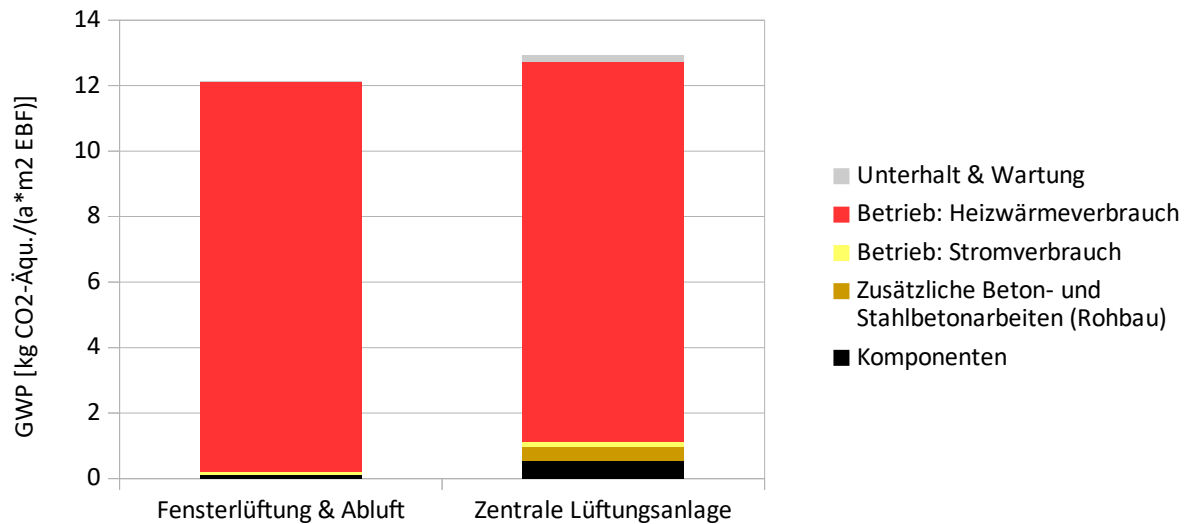


Abbildung 7: Umweltauswirkungen der Lüftungskonzepte, ausgedrückt in PENR



**Abbildung 8: Umweltauswirkungen der Lüftungskonzepte, ausgedrückt in GWP**

Die zentrale Lüftungsanlage mit WRG im GBMZ-Gebäudeteil schneidet bei allen drei betrachteten Indikatoren schlechter ab. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verbraucht die zentrale Lüftungsanlage 4.3 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 6.7 % mehr Treibhausgasemissionen. Am deutlichsten ist die Differenz bei der totalen Umweltbelastung, ermittelt mit der Schweizer Methode der ökologischen Knappheit. Nach diesem Indikator ist die durch die zentrale Lüftungsanlage im GBMZ-Gebäudeteil verursachte Umweltbelastung um 35.9 % höher als diejenige der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft im BGH-Gebäudeteil.

Bei allen drei Indikatoren verursacht jeweils der Heizwärmeverbrauch die mit Abstand grösste Umweltbelastung. Der Grund dafür ist, dass die Heizwärme mittels einer Gasheizung erzeugt und somit ein fossiler Energieträger verbraucht wird. Ein Szenario, in dem die Erzeugung der Heizwärme ohne fossile Energieträger mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpen erfolgt, wird in Kapitel 5 betrachtet.

Die ökologischen Sachbilanzen (LCI), sprich die detaillierten Zusammenstellungen aller Material- und Energieverbräuche der betrachteten Lüftungssysteme über ihren gesamten Lebensweg, sind im Anhang D aufgeführt.

### 3.3. Lebenszykluskostenrechnung

Die Annuitäten (Jahreskosten) der beiden betrachteten Lüftungssysteme sind in Abbildung 9 dargestellt.

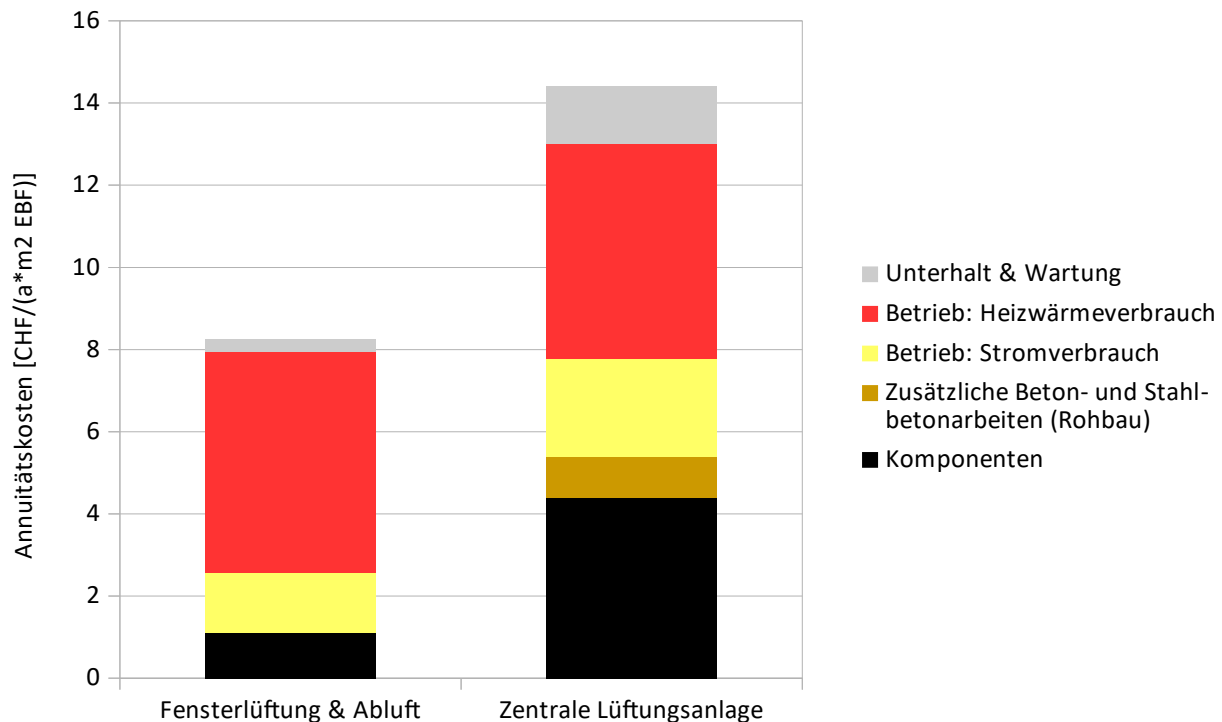


Abbildung 9: Annuitäten der beiden Lüftungssysteme

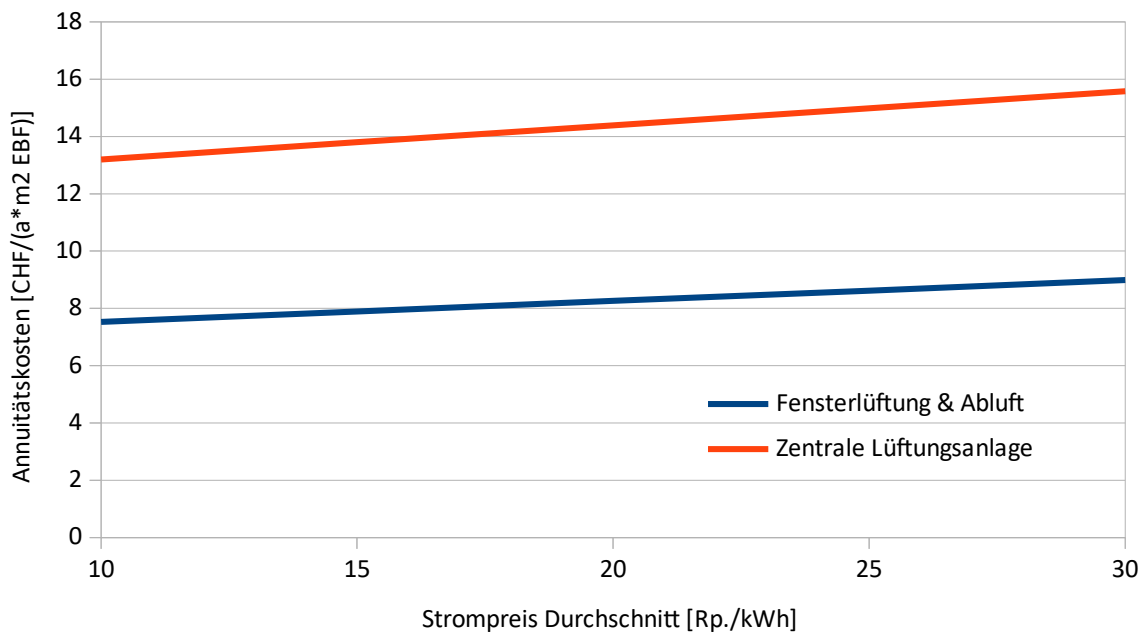
Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verursachen die zentralen Lüftungsanlagen des GBMZ-Gebäudeteils 74 % höhere Annuitätskosten gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft im BGH-Gebäudeteil. Der Hauptgrund dafür sind die hohen Investitionskosten der Komponenten der zentralen Lüftungsanlage, welche in Abbildung 9 im schwarzen Balkenabschnitt enthalten sind. Des Weiteren fallen beträchtliche Kosten für zusätzliche Beton- und Stahlbetonarbeiten sowie Unterhalt und Wartung der zentralen Lüftungsanlage an. Denn neben den jährlichen Kontroll- und Wartungsarbeiten (inkl. Ersatz der Monoblock-Filtern) muss durchschnittlich alle zehn Jahre eine umfassende und somit kostenintensive Lüftungsreinigung durchgeführt werden. Bei der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft fällt ebenfalls alle zehn Jahre eine umfassende Lüftungsreinigung an, wobei der Aufwand im Vergleich zur zentralen Lüftungsanlage mit WRG natürlich deutlich geringer ist.

## 4 Sensitivitätsanalysen

Im Folgenden werden die Einflüsse gewisser Parameter auf die Lebenszykluskosten und/oder die Ökobilanz systematisch untersucht. Auf diese Weise kann die Stabilität der gemachten Aussagen im Rahmen gewisser Parameter-Schwankungen überprüft werden.

### 4.1. Einfluss der finanziellen Parameter

Der Einfluss des durchschnittlichen Strompreises auf die Annuitäten ist in Abbildung 10 ersichtlich.



**Abbildung 10: Einfluss des Strompreises auf die Annuitäten (Verwendeter Wert für Analysen: 20.1 Rp./kWh)**

Das relative Verhältnis der beiden Annuitäten verändert sich auch bei sehr tiefen oder hohen Strompreisen kaum. Die Annuitätskosten der zentralen Lüftungsanlage des GBMZ-Gebäudeteils steigen bei zunehmendem Strompreis etwas schneller, da der Stromverbrauch höher ist als bei der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft im BGH-Gebäudeteil.

Der Einfluss des Gaspreises auf die Annuitätskosten ist in Abbildung 11 ersichtlich. Auch hier ändert sich das relative Verhältnis der beiden Annuitäten kaum, da der Heizwärme- und somit auch Gasverbrauch im BGH-Gebäudeteil (Fensterlüftung mit Abluft) nur minimal höher ist als im GBMZ-Gebäudeteil (KWL mit WRG).

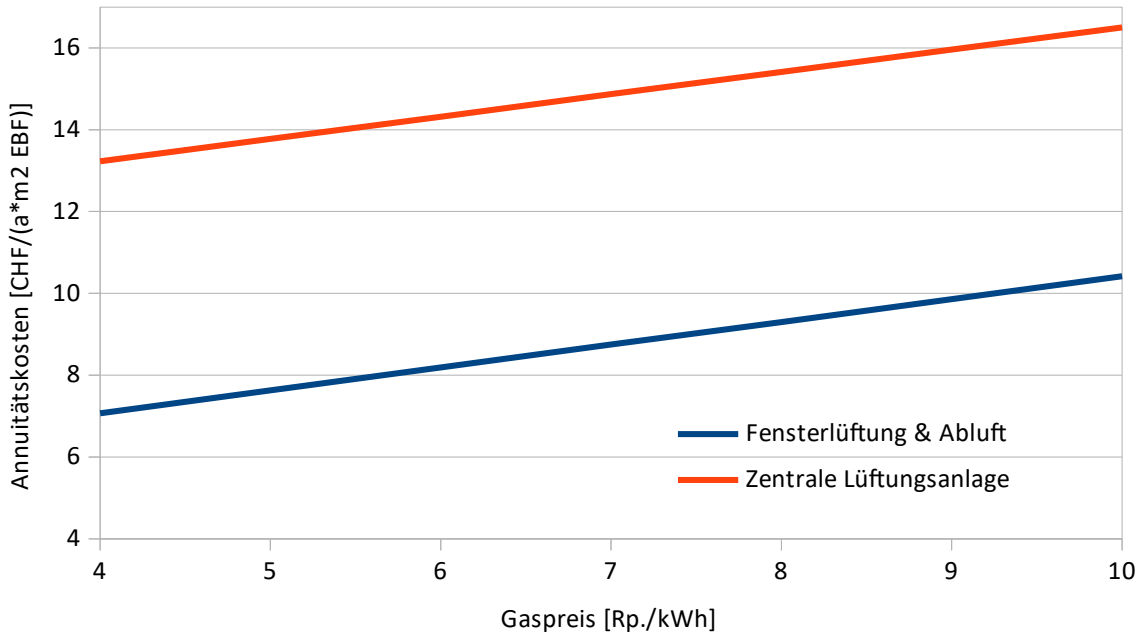


Abbildung 11: Einfluss des Gaspreises auf die Annuitäten (Verwendeter Wert für Analysen: 6.1 Rp./kWh)

Der Einfluss des Kapitalkostenzinssatzes auf die Annuitäten ist in Abbildung 12 ersichtlich.

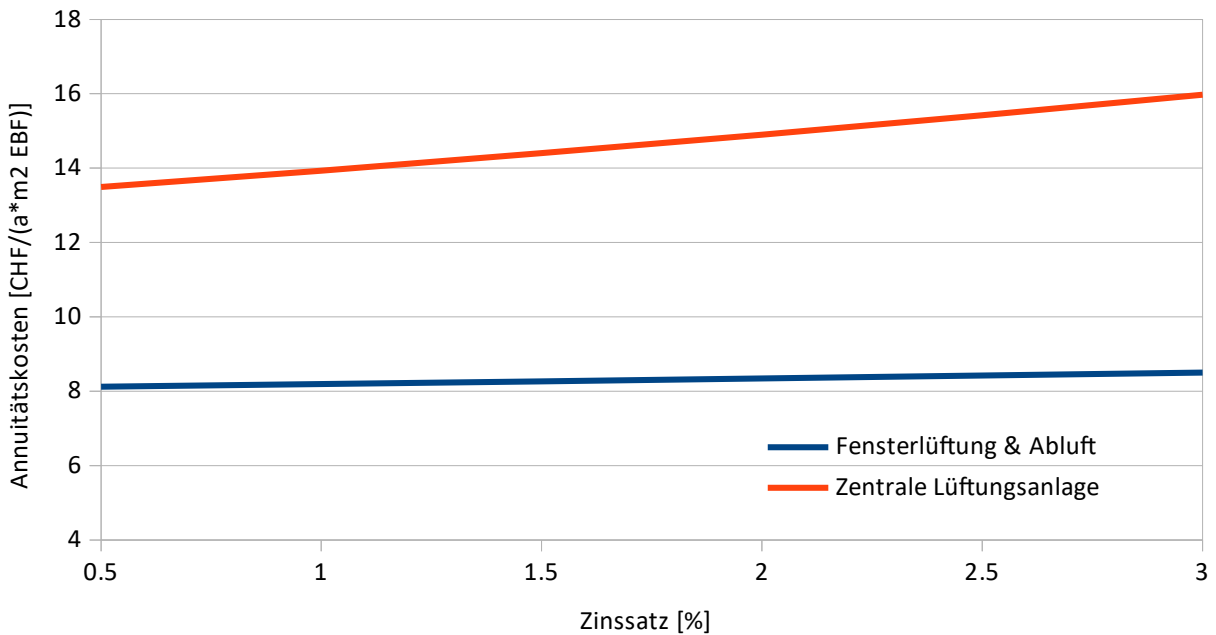


Abbildung 12: Einfluss des Zinssatzes auf die Annuitäten (Verwendeter Wert für Analysen: 1.5 %)

Die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft verhält sich in Bezug auf Zinssatzschwankungen deutlich stabiler als die investitionsintensivere zentrale Lüftungsanlage mit WRG.

## 4.2. Ergebnisse bei idealem Nutzerverhalten und idealer Wärmerückgewinnung

Gemäss Minergie-Nachweis des GBMZ-Gebäudeteils sollte durch die WRG des GBMZ-Lüftungssystems eine deutlich höhere Reduktion des Heizwärmeverbrauchs möglich sein ( $9.2 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$ ) statt der gemessenen  $1.2 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$ .<sup>19</sup> Wie bereits erwähnt, könnten ein falsches Nutzerverhalten und/oder eine nicht optimal funktionierende WRG Gründe sein, weshalb die theoretisch möglichen Einsparungen nicht erzielt werden. Um dennoch generell gültige Aussagen zu zentralen Lüftungsanlagen mit WRG machen zu können, wird in diesem Kapitel ein ideales Szenario untersucht, in dem eine optimal funktionierende zentrale Lüftungsanlage mit optimaler WRG angenommen wird. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die gemäss Minergie-Nachweis mögliche Reduktion an Heizwärme durch die WRG erreicht wird.

Gemäss Minergie-Nachweises des GBMZ-Gebäudeteils kann der Heizwärmebedarf mit der gewählten Lüftungsanlage um  $9.2 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  verringert werden (gegenüber des Heizwärmebedarfs mit Standardluftwechsel, z.B. bei unkontrollierter Fensterlüftung), was einer Einsparung von 18.7 % entspricht. Der Grund dafür ist, dass eine KWL mit WRG den thermisch wirksamen Aussenluft-Volumenstrom deutlich verkleinert, was wiederum zu tieferen Lüftungswärmeverlusten führt.<sup>20</sup> Mit der im Minergie-Nachweis aufgeführten Einsparung an Heizwärme ergibt sich für den GBMZ-Gebäudeteil ein neuer Heizwärmeverbrauch von  $40.1 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$ , welcher im Folgenden für die Ökobilanz und die Lebenszykluskostenrechnung verwendet wird.

Des weiteren wird im idealen Szenario davon ausgegangen, dass in den BGH-Wohnungen Nachströmelemente verbaut sind (wie in Kapitel 1.4.1 beschrieben). Die Umweltauswirkungen bzw. Kosten dieser Nachströmelemente sind nachfolgend in der Kategorie Komponenten enthalten.

Die Umweltauswirkungen der beiden betrachteten Lüftungssysteme im idealen Szenario sind in den folgenden Grafiken anhand der Indikatoren Umweltbelastungspunkte (UBP), nicht erneuerbare Primärenergie (PENR) und Global Warming Potential (GWP; CO<sub>2</sub>-Emissionen) dargestellt.

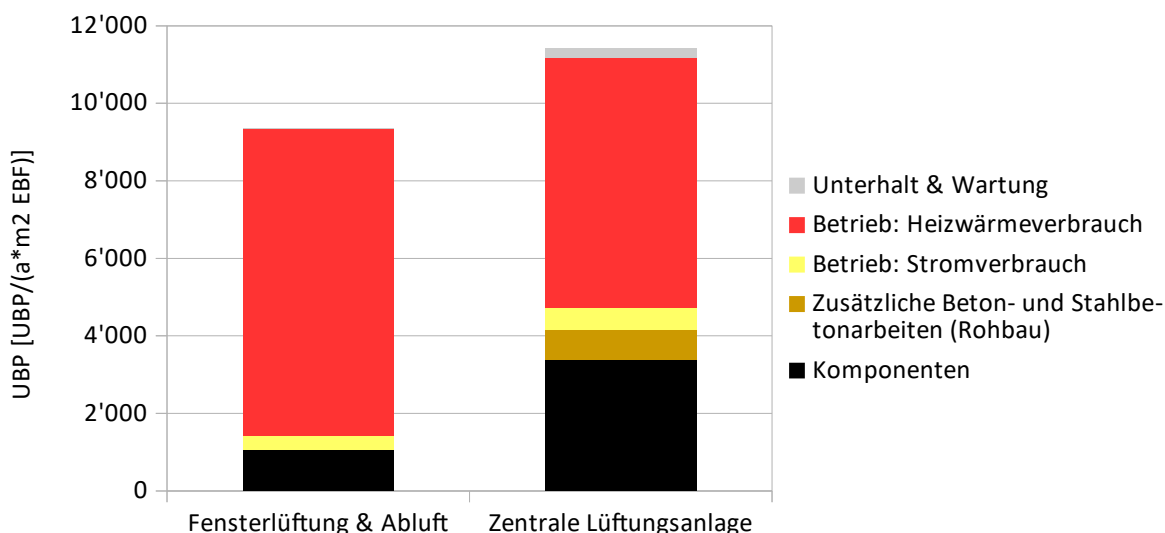


Abbildung 13: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in UBP

<sup>19</sup> Die  $9.2 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  entsprechen der im Minergie-Nachweis aufgeführten Differenz zwischen dem Heizwärmebedarf mit Standardluftwechsel ( $Q_h$ ) und dem effektiven Heizwärmebedarf mit Lüftungsanlage ( $Q_{h,\text{eff}}$ )

<sup>20</sup> Die Berechnung des thermisch wirksamen Aussenluft-Volumenstrom ist in der Wegleitung zum Nachweis-Formular Minergie, Version 2015 detailliert aufgezeigt

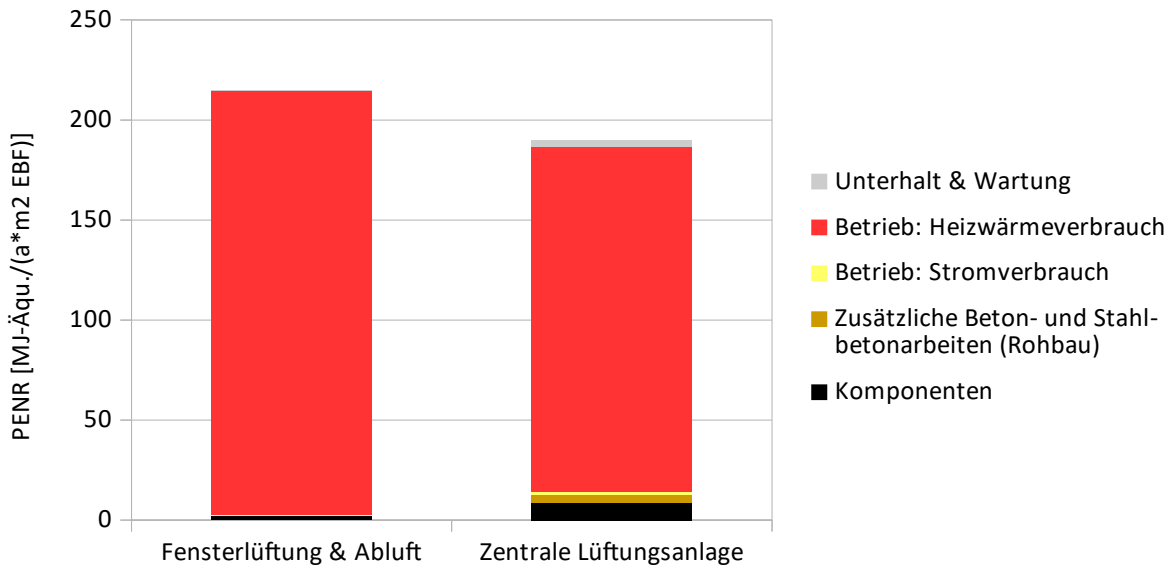


Abbildung 14: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in PENR

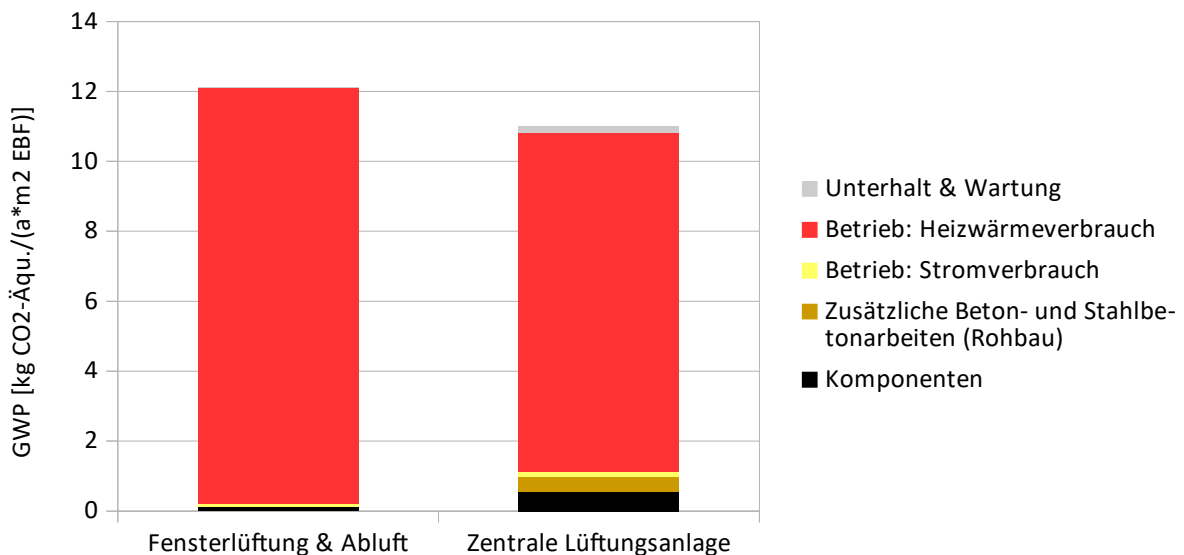


Abbildung 15: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in GWP

Durch den 18.7 % tieferen Heizwärmeverbrauch schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei zwei von drei Indikatoren besser ab. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verbraucht sie 11.7 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 9.2 % weniger Treibhausgasemissionen. Da die Heizwärme durch Gas (fossiler Energieträger) erzeugt wird, ist der Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie sowie der Anfall an Treibhausgasemissionen praktisch nur durch den Heizwärme- (bzw. Gas-)verbrauch bestimmt. In Abbildung 14 und 15 ist der enorme Einfluss des Heizwärmeverbrauchs (rot dargestellt) unverkennbar. Wird dagegen die totale Umweltbelastung betrachtet, schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG erneut schlechter ab als die Fensterlüftung mit Abluft. So kommt die zentrale Lüftungsanlage mit WRG, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, auf einen 22.0 % höheren UBP-Wert, sprich die Umwelt wird immer noch deutlich stärker belastet als bei der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft.

Die Annuitäten (Jahreskosten) der beiden Lüftungssysteme im idealen Szenario sind in Abbildung 16 dargestellt.

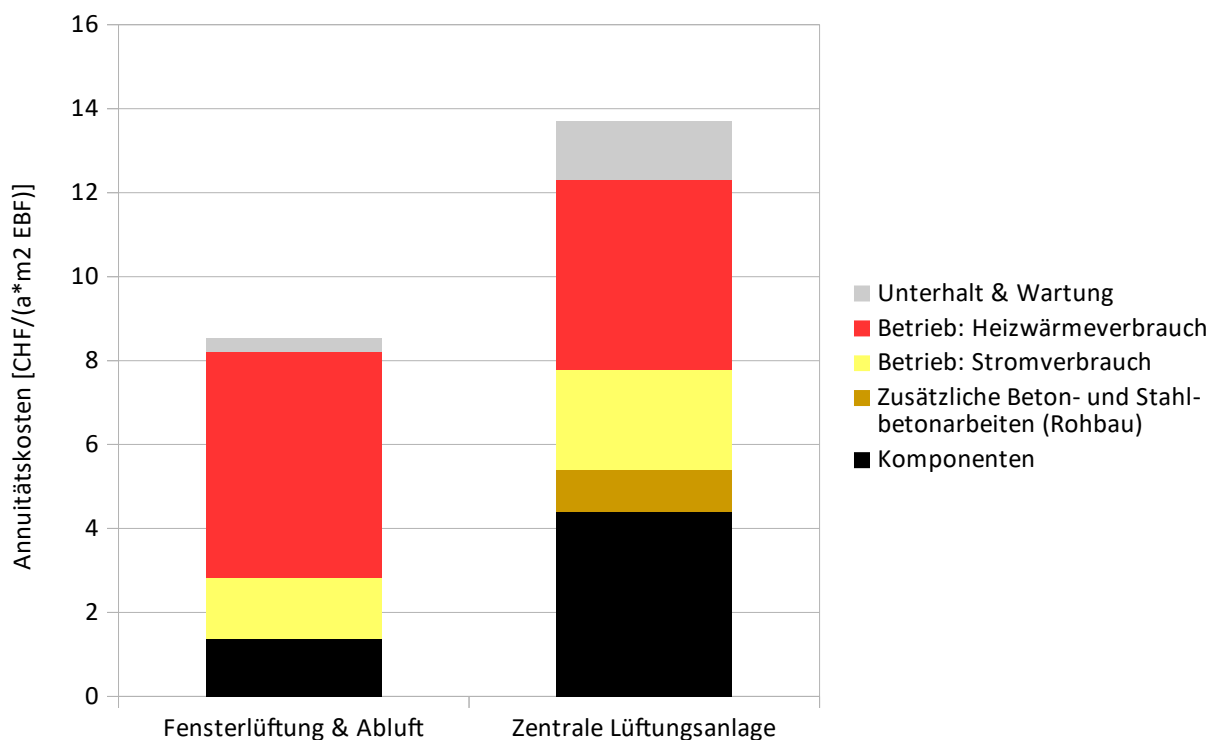


Abbildung 16: Annuitäten im idealen Szenario

Beim finanziellen Vergleich ändern die höheren Einsparungen beim Heizwärmeverbrauch nicht viel am Abschneiden der zentralen Lüftungsanlage mit WRG gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft. So verursacht die zentrale Lüftungsanlage mit WRG immer noch 61 % höhere Annuitätskosten. Die gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft erzielte Einsparung an Heizkosten kann die Kosten der Komponenten und der zusätzlichen Beton- und Stahlbetonarbeiten sowie die höheren Wartungs- und Stromkosten nicht annähernd kompensieren.

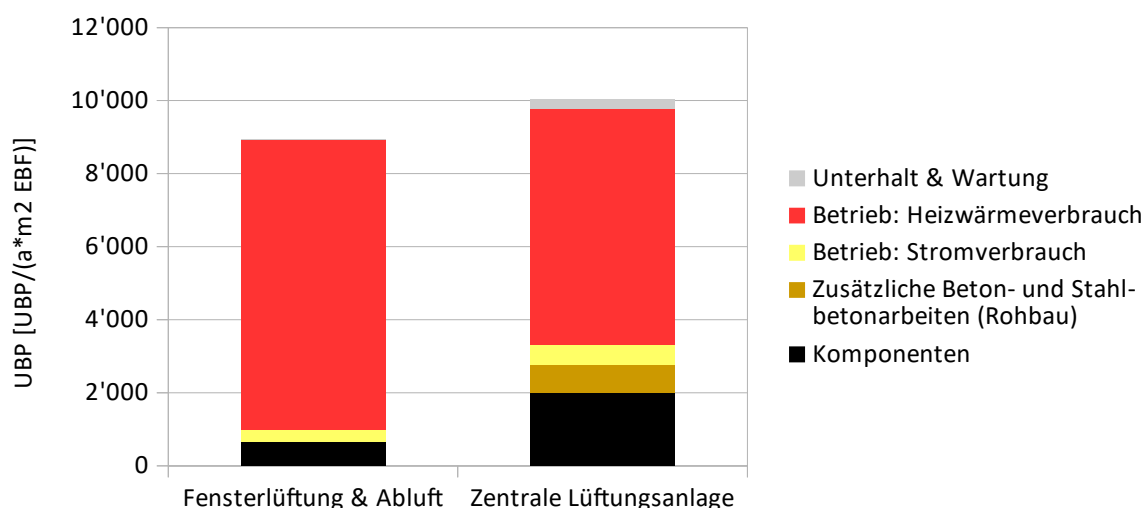
### 4.3. Ergebnisse bei längeren Lebensdauern der Komponenten

Die Lebensdauern der einzelnen Komponenten wurden aus der Norm SIA 382/1 übernommen. Da die Norm eher konservative Lebensdauern vorschreibt, sprich die Lebensdauern eher unterschätzt, werden im nachfolgend betrachteten Szenario längere bzw. realistischere Lebensdauern der Komponenten angenommen. Als Grundlage dient das in Kapitel 4.2 betrachtete ideale Szenario (mit maximaler Einsparung an Heizwärme). In Tabelle 4 sind die bisher verwendeten sowie die neuen, realitätsnahen Lebensdauern der verschiedenen Komponenten zu sehen.

**Tabelle 4: Lebensdauern der Komponenten**

Komponente	Lebensdauer	
	SIA 382/1	Optimistische Annahme
Filtermaterial	1	1
Kanäle/Rohre	30	50
Luftdurchlasse	30	50
Monoblocks (inkl. WRG und Luftherhitzer)	20	50
Motoren	20	25
Pumpen	20	25
Ventilatoren	20	25

Die Umweltauswirkungen der beiden betrachteten Lüftungssysteme im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten sind in den folgenden Grafiken anhand der Indikatoren Umweltbelastungspunkte (UBP), nicht erneuerbare Primärenergie (PENR) und Global Warming Potential (GWP; CO<sub>2</sub>-Emissionen) dargestellt.



**Abbildung 17: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in UBP**

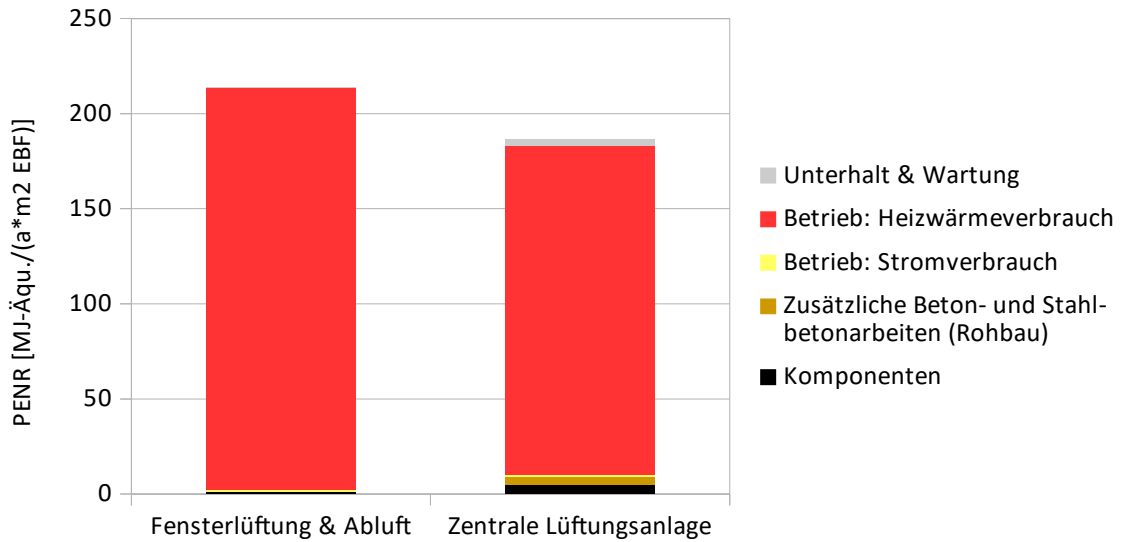


Abbildung 18: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR

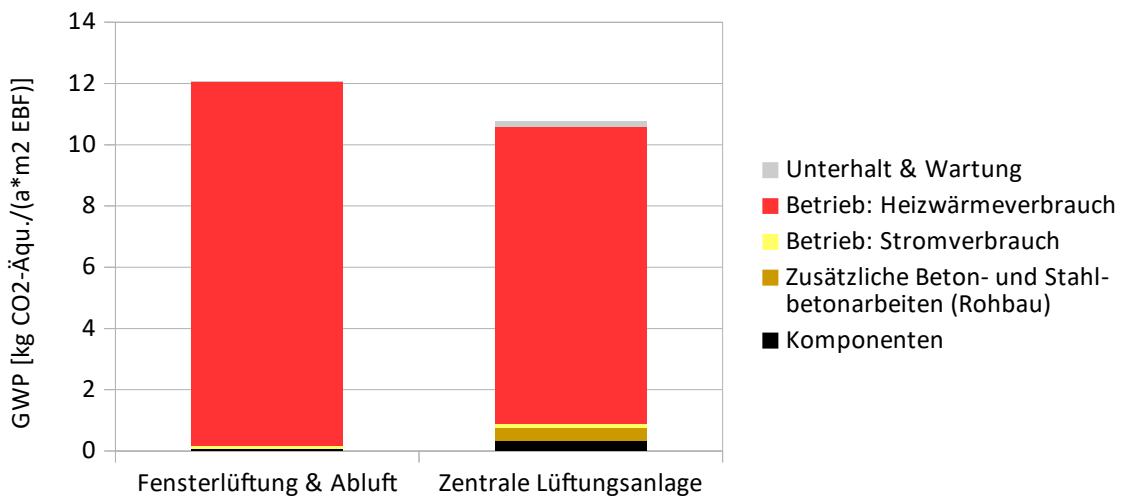
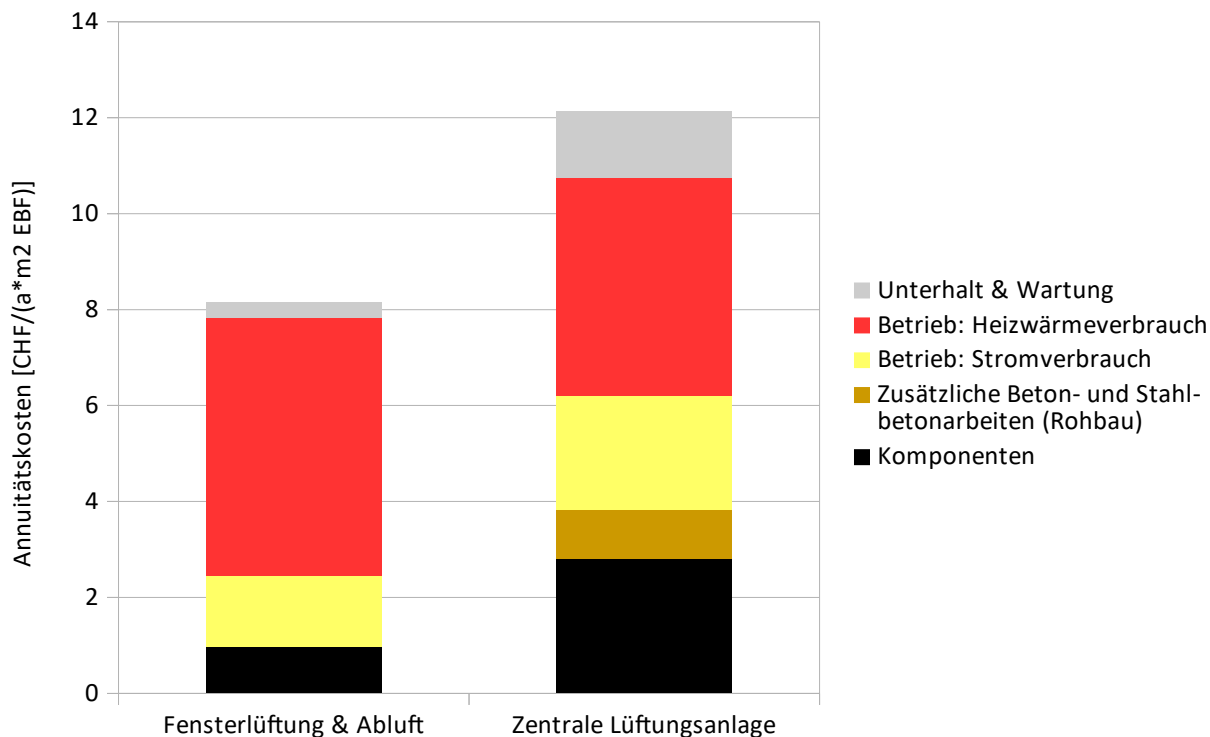


Abbildung 19: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP

Wiederum schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei zwei von drei Indikatoren besser ab als die Fensterlüftung mit Abluft. Durch die – neben dem 18.7 % tieferen Heizwärmeverbrauch – längeren Lebensdauern der Komponenten verbraucht die zentrale Lüftungsanlage nun 13.0 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 10.7 % weniger Treibhausgasemissionen. Da aufgrund der Gasheizung jeweils ein Grossteil der Umweltauswirkungen dieser zwei Indikatoren durch den Heizwärme- (bzw. Gas-)verbrauch verursacht wird, haben die längeren Lebensdauern der Komponenten nur einen sehr geringen Einfluss auf die Resultate. Auf die totale Umweltbelastung, welche mit der Methode der ökologischen Knappheit ermittelt wird, ist der Einfluss der Komponenten etwas grösser, wie in Abbildung 17 zu sehen ist. Trotzdem weist die zentrale Lüftungsanlage mit WRG, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, immer noch 12.4 % mehr UBP auf als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Dieses Resultat zeigt, dass bei einem Heizsystem mit fossilen Brennstoffen die zentrale Lüftungsanlage mit WRG selbst mit sehr optimistischen Annahmen (maximale Einsparung an Heizwärme sowie sehr langlebige Komponenten) die Umwelt immer noch stärker belastet als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft.

Die Annuitäten (Jahreskosten) der beiden Lüftungssysteme im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten sind in Abbildung 20 dargestellt.



**Abbildung 20: Annuitäten im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten**

Auch mit längeren Lebensdauern der Komponenten verursacht die zentrale Lüftungsanlage mit WRG immer noch 49 % höhere Annuitätskosten als die Fensterlüftung mit Abluft. Dieses Resultat zeigt eindrücklich, dass sich eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei einem Heizsystem mit fossilen Brennstoffen – auch bei sehr optimistischen Annahmen – gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft finanziell nicht lohnt.

## 5 Verallgemeinertes Szenario mit Erdwärmesonden-Wärmepumpen und Schweizer Verbrauchermix

Heutzutage werden Neubauten in sehr vielen Fällen ohne Verbrennungsprozesse beheizt. Für die Heiz- und Warmwassererzeugung kommen überwiegend Wärmepumpen zum Einsatz, so beispielsweise auch in der Stadt Zürich, wo im Jahr 2016/2017 69 % aller Neubauten mit Wärmepumpen-Heizsystemen ausgestattet wurden.<sup>21</sup> Folglich stellt sich die Frage, wie eine zentrale Lüftungsanlage mit Lufterwärmung und WRG ökologisch und finanziell abschneidet, wenn die Heizwärme mittels Umweltwärme und Wärmepumpen erzeugt wird. Um dies zu beantworten, wird ein weiteres, fiktives Szenario untersucht. Es wird angenommen, dass die gesamte Siedlung Klee mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpen (EWS-Wärmepumpen) beheizt wird. Dafür wird neu auch die graue Energie der Wärmerzeugung und -erzeugung betrachtet, da die Leistung der Wärmeerzeugungssysteme durch die WRG beeinflusst wird und deshalb vergleichsrelevant ist. Um möglichst allgemeine Aussagen ableiten zu können, wird im Folgenden zudem davon ausgegangen, dass der durchschnittliche Schweizer Verbrauchermix bezogen wird (anstelle des bisherigen Ökostrommix). Des Weiteren wird angenommen, dass durch die zentrale Lüftungsanlage mit WRG eine maximale Einsparung an Heizwärme erzielt werden kann sowie dass in den BGH-Wohnungen jeweils Nachströmelemente verbaut sind, wie beim idealen Szenario beschrieben (Kapitel 4.2). Diese Annahmen dienen dazu, einen möglichst allgemein gültigen Fall zu betrachten.

Die wichtigsten verwendeten Parameter finden sich in Tabelle 5.

**Tabelle 5: Verwendete Parameter im verallgemeinerten Szenario**

Bezeichnung	Wert
Strompreis <sup>22</sup>	17.10 Rp./kWh
Verwendeter Strommix LCA	Market for Electricity, Low Voltage, CH <sup>23</sup>
Verwendeter Prozess für Wärmeerzeugung inkl. grauer Energie	Heat Production, Borehole Heat Exchanger, Brine-Water Heat Pump 10 kW, CH <sup>24</sup>
Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe <sup>25</sup>	3.9
Zinssatz	1.5 %

Im verwendeten ecoinvent-Prozess für die Wärmeerzeugung ist neben der Betriebsenergie (Strom für Produktion der Heizwärme) auch die graue Energie für die Herstellung, Installation, Demontage und Entsorgung der Erdwärmesonden und Wärmepumpe enthalten. Somit wird berücksichtigt, dass das Heizsystem (Erdwärmesonden und Wärmepumpe) im Gebäudeteil mit zentraler Lüftungsanlage und WRG kleiner ausfällt als das Heizsystem des Gebäudeteils mit Fensterlüftung und Abluft (aufgrund der tieferen benötigten Heizleistung). Mit diesem Vorgehen wird also angenommen, dass das Heizsystem im Gebäudeteil mit zentraler Lüftungsanlage und WRG 18.7 % kleiner dimensioniert werden kann als das Heizsystem im Gebäudeteil mit Fensterlüftung und Abluft (entsprechend der Einsparung an Heizwärme). Dies ist eine

21 [https://www.stadt-zuerich.ch/content/prd/de/index/statistik/publikationen-angebote/publikationen/webartikel/2017-08-21\\_Erneuerbare-Energien-auf-dem-Vormarsch.html](https://www.stadt-zuerich.ch/content/prd/de/index/statistik/publikationen-angebote/publikationen/webartikel/2017-08-21_Erneuerbare-Energien-auf-dem-Vormarsch.html)

22 Durchschnittlicher Endverbraucherpreis 2015 gemäss *Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2016* vom Bundesamt für Energie (BFE)

23 ecoinvent-Prozess: Durchschnittlicher Schweizer Verbrauchermix aus dem Jahr 2014

24 ecoinvent-Prozess: Wärmerzeugung mittels Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 10 kW Heizleistung (inkl. grauer Energie)

25 Die JAZ drückt die Effizienz einer Wärmepumpe aus und beschreibt das Verhältnis von abgegebener Heizwärme zum dafür erforderlichen Stromverbrauch während eines Jahres

konservative Annahme, da sich in der Realität die Kosten und Umweltauswirkungen der Installation eines Heizsystems nicht linear zum Heizwärmebedarf reduzieren: Viele einmalige Aufwände fallen ohnehin und relativ unabhängig vom Heizwärmebedarf an (z.B. Anfahren der Bohrmaschinen, Installation und Inbetriebnahme der Wärmepumpe, Verrohrungen in der Heizzentrale, etc.), und ein Teil der Heizleistung wird für das Warmwasser benötigt und wird somit nicht durch die WRG der KWL beeinflusst.

Des Weiteren basiert der verwendete ecoinvent-Prozess für die Wärmeerzeugung auf einer Wärmepumpe mit 10 kW Heizleistung. Da im betrachteten Szenario allerdings deutlich leistungsstärkere Wärmepumpen verwendet werden, würde der Anteil an grauer Energie pro kWh Heizwärme aufgrund des Skalierungseffektes deutlich geringer ausfallen. Somit ist auch diese Annahme konservativ, sprich die zentrale Lüftungsanlage wird durch die Wahl des Prozesses tendenziell besser bewertet.

Die Umweltauswirkungen der beiden Lüftungssysteme im verallgemeinerten Szenario mit nachhaltiger Wärmeerzeugung und Schweizer Verbrauchermix sind in den folgenden Grafiken anhand der Indikatoren Umweltbelastungspunkte (UBP), nicht erneuerbare Primärenergie (PENR) und Global Warming Potential (GWP; CO<sub>2</sub>-Emissionen) dargestellt. Neu ist im roten Balkenabschnitt auch die graue Energie der Heizwärmeproduktion (Herstellung, Installation, Demontage und Entsorgung der Erdwärmesonden und Wärmepumpen) enthalten.

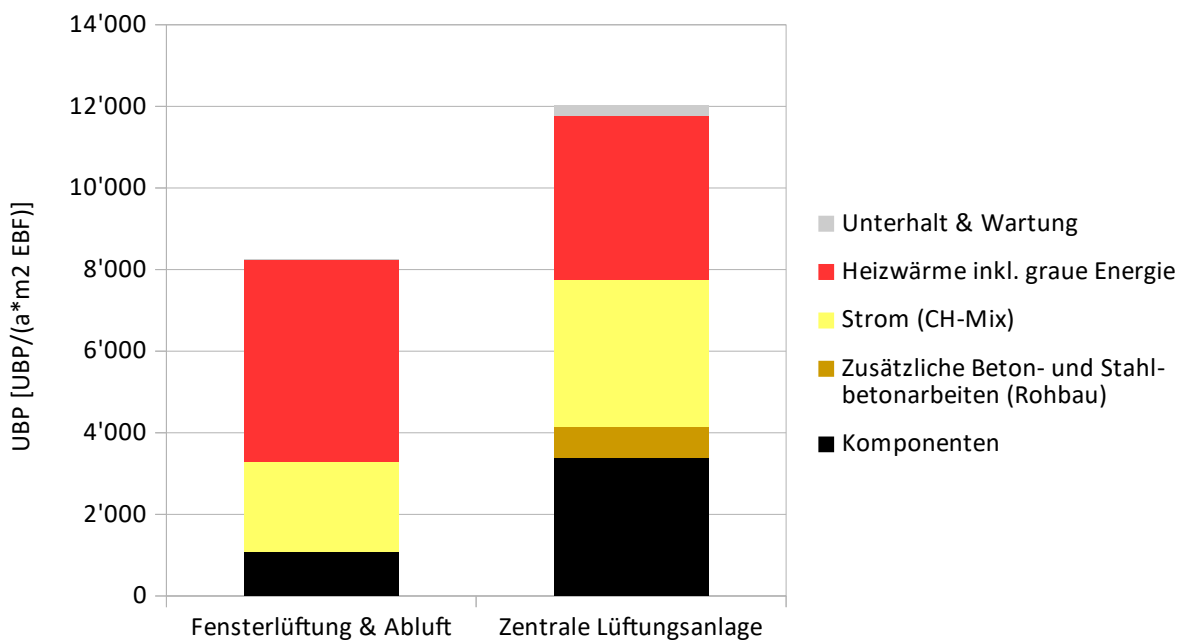
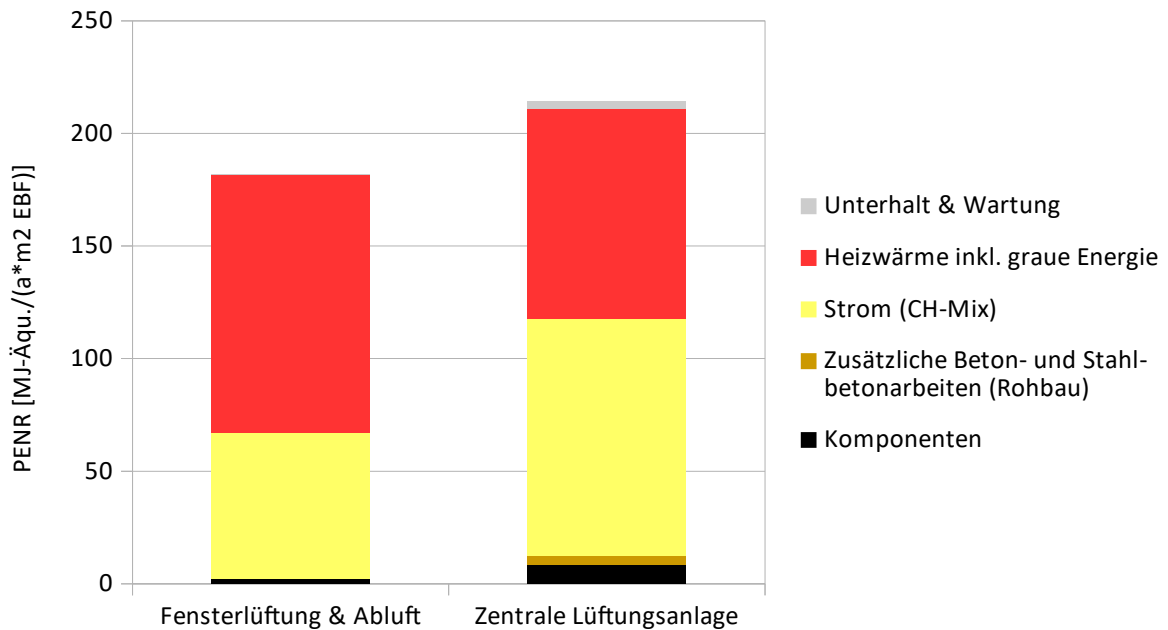


Abbildung 21: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in UBP



**Abbildung 22: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in PENR**

Die zentrale Lüftungsanlage mit WRG schneidet im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario bei allen drei betrachteten Indikatoren deutlich schlechter ab als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verbraucht die zentrale Lüftungsanlage mit WRG 17.9 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 31.7 % mehr Treibhausgasemissionen. Am deutlichsten ist die Differenz bei der totalen Umweltbelastung, ermittelt mit der Schweizer Methode der ökologischen Knappheit. Demnach ist die durch die zentrale Lüftungsanlage mit WRG verursachte Umweltbelastung um 45.6 % höher als diejenige der Fensterlüftung mit Abluft.

Zwar schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei der Heizwärmeproduktion (inkl. grauer Energie) durch den tieferen Heizwärmebedarf sowie das kleinere Heizsystem (EWS-Wärmepumpen) jeweils klar besser ab als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Trotzdem kann diese Einsparung an Umweltauswirkungen bei der Heizwärme die höheren Umweltauswirkungen der Komponenten, des zusätzlich verbauten Betons und Betonstahls sowie des höheren Stromverbrauchs bei weitem nicht kompensieren.

Auffallend ist zudem, dass die zentrale Lüftungsanlage mit WRG im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, sprich bei einer nachhaltigen Wärmeerzeugung, schlechter abschneidet (relativ betrachtet) als wenn die Heizwärmeproduktion durch Gas erfolgt (siehe Ergebnisse bei idealem Nutzerverhalten und idealer Wärmerückgewinnung in Kapitel 4.2). Der Grund dafür ist der Folgende: Zwar kann durch die zentrale Lüftungsanlage mit WRG im EWS-Wärmepumpen-Szenario wiederum 18.7 % an Heizwärme eingespart werden gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft, allerdings handelt es sich nun um nachhaltige Heizwärme, im Gegensatz zum idealen Szenario, wo mit Gas geheizt wird. Wenn also die Wärmeerzeugung nicht durch fossile Energieträger erfolgt, lohnt es sich deutlich weniger, Heizwärme einzusparen – durch einen enormen Mehraufwand bei den Komponenten, dem zusätzlich verbauten Beton bzw. Betonstahl, dem Stromverbrauch und der Wartung.

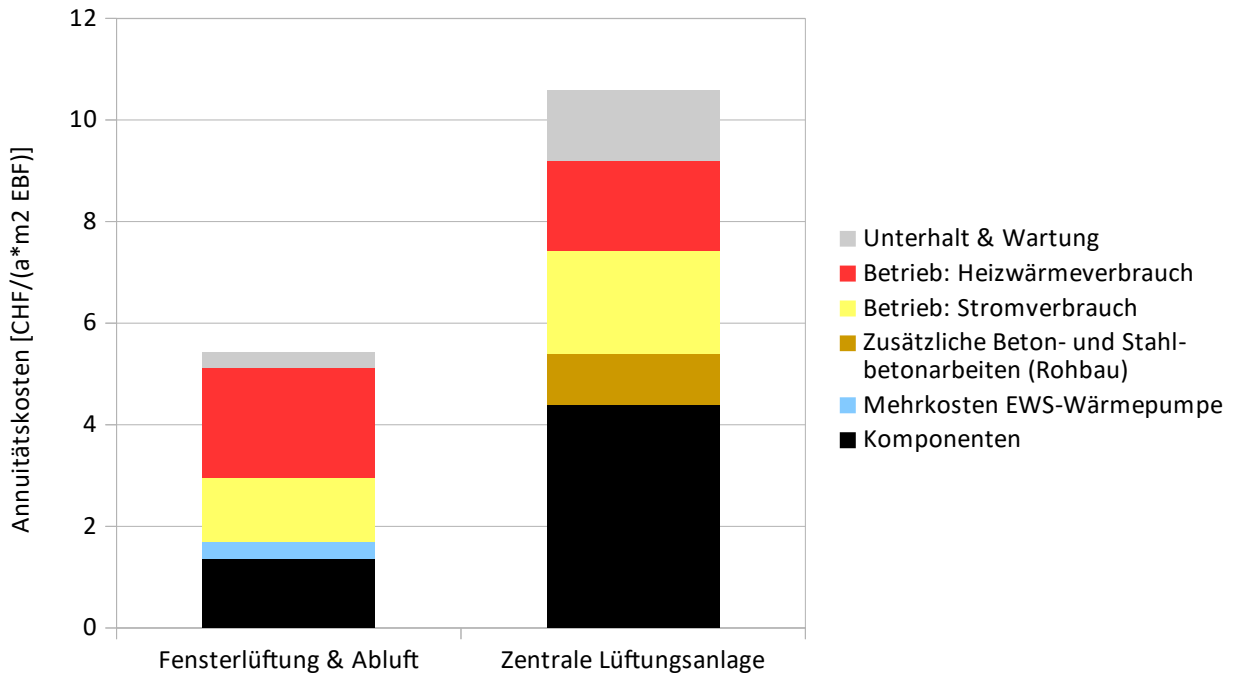
Bei der LCC, sprich der finanziellen Bewertung der beiden Lüftungssysteme, wird ebenfalls davon ausge-

gangen, dass das Heizsystem im Gebäudeteil mit zentraler Lüftungsanlage und WRG 18.7 % kleiner dimensioniert werden kann als das Heizsystem im Gebäudeteil mit Fensterlüftung und Abluft (entsprechend der Einsparung an Heizwärme). Es wird angenommen, dass somit auch die Investitionskosten des Heizsystems vom Gebäudeteil mit KWL 18.7 % tiefer sind als die Investitionskosten des Heizsystems vom Fensterlüftung-Gebäudeteil. In absoluten Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass bei der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft Mehrkosten in der Höhe von CHF 204'000 für die Erdwärmesonden und Wärmepumpe anfallen.<sup>26</sup> Wie schon erwähnt, stellt dies eine sehr konservative Annahme dar, sprich die Investitionskosten für ein Heizsystem würden sich in der Realität durch eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG wohl kaum um denselben Prozentsatz reduzieren lassen wie der Heizwärmebedarf.

---

<sup>26</sup> Die CHF 204'000 entsprechen 18.7 % der totalen Investitionskosten für ein Wärmeerzeugungssystem (bestehend aus Erdwärmesonden und Wärmepumpe), welches auf den Gebäudeteil mit unkontrollierter Fensterlüftung und Abluft dimensioniert wurde. Die Dimensionierung und Kostenschätzung erfolgte durch s3-engineering.

Die Annuitäten (Jahreskosten) der beiden Lüftungssysteme im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario sind in Abbildung 23 dargestellt.



**Abbildung 23: Annuitäten im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario**

Wie auch bei den Ökobilanzen schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG, finanziell über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, deutlich schlechter ab als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Die Lebenszykluskosten der zentralen Lüftungsanlage mit WRG sind fast doppelt so hoch (95 % höher) als jene der Fensterlüftung mit Abluft. Die Mehrkosten für die Erdwärmesonden und Wärmepumpe bei der Fensterlüftung fallen aufgrund der hohen Investitionskosten der Zentrallüftungskomponenten, den Kosten für zusätzliche Beton- und Stahlbetonarbeiten im Rohbau sowie den hohen Kosten für Unterhalt und Wartung der zentralen Lüftungsanlage kaum ins Gewicht.

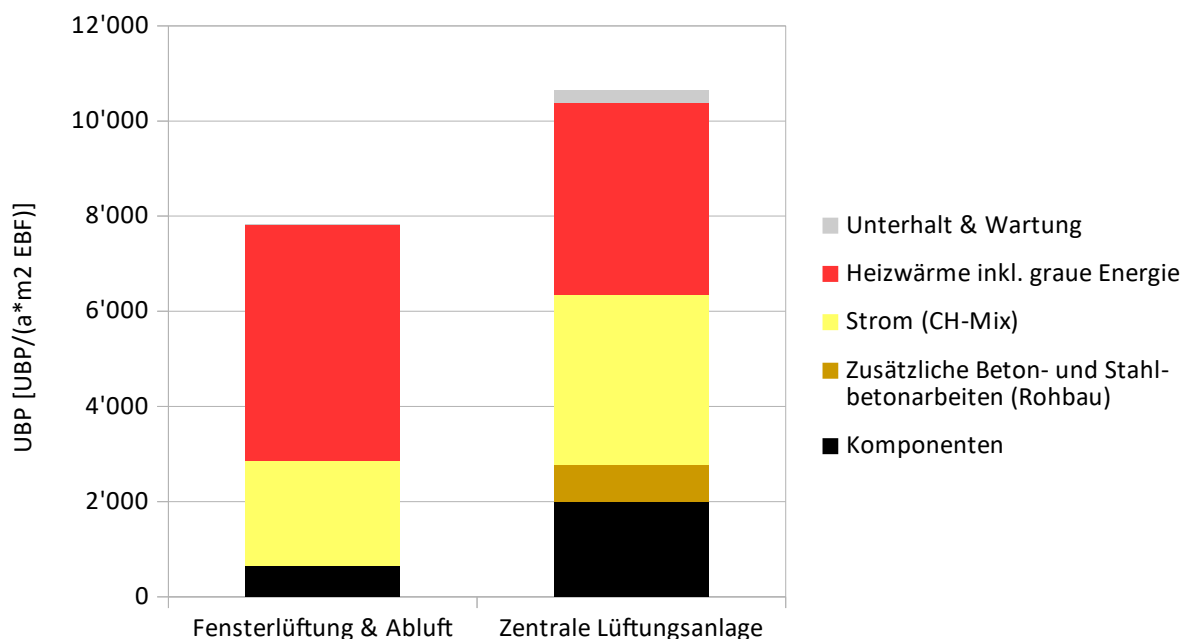
Auch finanziell betrachtet schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, sprich bei einer nachhaltigen Wärmeerzeugung, schlechter ab (relativ betrachtet) als wenn die Heizwärmeproduktion durch Gas erfolgt (siehe Ergebnisse bei idealem Nutzerverhalten und idealer Wärmerückgewinnung in Kapitel 4.2). Der Grund dafür ist wiederum derselbe: Erfolgt die Wärmeerzeugung durch EWS-Wärmepumpen, sind die jährlichen Heizkosten ohnehin schon sehr tief. Umso weniger lohnt es sich dann, durch massive Mehrkosten (bei Komponenten, Beton- und Stahlbetonarbeiten, Stromverbrauch und Unterhalt & Wartung) den Heizwärmeverbrauch zu reduzieren.

### 5.1. Ergebnisse bei längeren Lebensdauern der Komponenten

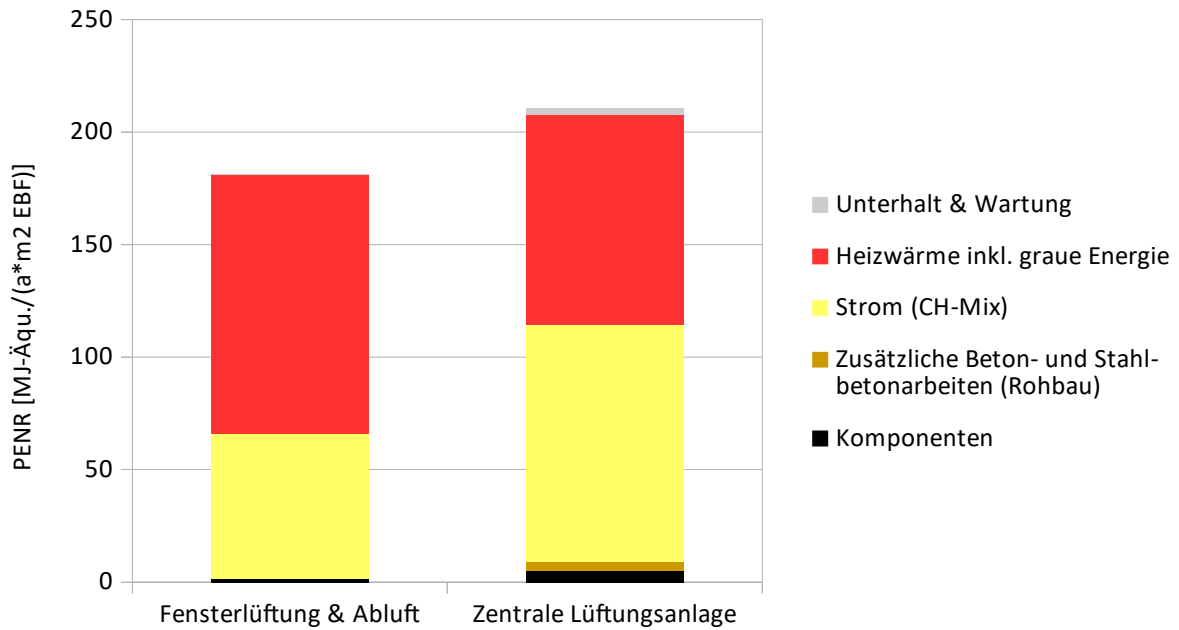
Wie schon beim idealen Szenario (in welchem die Wärmeerzeugung mittels Gasheizung erfolgt) wird nachfolgend auch beim EWS-Wärmepumpen-Szenario die Auswirkung von längeren bzw. realistischeren Lebensdauern der Komponenten untersucht. Bis anhin wurden beim EWS-Wärmepumpen-Szenario die Lebensdauern der Lüftungskomponenten aus der Norm SIA 382/1 übernommen. Im Folgenden werden dagegen die in Kapitel 4.3 in Tabelle 4 gezeigten, optimistischen Lebensdauern für die Komponenten angenommen. Im nachfolgend betrachteten Szenario werden für die zentrale Lüftungsanlage mit WRG somit die folgenden konservativen Annahmen getroffen, womit sich auch für ein nachhaltiges Heizsystem allgemeine Aussagen zu zentralen Lüftungsanlagen mit WRG treffen lassen:

- Maximale Einsparung an Heizwärme (siehe Kapitel 4.2)
- Sehr optimistische Lebensdauer der Lüftungskomponenten (siehe Kapitel 4.3)
- Maximale Einsparung an grauer Energie bzw. Investitionskosten (siehe Kapitel 5)

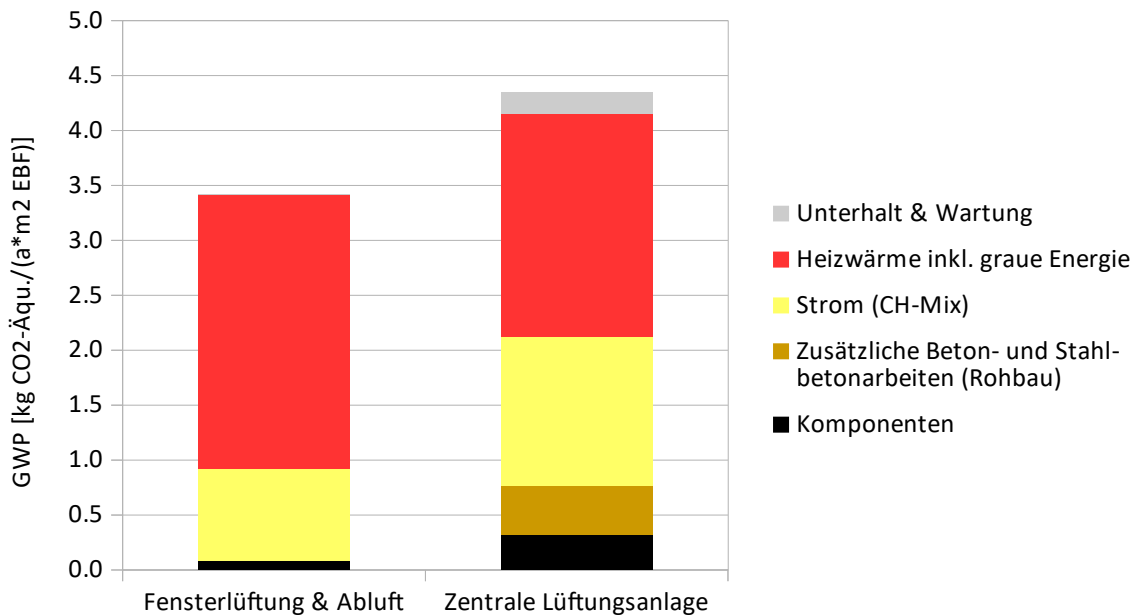
Die Umweltauswirkungen der beiden betrachteten Lüftungssysteme im EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten sind in den folgenden Grafiken anhand der Indikatoren Umweltbelastungspunkte (UBP), nicht erneuerbare Primärenergie (PENR) und Global Warming Potential (GWP; CO<sub>2</sub>-Emissionen) dargestellt.



**Abbildung 24: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in UBP**



**Abbildung 25: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR**



**Abbildung 26: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP**

Die zentrale Lüftungsanlage mit WRG schneidet auch im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten bei allen drei betrachteten Indikatoren deutlich schlechter ab als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verbraucht die zentrale Lüftungsanlage mit WRG 16.5 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 27.1 % mehr Treibhausgasemissionen. Am deutlichsten ist die Differenz erneut bei der totalen Umweltbelastung, ermittelt mit

der Schweizer Methode der ökologischen Knappheit. Demnach ist die durch die zentrale Lüftungsanlage mit WRG verursachte Umweltbelastung um 35.9 % höher als diejenige der Fensterlüftung mit Abluft. Dieses Resultat zeigt, dass auch bei einem nachhaltigen Heizsystem die zentrale Lüftungsanlage mit WRG – selbst mit sehr optimistischen Annahmen (maximale Einsparung an Heizwärme und grauer Energie sowie sehr langlebige Komponenten) – die Umwelt deutlich stärker belastet als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Weiter wird gezeigt, dass die zentrale Lüftungsanlage mit WRG in Kombination mit einem nachhaltigen Heizsystem, wie dem hier betrachteten EWS-Wärmepumpen-System, gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft (relativ betrachtet) noch schlechter abschneidet, wie wenn die zentrale Lüftungsanlage mit einem Heizsystem mit fossilen Brennstoffen kombiniert wird. So führte die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei der Gasheizung zu 11 % geringeren Treibhausgasemissionen und lediglich 12 % mehr UBPs gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft (ideales Szenario mit langlebigen Komponenten in Kapitel 4.3). Bei einer EWS-Wärmepumpe dagegen führt die zentrale Lüftungsanlage mit WRG zu 27 % höheren Treibhausgasemissionen und 36 % mehr UBPs gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft. Diese Ergebnisse sind insofern von hoher Relevanz, da heutzutage eine Mehrheit der Neubauten mit Wärmepumpen-Heizsystemen ausgestattet werden.

Die Annuitäten (Jahreskosten) der beiden Lüftungssysteme im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten sind in Abbildung 27 dargestellt.

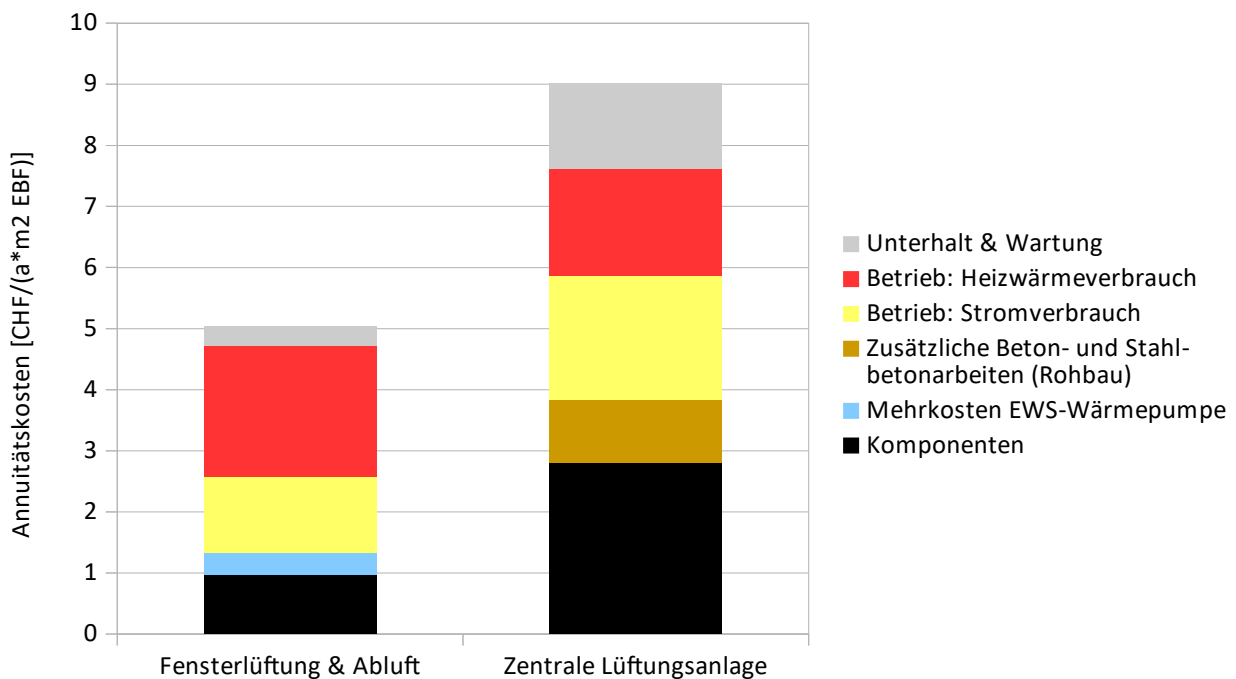


Abbildung 27: Annuitäten im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten

Auch im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit längeren Lebensdauern der Komponenten verursacht die zentrale Lüftungsanlage mit WRG immer noch 79 % höhere Annuitätskosten als die Fensterlüftung mit Abluft. Wie auch schon bei der ökologischen Betrachtung zeigt sich, dass sich eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG in Kombination mit einem nachhaltigen Heizsystem, wie dem hier betrachteten EWS-Wärmepumpen-System, gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft (relativ betrachtet) finanziell noch weniger lohnt, wie wenn die zentrale Lüftungsanlage mit einem Heizsystem mit fossilen Brennstoffen kombiniert wird. So führte die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei der Gasheizung zu 49 % höheren Annuitätskosten gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft (ideales Szenario mit langlebigen Kompo-

nungen in Kapitel 4.3). Bei einer EWS-Wärmepumpe dagegen führt die zentrale Lüftungsanlage mit WRG zu 79 % höheren Annuitätskosten gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft.

## 6 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen der Lüftungskonzepte der beiden Hälften der Siedlung Klee mittels Ökobilanzen zeigen, dass eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG (ökologisch betrachtet) gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft nur dann Sinn macht, wenn die Heizwärme mit fossilen Brennstoffen wie Öl oder Gas erzeugt wird und wenn durch ein optimales Nutzerverhalten und eine optimale WRG die theoretisch mögliche Heizwärmereduktion erzielt werden kann. Dies gilt allerdings nur, wenn der Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie oder der Ausstoss von Treibhausgasemissionen als Indikatoren für die Umweltbelastung verwendet werden. Wird hingegen die totale Umweltbelastung betrachtet, welche mit der Schweizer Methode der ökologischen Knappheit berechnet wird, schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG in allen untersuchten Szenarien schlechter ab als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Dies bedeutet, dass auch bei optimalem Nutzerverhalten sowie optimal funktionierender WRG und der so erreichten Einsparung von fast 20 % der Heizwärme, wie auch bei optimistisch langen Lebensdauern der Lüftungskomponenten die zentrale Lüftungsanlage mit WRG über den gesamten Lebenszyklus betrachtet eine grössere Umweltbelastung verursacht als die Fensterlüftung mit Abluft.

Weiter hat das verallgemeinerte EWS-Wärmepumpen-Szenario gezeigt, dass die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei einer nachhaltigen Wärmeerzeugung mittels EWS-Wärmepumpen noch weiter hinter die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft zurückfällt. Selbst unter den getroffenen konservativen Annahmen (maximal mögliche Einsparung an Heizwärme durch die zentrale Lüftungsanlage sowie sehr langlebige Lüftungskomponenten) ist die totale Umweltbelastung durch die zentrale Lüftungsanlage um 36 % höher als jene der Fensterlüftung mit Abluft.

Finanziell betrachtet lohnt sich die zentrale Lüftungsanlage mit WRG in keinem betrachteten Szenario, wie die verschiedenen Lebenszykluskostenrechnungen und Sensitivitätsanalysen zeigen. Selbst wenn durch optimales Nutzerverhalten und optimale WRG fast 20 % an „teurer“ (da durch fossile Energieträger erzeugte) Heizwärme eingespart werden kann und die Lüftungskomponenten optimistisch lange Lebenszeiten aufweisen, verursacht die zentrale Lüftungsanlage mit WRG über den gesamten Lebenszyklus fast 50 % mehr Kosten als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Bei einer nachhaltigen Wärmeerzeugung sind die Lebenszykluskosten sogar fast 80 % höher wie bei der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft.

In dieser Studie wurde anhand eines konkreten Wohnobjektes deutlich aufgezeigt, dass sich eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG gegenüber einer unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft weder ökologisch noch finanziell lohnt. Die Deutlichkeit der Resultate, die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten und die hohe Eignung der Siedlung Klee als Studienobjekt legen die Vermutung nahe, dass die finanzielle und ökologische Bilanz sehr ähnlich aussieht für ein Grossteil der zentralen Lüftungsanlagen. Die Tendenz der Kantone und Gemeinden, kontrollierte Wohnraumlüftungen vermehrt vorzuschreiben bzw. zu fördern sowie die KWL-Anforderungen gewisser Baustandards (z.B. Minergie-Standards) erscheinen mit Blick auf die Resultate der vorliegenden Studie zumindest ökologisch und finanziell als Irrweg.

In der vorliegenden Studie wurden jedoch nicht alle Faktoren untersucht, welche bezüglich der ganzheitlichen Beurteilung der beiden Lüftungskonzepte relevant wären. Insbesondere folgende Aspekte müssten für die Siedlung Klee zusätzlich untersucht werden, um einen ganzheitlichen Vergleich zu ermöglichen:

- *Hygienische bzw. gesundheitliche Aspekte:* Inwiefern führt eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG zu einer höheren Luftqualität? Gibt es gesundheitliche Vorteile? Inwiefern kann die Lärmexposition vermindert werden?
- *Komfort bzw. Zufriedenheit der Bewohner:* Wird eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG von den Bewohnern als Mehrwert wahrgenommen oder eher als störend empfunden?

Die positiven Effekte bezüglich dieser beiden Aspekte müssten deutlich ausfallen, um die höheren Umweltauswirkungen und grossen Mehrkosten für die Mieter zu rechtfertigen. Zudem könnten diese positiven Effekte auch mit anderen, weniger materialintensiven und dezentralen Lüftungssystemen erreicht werden. Die finanzielle und ökologische Bilanz solcher Systeme, bei welchen teilweise auch gewisse Formen der WRG möglich sind, könnte wesentlich besser ausfallen als diejenige der zentralen Lüftungsanlage. Es könnte spannend sein solche Systeme der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft in einer Lebenszyklusanalyse gegenüberzustellen.

Im Hinblick auf zukünftige Bauprojekte wird der BGH aufgrund der erhaltenen Resultate klar von einer zentralen Lüftungsanlage mit WRG abgeraten.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lüftungsplan einer BGH-Wohnung (Todt, Gmür und Partner AG 2011).....	3
Abbildung 2: Lüftungsplan einer GBMZ-Wohnung (Todt, Gmür und Partner AG 2011).....	4
Abbildung 3: Struktur der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht R., Büsser Knöpfel S. 2013).....	6
Abbildung 4: Allgemeine Stromverbräuche pro Quadratmeter EBF.....	11
Abbildung 5: Heizwärmeverbräuche pro Quadratmeter EBF.....	11
Abbildung 6: Umweltauswirkungen der Lüftungskonzepte, ausgedrückt in UBP.....	13
Abbildung 7: Umweltauswirkungen der Lüftungskonzepte, ausgedrückt in PENR.....	13
Abbildung 8: Umweltauswirkungen der Lüftungskonzepte, ausgedrückt in GWP.....	14
Abbildung 9: Annuitäten der beiden Lüftungssysteme.....	15
Abbildung 10: Einfluss des Strompreises auf die Annuitäten (Verwendeter Wert für Analysen: 20.1 Rp./kWh).....	16
Abbildung 11: Einfluss des Gaspreises auf die Annuitäten (Verwendeter Wert für Analysen: 6.1 Rp./kWh). 17	17
Abbildung 12: Einfluss des Zinssatzes auf die Annuitäten (Verwendeter Wert für Analysen: 1.5 %).....	17
Abbildung 13: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in UBP.....	18
Abbildung 14: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in PENR.....	19
Abbildung 15: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in GWP.....	19
Abbildung 16: Annuitäten im idealen Szenario.....	20
Abbildung 17: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in UBP.....	21
Abbildung 18: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR.....	22
Abbildung 19: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP.....	22
Abbildung 20: Annuitäten im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten.....	23
Abbildung 21: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in UBP.....	25
Abbildung 22: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in PENR.....	26
Abbildung 23: Annuitäten im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario.....	28
Abbildung 24: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in UBP.....	29
Abbildung 25: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR.....	30
Abbildung 26: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP.....	30
Abbildung 27: Annuitäten im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten.....	31

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Allgemeine Angaben zum BGH- und GBMZ-Gebäudeteil.....	2
Tabelle 2: Verwendete Parameter.....	9
Tabelle 3: Absolute Strom- und Heizwärmeverbräuche.....	10
Tabelle 4: Lebensdauern der Komponenten.....	21
Tabelle 5: Verwendete Parameter im verallgemeinerten Szenario.....	24
Tabelle 6: Angaben zum Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen.....	38
Tabelle 7: Angaben zum Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen.....	38
Tabelle 8: LCI der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft.....	39
Tabelle 9: LCI der zentralen Lüftungsanlage mit WRG.....	40

## Anhang

### Anhang A – Formeln der Annuitätenmethode

Annuitäten von Anfangsinvestitionen ( $A_{inv}$ ) werden wie folgt berechnet:

$$A_{inv} = I_0 \cdot \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

**Formel 1: Annuität der Anfangsinvestition**

Wobei  $I_0$  die Investition zum Zeitpunkt 0,  $i$  der Zinssatz (Hypothekarzins) und  $n$  die erwartete Lebenszeit der Komponente (Zeit bis zur Erneuerung der Komponente) darstellen.

Die Annuitäten  $A_U$  von Unterhaltsarbeiten werden wie folgt berechnet:

$$A_U = \frac{I_U}{p}$$

**Formel 2: Annuität der Unterhaltsarbeiten**

$I_U$  entspricht dabei den Unterhalts- oder Wartungskosten und  $p$  der Periode des Unterhalts oder der Wartung. Jährliche Betriebskosten von 100 CHF führen damit zu einer Annuität von 100 CHF, eine 200 CHF teure Wartung alle zwei Jahre ebenfalls zu einer Annuität von 100 CHF.

Die jährlichen Kosten für den Energieverbrauch und die Einnahmen für Energieproduktion  $A_E$  ergeben sich direkt aus der Multiplikation der Strommengen mit dem Einkaufs- oder Verkaufspreis:

$$A_E = \sum_{i=1}^n E_{c,i} \cdot p_c$$

**Formel 3: Annuität der Energieverbräuche und -produktionen**

$E_{c,i}$  ist der  $i$ . jährliche Stromverbrauch von total  $n$  unterschiedenen Verbräuchen, welche mit dem Preis von  $p_c$  pro kWh bezahlt werden müssen.

Die Annuitäten  $A_{E\&D}$  von Entsorgungs- und Demontagevorgängen ergeben sich nach:

$$A_{E\&D} = F \cdot \frac{i}{(1+i)^n - 1}$$

**Formel 4: Annuität der Kosten für Entsorgung und Demontage**

$F$  entspricht dabei der Höhe der zukünftigen Investition,  $i$  dem Zinssatz und  $n$  der Anzahl an Jahren, nach welcher die Investition fällig wird. Wenn man also jährlich einen Betrag in der Höhe von  $A_{E\&D}$  beiseite legt und darauf Zinsen in der Höhe von  $i$  erhält, hat man nach  $n$  Jahren den Betrag  $F$  zur Verfügung, mit dem man die Entsorgung und Demontage zahlen kann.

Die Gesamtannuität einer Komponente oder eines Teilsystems ergibt sich nun zu:

$$A_{\text{tot}} = A_{\text{inv}} + A_U + A_E + A_{E\&D}$$

**Formel 5: Gesamtannuität aller Lebensphasen**

### Anhang B – Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen

Der Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der Nasszellen im BGH-Gebäudeteil (unkontrollierte Fensterlüftung) wird gemäss Formel 6 berechnet.

$$W_{\text{el}} = P_{\text{el}} * t$$

**Formel 6: Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen**

$P_{\text{el}}$  entspricht dabei der elektrischen Leistungsaufnahme und  $t$  den jährlichen Vollast-Betriebsstunden aller Ventilatoren. In Tabelle 6 sind die verwendeten Werte sowie der resultierende Strombedarf zu sehen.

**Tabelle 6: Angaben zum Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen**

Beschreibung	Wert
Elektrische Leistungsaufnahme pro Ventilator	18 W
Geschätzte jährliche Vollast-Betriebsstunden pro Ventilator	730 h/a (= 365 d/a * 2 h/d)
Anzahl Ventilatoren	318
<b>Strombedarf</b>	<b>4'179 kWh/a</b>

### Anhang C – Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen

Der Strombedarf der Zu- und Abluft-Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen wird gemäss Formel 7 berechnet.

$$W_{\text{el}} = P_{\text{el}} * \eta * t$$

**Formel 7: Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlage**

$P_{\text{el}}$  entspricht dabei der elektrischen Leistungsaufnahme,  $\eta$  der Auslastung und  $t$  den jährlichen Betriebsstunden der Ventilatoren. Die verwendeten Werte und der resultierende Strombedarf sind in Tabelle 7 zu sehen.

**Tabelle 7: Angaben zum Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen**

Beschreibung	Wert
Elektrische Leistungsaufnahme aller Ventilatoren	11.8 kW
Durchschnittliche Auslastung	83 %
Jährliche Betriebsstunden	8'760 h/a
<b>Strombedarf</b>	<b>85'961 kWh/a</b>

**Anhang D – Ökologische Sachbilanzen (LCI)**

Die LCI der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft im BGH-Gebäudeteil ist in Tabelle 8 aufgelistet.

**Tabelle 8: LCI der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft**

	<b>Material/Prozess</b>	<b>Lebenszeit [a]</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Einheit</b>	<b>#[/(a*m2 EBF)]</b>
<b>KOMPONENTEN Abluft Nasszellen (BKP: 244.1)</b>	Ventilator 60 m <sup>3</sup> /h	20	207.9	kg	<b>0.00065</b>
	Filtereinsatz	20	99	Stk	<b>0.00031</b>
	Abluftrohr aus verz. Stahlblech 125mm	30	2956.8	kg	<b>0.00615</b>
	Abluftrohr aus verz. Stahlblech 100mm	30	486.45	kg	<b>0.00101</b>
	Bogen 90° aus verz. Stahlblech 125mm	30	248	kg	<b>0.00052</b>
	Bogen 90° aus verz. Stahlblech 100m	30	63.6	kg	<b>0.00013</b>
	Bogen 45° aus verz. Stahlblech 125mm	30	87.2	kg	<b>0.00018</b>
	Bogen 45° aus verz. Stahlblech 100mm	30	13.8	kg	<b>0.00003</b>
	Reduktionen 100/80 aus verz. Stahlblech	30	66	kg	<b>0.00014</b>
	Muffen aus verz. Stahlblech 125mm	30	56	kg	<b>0.00012</b>
	Muffen aus verz. Stahlblech 100mm	30	11.5	kg	<b>0.00002</b>
	Verbindungsrohre aus verz. Stahlblech 125mm	30	27	kg	<b>0.00006</b>
	Verbindungsrohre aus verz. Stahlblech 100mm	30	9	kg	<b>0.00002</b>
	Rohrschellen und -briden aus verz. Stahlblech	30	127.5	kg	<b>0.00027</b>
	Alu-Flex-Rohre 100mm	30	150	kg	<b>0.00031</b>
	Dachhauben von Lindab	30	222	kg	<b>0.00046</b>
Safephone aus verz. Stahlblech 125/100mm	30	690	kg	<b>0.00144</b>	
Isolation der Mauerdurchbrüche mit 20mm Mineralfasermatten	30	0.4	m <sup>3</sup>	<b>0.00000</b>	
<b>KOMPONENTEN Abluft Küchen (BKP: 244.2)</b>	Abluftrohr aus verz. Stahlblech 125mm	30	5068.8	kg	<b>0.01054</b>
	Bogen 90° aus verz. Stahlblech 125mm	30	800	kg	<b>0.00166</b>
	Bogen 45° aus verz. Stahlblech 125mm	30	106	kg	<b>0.00022</b>
	Muffen aus verz. Stahlblech 125mm	30	96	kg	<b>0.00020</b>
	Verbindungsrohre aus verz. Stahlblech 125mm	30	46	kg	<b>0.00010</b>
	Rohrschellen und -briden aus verz. Stahlblech	30	99	kg	<b>0.00021</b>
	Dachhauben von Lindab	30	521.5	kg	<b>0.00108</b>
	Isolation der Mauerdurchbrüche mit 20mm Mineralfasermatten	30	0.6	m <sup>3</sup>	<b>0.00000</b>
<b>BETRIEB</b>	Stromverbrauch	1	117328	kWh	<b>7.32</b>
	Heizwärmeverbrauch	1	787373	kWh	<b>49.14</b>
<b>UNTERHALT &amp; WARTUNG</b>	Lüftungsreinigung	10	2112	km	<b>0.0132</b>

Die LCI der zentralen Lüftungsanlage mit WRG im GBMZ-Gebäudeteil ist in Tabelle 9 aufgelistet.

**Tabelle 9: LCI der zentralen Lüftungsanlage mit WRG**

	Material/Prozess	Lebenszeit [a]	Anzahl	Einheit	#[/(a*m2 EBF)]
<b>KOMPONENTEN Lufterhitzer- anschlüsse (BKP: 242.9 abzüglich 242.3)</b>	Umwälzpumpen Stratos ECO 30/1-5 BMS 5x 59W	20	14.6	kg	<b>0.00004</b>
	Umwälzpumpen Stratos 30/1-8 4x 132W	20	16.4	kg	<b>0.00005</b>
	Umwälzpumpe Stratos 30/1-6 1x 132W	20	4	kg	<b>0.00001</b>
	Siederohre schwarz, geschweisst 3/4"	30	363.4	kg	<b>0.00073</b>
	Siederohre schwarz, geschweisst 1"	30	19.52	kg	<b>0.00004</b>
	Siederohre schwarz, geschweisst 5/4"	30	175.84	kg	<b>0.00035</b>
	Kugelhahnen 20x	30	12	kg	<b>0.00002</b>
	Strangregulier- und Absperrventile 30x	30	24	kg	<b>0.00005</b>
	Schmutzfänger 9x	30	0.9	kg	<b>0.00000</b>
	Rückschlagventile 9x	30	3.6	kg	<b>0.00001</b>
	Metallschlauch 20x	30	26	kg	<b>0.00005</b>
	Luftflaschen 22x	30	22	kg	<b>0.00004</b>
	Entleerhahnen 20x	30	8	kg	<b>0.00002</b>
	Tauchthermometer 20x	30	1	kg	<b>0.00000</b>
	Messnippel 40x	30	2	kg	<b>0.00000</b>
	Wärmedämmung Rohrnetz (Dämmstärke: 50mm)	30	232.507	kg	<b>0.00046</b>
	Wärmedämmung Armaturen 28x	30	4.872	kg	<b>0.00001</b>
	Isolationsbox zu STA Ventile 30x	30	3	kg	<b>0.00001</b>
Wärmezähler 10x	30	15	kg	<b>0.00003</b>	
<b>KOMPONENTEN Aussenluftfassung TH 11-20 (BKP: 244.10)</b>	<b>Kanäle/Rohre:</b>				
	Kanäle 500x1150 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	29.58	kg	<b>0.00006</b>
	Kanäle 900x500 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	87.85	kg	<b>0.00018</b>
	Kanäle 650x400 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	65.87	kg	<b>0.00013</b>
	Kanäle 450x350 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	14.34	kg	<b>0.00003</b>
	Kanäle 250x650 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	129.12	kg	<b>0.00026</b>
	Kanäle 350x1500 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	49.74	kg	<b>0.00010</b>
	Kanäle 350x1500 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	33.16	kg	<b>0.00007</b>
	Kanäle 350x1800 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	77.08	kg	<b>0.00015</b>
	Kanäle 250x1000 mm aus verz.	30	560	kg	<b>0.00112</b>

Stahlblech (Isolation Typ2)				
Kanäle 250x1000 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	22.4	kg	<b>0.00004</b>
Kanäle 250x550 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	50.19	kg	<b>0.00010</b>
Kanäle 250x550 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	200.76	kg	<b>0.00040</b>
Kanäle 200x800 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	71.68	kg	<b>0.00014</b>
Kanäle 200x800 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	188.16	kg	<b>0.00038</b>
Kanäle 350x750 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	19.72	kg	<b>0.00004</b>
Kanäle 350x800 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	20.62	kg	<b>0.00004</b>
Kanäle 550x500 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ1)	30	9.41	kg	<b>0.00002</b>
Kanäle 500x1800 mm aus verz. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	41.24	kg	<b>0.00008</b>
Bogen 90° 250x650 mm aus verz. Stahlblech	30	3.67	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 90° 900x500 mm aus verz. Stahlblech	30	11.4	kg	<b>0.00002</b>
Bogen 90° 650x400 mm aus verz. Stahlblech	30	4.28	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 90° 250x650 mm aus verz. Stahlblech	30	7.34	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 90° 450x350 mm aus verz. Stahlblech	30	6.52	kg	<b>0.00001</b>
Kanalbogen 90° 250x1000 mm aus verz. Stahlblech	30	25.45	kg	<b>0.00005</b>
Bogen 90° 200x800 mm aus verz. Stahlblech	30	8.14	kg	<b>0.00002</b>
Bogen 90° 500x1500 mm aus verz. Stahlblech	30	16.3	kg	<b>0.00003</b>
Bogen 90° 250x550 mm aus verz. Stahlblech	30	9.18	kg	<b>0.00002</b>
Bogen 45° 250x1000 mm aus verz. Stahlblech	30	5.1	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 30° 350x1500 mm aus verz. Stahlblech	30	5.66	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 30° 200x800 mm aus verz. Stahlblech	30	3.06	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 30° 250x650 mm aus verz. Stahlblech	30	1.38	kg	<b>0.00000</b>
Bogen 30° 500x1500 mm aus verz. Stahlblech	30	3.06	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 30° 500x1150 mm aus verz. Stahlblech	30	2.52	kg	<b>0.00001</b>

Stahlblech					
Konen 900x500/1150x500 mm aus verz. Stahlblech	30	13.67	kg	<b>0.00003</b>	
Konen 1800x350/1950x350 mm aus verz. Stahlblech	30	9.97	kg	<b>0.00002</b>	
Konen 450x350/650x250 mm aus verz. Stahlblech	30	9.144	kg	<b>0.00002</b>	
Konen 250x1000/350x750 mm aus verz. Stahlblech	30	14.742	kg	<b>0.00003</b>	
Konen 250x1000/350x800 mm aus verz. Stahlblech	30	5.38	kg	<b>0.00001</b>	
Konen 500x1500/500x1800 mm aus verz. Stahlblech	30	19.27	kg	<b>0.00004</b>	
Konen 800x200/550x250 mm aus verz. Stahlblech	30	8.07	kg	<b>0.00002</b>	
Übergangskone 650x500/ D600 mm aus verz. Stahlblech	30	4.225	kg	<b>0.00001</b>	
Übergangskone 650x400/ D560 mm aus verz. Stahlblech	30	3.94	kg	<b>0.00001</b>	
Übergangskone 500x500/ D650 mm aus verz. Stahlblech	30	3.94	kg	<b>0.00001</b>	
Übergangskone 550x500/ D500 mm aus verz. Stahlblech	30	7.04	kg	<b>0.00001</b>	
Übergangskone 500x650/ D560 mm aus verz. Stahlblech	30	3.94	kg	<b>0.00001</b>	
Übergangskone 1150x300/ D500 mm aus verz. Stahlblech	30	4.928	kg	<b>0.00001</b>	
Übergangskone 500x600/ D500 mm aus verz. Stahlblech	30	3.52	kg	<b>0.00001</b>	
Übergangskone 250x1000/ D560 mm aus verz. Stahlblech	30	4.728	kg	<b>0.00001</b>	
Etag 1000x250; Etag=370 mm aus verz. Stahlblech	30	17.696	kg	<b>0.00004</b>	
Rohre 350 mm aus verz. Stahlblech	30	103.53	kg	<b>0.00021</b>	
Rohre 400 mm aus verz. Stahlblech	30	236.46	kg	<b>0.00047</b>	
Rohre 450 mm aus verz. Stahlblech	30	228.24	kg	<b>0.00046</b>	
Rohre 500 mm aus verz. Stahlblech	30	232.32	kg	<b>0.00046</b>	
Rohre 560 mm aus verz. Stahlblech	30	401.88	kg	<b>0.00080</b>	
Rohre 600 mm aus verz. Stahlblech	30	583.05	kg	<b>0.00116</b>	
Bogen 90° 350 mm aus verz. Stahlblech	30	10.6	kg	<b>0.00002</b>	
Bogen 90° 400 mm aus verz. Stahlblech	30	21	kg	<b>0.00004</b>	
Bogen 90° 450 mm aus verz. Stahlblech	30	17.2	kg	<b>0.00003</b>	
Bogen 90° 500 mm aus verz. Stahlblech	30	20.8	kg	<b>0.00004</b>	
Bogen 90° 560 mm aus verz. Stahlblech	30	51.6	kg	<b>0.00010</b>	
Bogen 90° 600 mm aus verz. Stahlblech	30	47.4	kg	<b>0.00009</b>	
Bogen 45° 400 mm aus verz. Stahlblech	30	30.1	kg	<b>0.00006</b>	

Bogen 45° 560 mm aus verz. Stahlblech	30	15.4	kg	<b>0.00003</b>
Bogen 45° 600 mm aus verz. Stahlblech	30	55.8	kg	<b>0.00011</b>
Bogen 30° 400 mm aus verz. Stahlblech	30	6.8	kg	<b>0.00001</b>
Bogen 30° 500 mm aus verz. Stahlblech	30	19.2	kg	<b>0.00004</b>
Bogen 30° 560 mm aus verz. Stahlblech	30	29	kg	<b>0.00006</b>
T-Stücke 90° 560/450/500 mm aus verz. Stahlblech	30	11	kg	<b>0.00002</b>
T-Stücke 90° 560/400/450 mm aus verz. Stahlblech	30	10	kg	<b>0.00002</b>
T-Stücke 90° 600/400/400 mm aus verz. Stahlblech	30	10	kg	<b>0.00002</b>
T-Stücke 90° 600/600/350 mm aus verz. Stahlblech	30	11	kg	<b>0.00002</b>
Muffen 350 mm aus verz. Stahlblech	30	4.2	kg	<b>0.00001</b>
Muffen 400 mm aus verz. Stahlblech	30	10.5	kg	<b>0.00002</b>
Muffen 450 mm aus verz. Stahlblech	30	10.4	kg	<b>0.00002</b>
Muffen 500 mm aus verz. Stahlblech	30	14.4	kg	<b>0.00003</b>
Muffen 560 mm aus verz. Stahlblech	30	23.4	kg	<b>0.00005</b>
Muffen 600 mm aus verz. Stahlblech	30	33.6	kg	<b>0.00007</b>
Verbindungsrohre 350 mm aus verz. Stahlblech	30	4.2	kg	<b>0.00001</b>
Verbindungsrohre 400 mm aus verz. Stahlblech	30	8.4	kg	<b>0.00002</b>
Verbindungsrohre 450 mm aus verz. Stahlblech	30	8	kg	<b>0.00002</b>
Verbindungsrohre 500 mm aus verz. Stahlblech	30	12	kg	<b>0.00002</b>
Verbindungsrohre 560 mm aus verz. Stahlblech	30	15.6	kg	<b>0.00003</b>
Verbindungsrohre 600 mm aus verz. Stahlblech	30	28	kg	<b>0.00006</b>
Rohrschellen 350 mm aus verz. Stahlblech	30	7.4	kg	<b>0.00001</b>
Rohrschellen 400 mm aus verz. Stahlblech	30	14.58	kg	<b>0.00003</b>
Rohrschellen 450 mm aus verz. Stahlblech	30	13.8	kg	<b>0.00003</b>
Rohrschellen 500 mm aus verz. Stahlblech	30	14	kg	<b>0.00003</b>
Rohrschellen 560 mm aus verz. Stahlblech	30	19.8	kg	<b>0.00004</b>
Rohrschellen 600 mm aus verz. Stahlblech	30	30	kg	<b>0.00006</b>
<b>Armaturen/Instrumente:</b>				
2 Anschlusskästen der Schmidlin AG aus verz. Stahlblech	30	56.6	kg	<b>0.00011</b>

	Feuerschutzthermostat	30	0.1	kg	0.00000
	Rauchmelder 230VAC 1 Wechselk.	30	0.1	kg	0.00000
	<b>Isolation:</b>				
	Isolation der Mauerdurchbrüche mit 20mm Mineralfasermatten	30	0.6	m <sup>3</sup>	0.00000
	Aussenisolation Mineralfaserplatten 25mm dick	30	14.5	m <sup>3</sup>	0.00003
	Wärmedämmung Rohrnetz (Dämmstärke: 50mm)	30	1320	kg	0.00263
<b>KOMPONENTEN</b> <b>Kontrollierte</b> <b>Wohnungslüftung</b> <b>TH 15 (BKP: 244.15)</b>	<b>Zuluft-Monobloc Seven-Air SHG 2.6:</b>				
	Flexible Manschette isoliert Gewebe	20	2.5	kg	0.00007
	Flexible Manschette isoliert Rahmen	20	5	kg	0.00015
	Flexible Manschette Isolation	20	1	kg	0.00003
	Aussenluftklappe innenliegend	20	15	kg	0.00045
	Filterteil: F7, Unifil	1	10	Stk	0.00599
	WRG-Alu-Plattentauscher	20	85.3335	kg	0.00256
	Luftherhitzerteil Rahmen aus verz. Stahlblech	20	3	kg	0.00009
	Luftherhitzerteil Kupfer Rohre	20	5	kg	0.00015
	Luftherhitzerteil Alu-Lamellen	20	2	kg	0.00006
	Zuluft-Ventilatorteil	20	10.8	kg	0.00032
	EC-Aussenläufermotor	20	15	kg	0.00045
	Flexible Manschette Gewebe	20	2.5	kg	0.00007
	Flexible Manschette Rahmen	20	5	kg	0.00015
	Differenzdruck-Manometer	20	0.9	kg	0.00003
	<b>Fortluft-Monobloc Seven-Air SHG 2.6:</b>				
	Flexible Manschette Gewebe	20	2.5	kg	0.00007
	Flexible Manschette Rahmen	20	5	kg	0.00015
	Fortluftklappe innenliegend	20	15	kg	0.00045
	Filterteil: F7, Unifil	1	10	Stk	0.00599
	Abluft-Ventilatorteil	20	10.8	kg	0.00032
	EC-Aussenläufermotor	20	15	kg	0.00045
	Flexible Manschette isoliert Gewebe	20	2.5	kg	0.00007
	Flexible Manschette isoliert Rahmen	20	5	kg	0.00015
	Flexible Manschette Isolation	20	1	kg	0.00003
	Differenzdruck-Manometer	20	0.9	kg	0.00003
	WRG-Alu-Plattentauscher	20	75.411	kg	0.00226
	<b>Kanäle/Rohre:</b>				
	Aussenluftkanalnetz 200x750 mm aus verz. Stahlblech	30	25.5	kg	0.00051
	Aussenluftkanalnetz 300x750 mm aus verz. Stahlblech	30	9.4	kg	0.00019

Bogen 90° 200x750 mm aus verz. Stahlblech	30	15.6	kg	<b>0.00031</b>
Bogen 90° 300x750 mm aus verz. Stahlblech	30	4.3	kg	<b>0.00009</b>
Konen/Etage 400x900 mm aus verz. Stahlblech	30	16.38	kg	<b>0.00033</b>
Konen/Etage 300x900 mm aus verz. Stahlblech	30	21.6	kg	<b>0.00043</b>
Konen/Etage 300x750 mm aus verz. Stahlblech	30	9.4	kg	<b>0.00019</b>
Konen/Etage 200x750 mm aus verz. Stahlblech	30	3.4	kg	<b>0.00007</b>
Übergang 300x750 mm aus verz. Stahlblech	30	4.7	kg	<b>0.00009</b>
Kanäle 200x300 mm aus verz. Stahlblech	30	49.5	kg	<b>0.00099</b>
Kanäle 200x600 mm aus verz. Stahlblech	30	72	kg	<b>0.00144</b>
Kanäle 200x900 mm aus verz. Stahlblech	30	9.9	kg	<b>0.00020</b>
Kanäle 250x500 mm aus verz. Stahlblech	30	6.7	kg	<b>0.00013</b>
Kanäle 250x600 mm aus verz. Stahlblech	30	15.2	kg	<b>0.00030</b>
Kanäle 250x700 mm aus verz. Stahlblech	30	17	kg	<b>0.00034</b>
Kanäle 250x800 mm aus verz. Stahlblech	30	9.4	kg	<b>0.00019</b>
Kanäle 300x700 mm aus verz. Stahlblech	30	9	kg	<b>0.00018</b>
Kanäle 300x750 mm aus verz. Stahlblech	30	18.8	kg	<b>0.00038</b>
Kanäle 300x900 mm aus verz. Stahlblech	30	10.8	kg	<b>0.00022</b>
Kanäle 450x500 mm aus verz. Stahlblech	30	8.5	kg	<b>0.00017</b>
Kanäle 400x900 mm aus verz. Stahlblech	30	23.4	kg	<b>0.00047</b>
Bogen 90° 200x300 mm aus verz. Stahlblech	30	14	kg	<b>0.00028</b>
Bogen 90° 200x600 mm aus verz. Stahlblech	30	9.9	kg	<b>0.00020</b>
Bogen 90° 250x300 mm aus verz. Stahlblech	30	4.4	kg	<b>0.00009</b>
Bogen 90° 250x600 mm aus verz. Stahlblech	30	14	kg	<b>0.00028</b>
Bogen 90° 250x700 mm aus verz. Stahlblech	30	15.6	kg	<b>0.00031</b>

Bogen 90° 250x800 mm aus verz. Stahlblech	30	4.3	kg	<b>0.00009</b>
Bogen 90° 300x700 mm aus verz. Stahlblech	30	4.1	kg	<b>0.00008</b>
Bogen 90° 300x750 mm aus verz. Stahlblech	30	12.9	kg	<b>0.00026</b>
Bogen 90° 300x900 mm aus verz. Stahlblech	30	9.8	kg	<b>0.00020</b>
Bogen 90° 400x900 mm aus verz. Stahlblech	30	10.6	kg	<b>0.00021</b>
Bogen 90° 450x500 mm aus verz. Stahlblech	30	7.8	kg	<b>0.00016</b>
Kanalboden 600x200 mm aus verz. Stahlblech	30	1	kg	<b>0.00002</b>
Kanalboden 300x200 mm aus verz. Stahlblech	30	1.2	kg	<b>0.00002</b>
Zu-/Abluftrohr aus verz. Stahlblech 125mm	30	1562.88	kg	<b>0.03120</b>
Bogen 90° aus verz. Stahlblech 125mm	30	139.2	kg	<b>0.00278</b>
Bogen 60° aus verz. Stahlblech 125mm	30	2.4	kg	<b>0.00005</b>
Bogen 45° aus verz. Stahlblech 125mm	30	42	kg	<b>0.00084</b>
Bogen 30° aus verz. Stahlblech 125mm	30	3.6	kg	<b>0.00007</b>
Muffen aus verz. Stahlblech 125mm	30	28.2	kg	<b>0.00056</b>
Rohrschellen und -stützen aus verz. Stahlblech	30	31.8	kg	<b>0.00063</b>
Verbindungsrohre aus verz. Stahlblech 125mm	30	14.1	kg	<b>0.00028</b>
Lüftungsrohr ComfoTube-90 Zehnder	30	598	kg	<b>0.01194</b>
O-Ring, Muffen, Rohrkappen ComfoTube-90	30	9.6	kg	<b>0.00019</b>
<b>Armaturen/Instrumente:</b>				
Gehäuse des Kanalschalldämpfers aus verz. Stahlblech	30	156.5	kg	<b>0.00312</b>
Glasseidengewebe der Kulissen des Kanalschalldämpfers	30	106	kg	<b>0.00212</b>
Abluftventile 90 mm	30	23.4	kg	<b>0.00047</b>
Anschlussgehäuse für Tellerventile 100 mm	30	195	kg	<b>0.00389</b>
Verteilerkasten Zehnder mit 2 Anschlüssen 90 mm	30	9.6	kg	<b>0.00019</b>
Verteilerkasten Zehnder mit 4 Anschlüssen 90 mm	30	60	kg	<b>0.00120</b>
Verteilerkasten Zehnder mit 5 Anschlüssen 90 mm	30	72	kg	<b>0.00144</b>
Luftdurchlassgehäuse Zehnder	30	80.4	kg	<b>0.00160</b>
Design-Gitter Zehnder venezia 260x160	30	2.7872	m <sup>2</sup>	<b>0.00006</b>

	mm				
	Brandschutzklappe 700x250 mm	30	27	kg	<b>0.00054</b>
	Klappenmotor mit Federrücklauf	20	1.6	kg	<b>0.00005</b>
	Irisblenden IRIS 257.1 125 mm	30	23.8	kg	<b>0.00048</b>
	Kontrolldeckel 120 mm aus verz. Stahlblech	30	0.8	kg	<b>0.00002</b>
	Tauchthermometer 4x	30	0.2	kg	<b>0.00000</b>
	<b>Isolation:</b>				
	Isolation der Mauerdurchbrüche mit 20mm Mineralfasermatten	30	0.8	m <sup>3</sup>	<b>0.00002</b>
	Aussenisolation Mineralfaserplatten 25mm dick	30	1.25	m <sup>3</sup>	<b>0.00002</b>
	Wärmedämmung Rohrnetz (Dämmstärke: 25mm)	30	103.125	kg	<b>0.00206</b>
<b>ZUSÄTZLICHE BETON- UND STAHLBETON-ARBEITEN (ROHBAU)</b>	Beton	100	1178	m <sup>3</sup>	<b>0.00071</b>
	Betonstahl	100	203519	kg	<b>0.12188</b>
<b>BETRIEB</b>	Stromverbrauch	1	198148	kWh	<b>11.87</b>
	Heizwärmeverbrauch	1	800721	kWh	<b>47.95</b>
<b>UNTERHALT &amp; WARTUNG</b>	Aktivkohlefilter	4	11.2	kg	<b>0.00168</b>
	Lüftungsreinigung	10	3960	km	<b>0.23714</b>
	Kontroll- und Wartungsarbeiten	1	432	km	<b>0.25870</b>