

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



Autoren

**Kevin Knecht, Diego Sigrist**

Auftraggeber

**Baugenossenschaft Hagenbrünneli**

**Gemeinnützige Bau- und Mietergenossenschaft Zürich**

## 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., 2019, <i>Vergleich der beiden Lüftungskonzepte der Siedlung Klee bezüglich Ökologie und Ökonomie</i> , s3 GmbH, Dübendorf
Auftraggeber	Baugenossenschaft Hagenbränneli Lerchenberg 21, 8046 Zürich Gemeinnützige Bau- und Mietergenossenschaft Zürich Hohlstrasse 195, 8004 Zürich
Auftragnehmer	s3 GmbH Zürichstrasse 45, 8600 Dübendorf Tel. +41 44 552 94 84 <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. s3 GmbH und die Autoren geben keine Garantie bezüglich Eignung oder Vollständigkeit der im Bericht dargestellten Informationen. Die s3 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 Allgemiestrom- sowie die Heizwärmeverbräuche der beiden Siedlungsteile ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass der Siedlungsteil mit zentraler Lüftungsanlage  $3.93 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  mehr Allgemiestrom verbraucht als der Siedlungsteil mit unkontrollierter Fensterlüftung, was einem Mehrverbrauch von 63 % entspricht. Diese grosse Differenz ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auf die Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen zurückzuführen. Bei der Heizwärme dagegen weist der Siedlungsteil mit zentraler Lüftungsanlage einen 1.8 % geringeren Verbrauch auf als der Siedlungsteil mit unkontrollierter Fensterlüftung. Das theoretisch mögliche Einsparungspotential beläuft sich allerdings auf über 24 % 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 – fast 250 % höher ist als diejenige der Fensterlüftung mit Abluft. Finanziell über den gesamten Lebenszyklus betrachtet verursacht die zentrale Lüftungsanlage 380 % höhere Kosten, was auf die hohen Investitionskosten der Lüftungskomponenten, 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 sowie ein tieferer, Stromverbrauch der zentralen Lüftungsanlagen angenommen. Selbst in diesem idealen Szenario schneidet die zentrale Lüftungsanlage sowohl ökologisch wie auch finanziell schlechter ab. So werden zwar 74 % weniger Treibhausgasemissionen verursacht, doch führt die zentrale Lüftungsanlage immer noch zu einer 8 % 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 deutlich schlechter ab gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft. Grund dafür ist, dass es sich bei einer nachhaltigen Wärmeerzeugung ökologisch nicht lohnt, durch enormen Mehraufwand bei Lüftungskomponenten, Stromverbrauch und Wartung den Heizwärmeverbrauch zu reduzieren. Deshalb verursacht die zentrale Lüftungsanlage – selbst bei einem über 24 % tieferen Heizwärmeverbrauch gegenüber der unkontrollierten Fensterlüftung – über den ganzen Lebenszyklus betrachtet 85 % mehr Treibhausgasemissionen und eine 120 % höhere allgemeine Umweltbelastung. Die Lebenszykluskosten sind um 150 % höher als jene der unkontrollierten Fensterlüftung.

In dieser Studie wurde für ein konkretes Wohnobjekt 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 verfügbaren 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. Demzufolge scheint eine zentrale Lüftungsanlage kein Instrument zu sein, um die Ökobilanz eines Gebäudes zu verbessern oder die Kosten zu senken, sondern dient einer allfälligen Steigerung der Luftqualität und des Komforts. Es stellt sich die Frage, ob diese Mehrwerte nicht auch mit weniger materialintensiven, dezentralen Lüftungsanlagen erreicht werden könnten.

## 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 Jahres 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
PWW	Pumpwarmwasser
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
TH	Treppenhaus
UBP	Umweltbelastungspunkte: Indikator der LCA-Methode Methode der ökologischen Knappheit
WRG	Wärmerückgewinnung

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	1
1 Einführung.....	1
1.1. Ausgangslage.....	1
1.2. Ziel der Studie.....	1
1.3. Siedlung Klee.....	2
1.4. Die beiden unterschiedlichen Lüftungskonzepte.....	4
2 Methodik.....	10
2.1. Lebenszyklusanalyse.....	10
2.2. Lebenszykluskostenrechnung.....	11
2.3. Funktionelle Einheit.....	11
3 Sachbilanzdaten und Modellierungsannahmen.....	12
3.1. Komponenten.....	12
3.2. Rohbau: Mehrverbrauch Stahlbeton.....	13
3.3. Betrieb: Stromverbrauch.....	14
3.4. Betrieb: Heizwärmeverbrauch.....	15
3.5. Unterhalt & Wartung.....	16
4 Ergebnisse und Diskussion der Bilanzierungen.....	17
4.1. Energiebilanzen.....	17
4.2. Ökobilanz.....	20
4.3. Lebenszykluskostenrechnung.....	22
5 Sensitivitätsanalysen.....	23
5.1. Einfluss der finanziellen Parameter.....	23
5.2. Ergebnisse bei idealem Nutzerverhalten und idealer Wärmerückgewinnung.....	25
5.3. Ergebnisse bei längeren Lebensdauern der Komponenten.....	29
6 Verallgemeinertes Szenario mit Erdwärmesonden-Wärmepumpen und Schweizer Verbrauchermix...32	
6.1. Ergebnisse bei längeren Lebensdauern der Komponenten.....	37
7 Fazit und Ausblick.....	40
Abbildungsverzeichnis.....	41
Tabellenverzeichnis.....	42
Anhang.....	43

## Vorwort

Die vorliegende Studie wurde gegenüber der Version vom 23.11.2018 in verschiedensten Bereichen überarbeitet. An dieser Stelle soll eine kurze Übersicht über die grössten Änderungen gegeben werden:

- Die Dokumentation wurde erweitert.
- Die Struktur des Berichts wurde angepasst.
- Getroffene Annahmen wurden klarer deklariert und begründet.
- Für das ideale Szenario und das verallgemeinerte Szenario mit Erdsonden-Wärmepumpen werden teilweise leicht veränderte Annahmen verwendet.
- In den LCA- und LCC-Bilanzen werden neu jeweils nur noch die Mehrverbräuche an Elektrizität und Raumwärme ausgewiesen, um einen klareren Vergleich zu ermöglichen.

## 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 Viertel 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 Lüfthygiene 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.

In der vorliegenden Studie werden jedoch nicht alle Faktoren untersucht, welche für eine ganzheitliche

---

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

Beurteilung der beiden Lüftungskonzepte relevant sind. Insbesondere die folgenden beiden 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?

Somit beschränken sich die Aussagen dieser Studie auf die ökologischen und finanziellen Auswirkungen der beiden betrachteten Lüftungskonzepte.

### 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 praktisch 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 Gebäudeteile untersucht werden.

In Tabelle 1 sind die Eckdaten<sup>2</sup> der beiden Gebäudehälften gegenübergestellt.

**Tabelle 1: Allgemeine Angaben zum BGH- und GBMZ-Gebäudeteil**

	BGH-Gebäudeteil	GBMZ-Gebäudeteil
Lüftungskonzept der Wohnungen	Unkontrollierte (manuelle) Fensterlüftung mit Abluft	Zentrale Lüftungsanlage mit Lüfterwärmung und WRG
Wärmeerzeugung	Gas (Heizung, Warmwasser), thermische Solarkollektoren (Warmwasser)	
Energiebezugsfläche <sup>3</sup> (EBF) [m <sup>2</sup> ]	18'830	19'507
Geschossfläche [m <sup>2</sup> ]	28'816	28'789
Anzahl Bewohner	ca. 380	ca. 460
Anzahl Wohnungen	173	167

Zu den Energiebezugsflächen (EBFs) liegen unterschiedliche Angaben vor, wobei die plausibelsten Werte verwendet werden (die unterschiedlichen Angaben zu den EBFs werden im Anhang A gezeigt und diskutiert). Da die EBFs jedoch nur dazu verwendet werden, eine funktionelle Einheit zu bilden (sprich die Umweltauswirkungen und Kosten auf einen Quadratmeter EBF zu beziehen), würden andere EBFs nichts an den Bilanzen ändern, sofern die prozentualen Abweichungen (zwischen den beiden EBFs) gleich bleiben. Es werden jeweils alle Kosten und Umweltauswirkungen für die beiden Siedlungsteile respektive für eines der zehn Wohnhäuser als Total bilanziert und anschliessend durch die EBFs der beiden Gebäudeteile respektive eines Wohnhauses geteilt.

<sup>2</sup> Gemäss Leiter technische Liegenschaftsbewirtschaftung BGH

<sup>3</sup> Gemäss Minergie-Heizwärmebedarf-Berechnungen (Objekt-Nr. 526 und 527) der Kopitsis Bauphysik AG



In Abbildung 1 ist der Grundriss der Siedlung Klee zu sehen, wobei die Siedlung in zehn Sektoren und 20 Treppenhäuser unterteilt ist (jeder Sektor umfasst 2 Treppenhäuser). Jedes Treppenhaus verfügt über eine eigene Liftanlage. Die Sektoren 1-5 (Treppenhäuser 1-10) gehören der BGH – die Sektoren 6-10 (Treppenhäuser 11-20) der GBMZ.

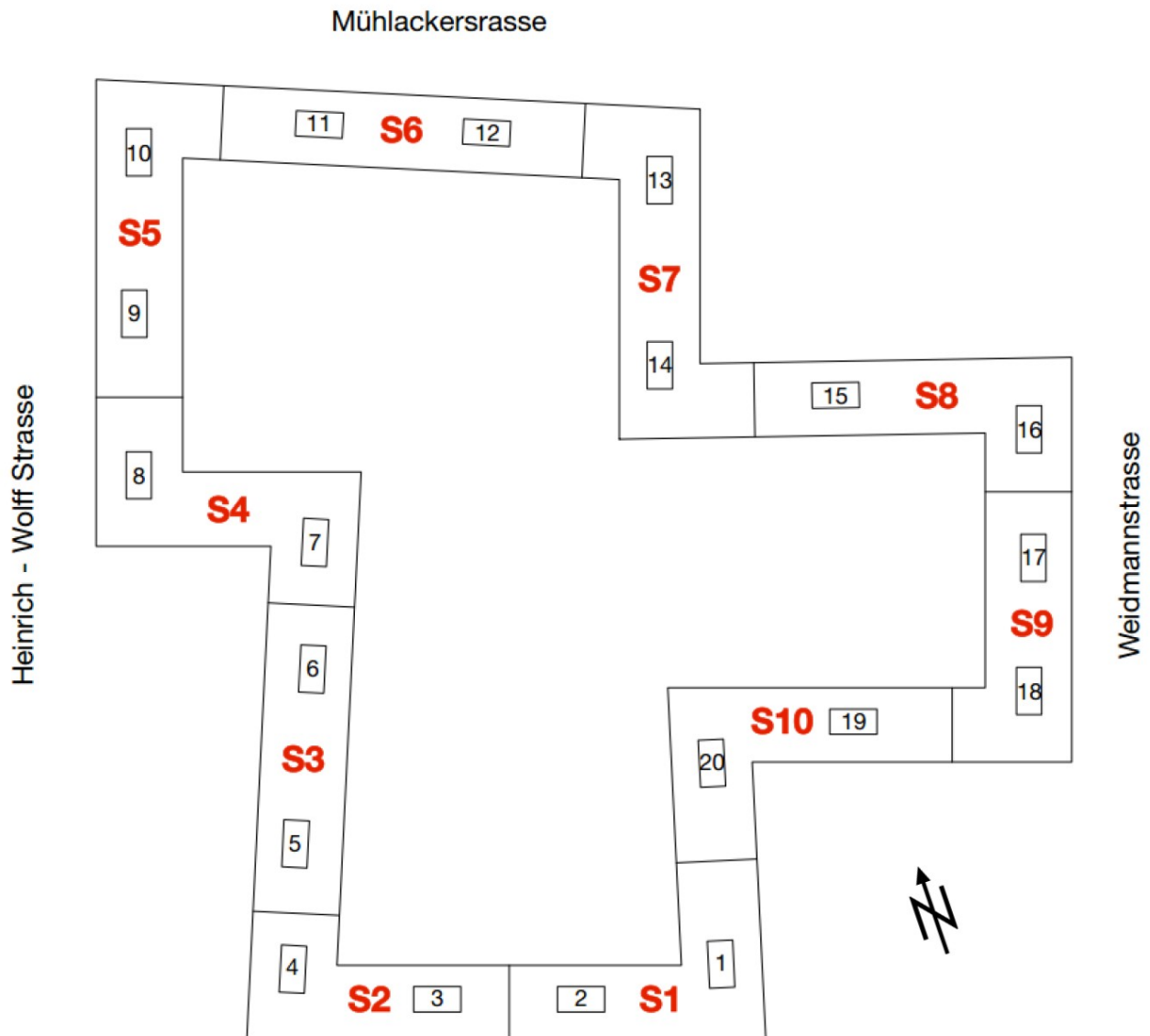


Abbildung 1: Grundriss der Siedlung Klee (Knapkiewicz & Fickert AG 2008)

Sowohl der BGH- wie auch der GBMZ-Gebäudeteil der Siedlung Klee verfügt über eine Heizzentrale mit jeweils zwei Gasbrennwertkessel (vom Typ Hoval UltraGas 400). Die Raumheizung erfolgt in beiden Gebäudeteilen ausschliesslich über die Gasheizung – die thermischen Solarkollektoren werden nur für die Warmwasseraufbereitung genutzt. Die Prinzipschemata der beiden Heizzentralen sowie der Wärmeversorgung im BGH- und GBMZ-Gebäudeteil werden im Anhang B gezeigt.

## 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. Die BGH-Wohnungen verfügen über Dreh-Kipp-Fenster, sprich die Fenster können sowohl vollständig geöffnet (z.B. zum Stosslüften) wie auch gekippt (z.B. zum Dauerlüften) werden. In Abbildung 2 wird der Grundriss einer BGH-Wohnung gezeigt. Die Abluftkanäle sind jeweils mit oranger Farbe eingezeichnet.

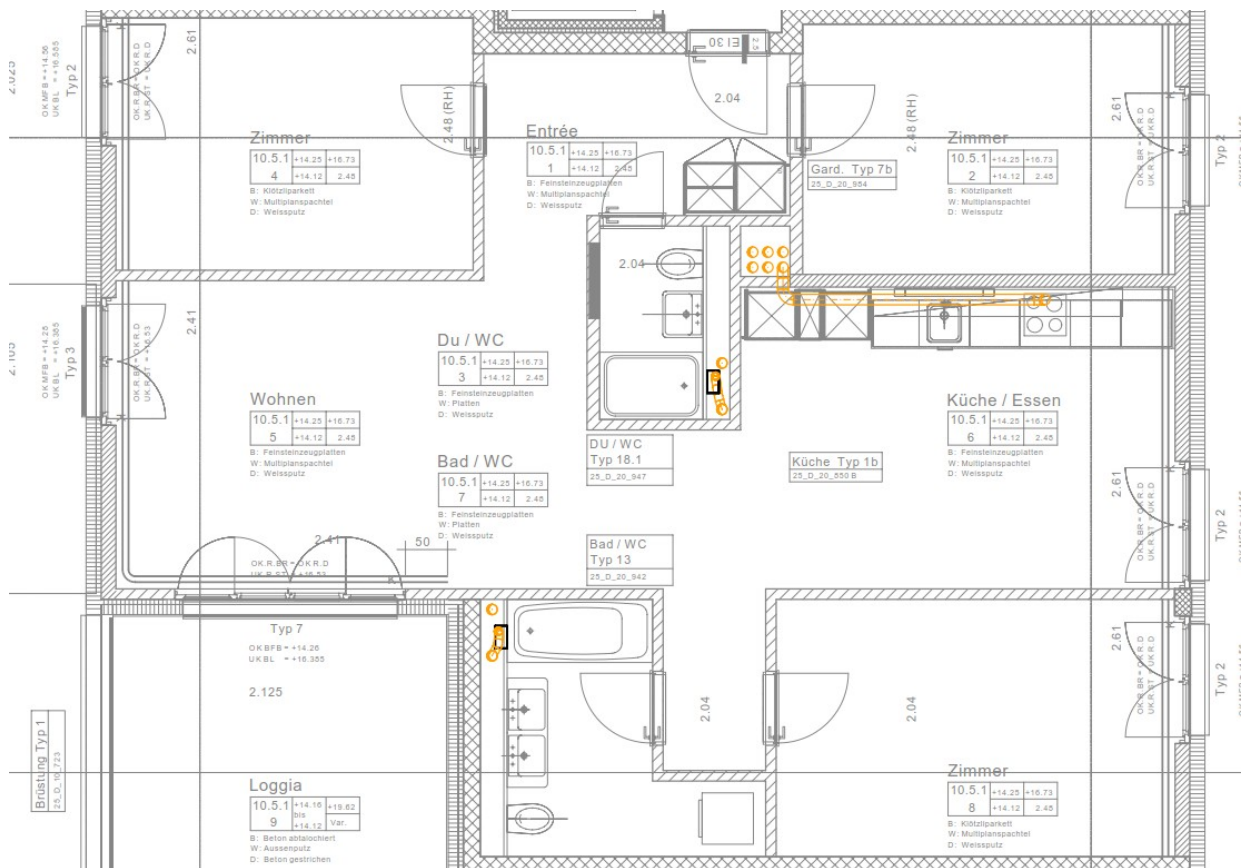
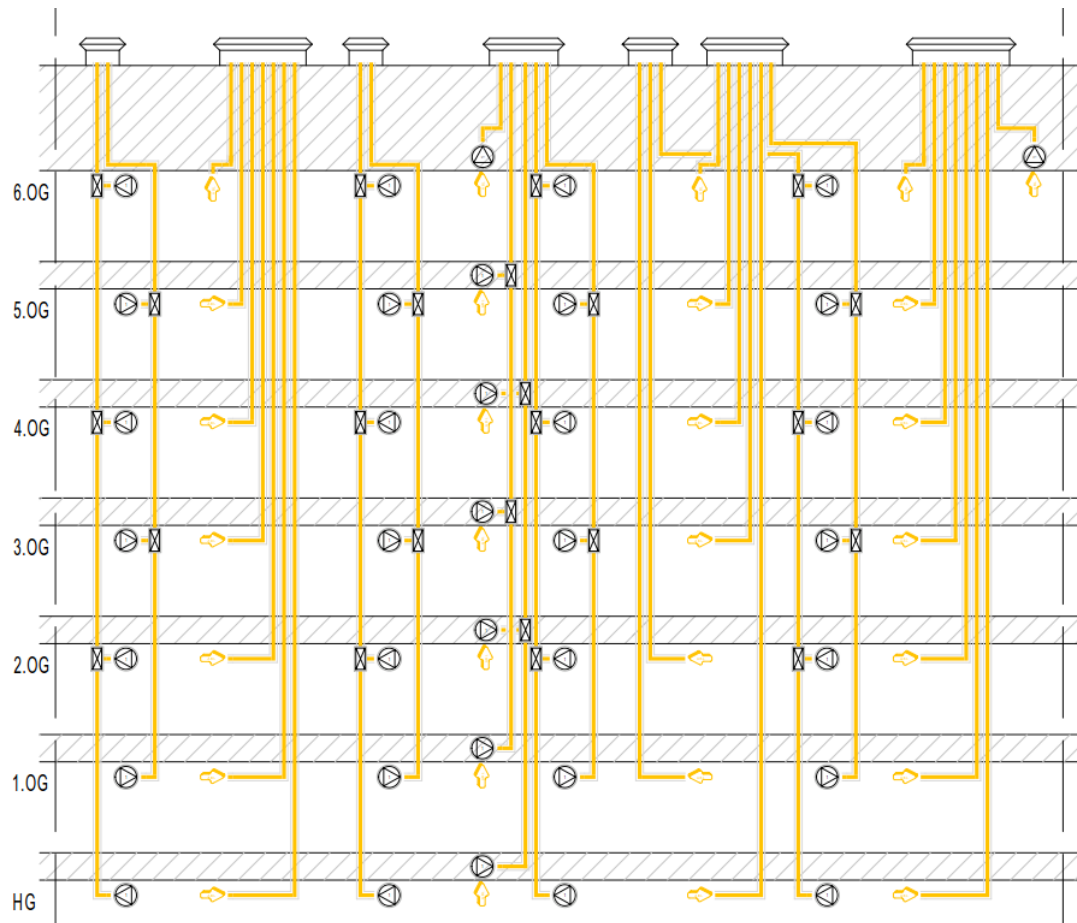


Abbildung 2: Lüftungsplan einer BGH-Wohnung (Todt Gmür und Partner AG 2011)

Das Strangschema der Abluftanlagen in Treppenhaus 1 ist in Abbildung 3 gezeigt. Darauf werden jeweils nur die Ventilatoren der Nasszellen aufgeführt, da die Küchenventilatoren bereits in den Dunstabzugshauben enthalten sind.



**Abbildung 3: Strangschema von Treppenhaus 1 im BGH-Gebäudeteil**

(Todt 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, sprich der Ist-Zustand ist nicht normkonform. Für einen «fairen» Vergleich müssen daher Nachströmelemente berücksichtigt werden. Deshalb wird im idealen Szenario (Kapitel 5.2) davon ausgegangen, dass pro BGH-Wohnung jeweils drei Nachströmelemente verbaut sind.<sup>4</sup> Somit wird ein fairer ökologischer und finanzieller Vergleich der beiden Lüftungskonzepte sichergestellt.

<sup>4</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 Treppenhäuser 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>5</sup> Um die Zuluft auf das gewünschte Temperaturniveau anzuheben, verfügen die Lüftungszentralen ausserdem über Lufterhitzer. Die Zuluft wird dabei mit Pumpwarmwasser erwärmt, welches durch das Heizsystem erzeugt wurde. Dies geschieht sowohl im Abtau- wie auch Normalbetrieb. Der thermisch wirksame Aussenluftvolumenstrom beträgt  $0.36 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Die Bewohner können die Betriebsstufe der Lüftung nicht selber einstellen, sprich sie können den Volumenstrom nicht regulieren. Im Gegensatz zu den BGH-Wohnungen verfügen die GBMZ-Wohnungen über Dreh-Fenster, sprich die Fenster sind nicht kippbar. Auf diese Weise wird das Dauerlüften unterbunden. In Abbildung 4 ist der Grundriss einer GBMZ-Wohnung abgebildet. Die Zuluftrohre sind jeweils rot und die Abluftrohre gelb eingefärbt.

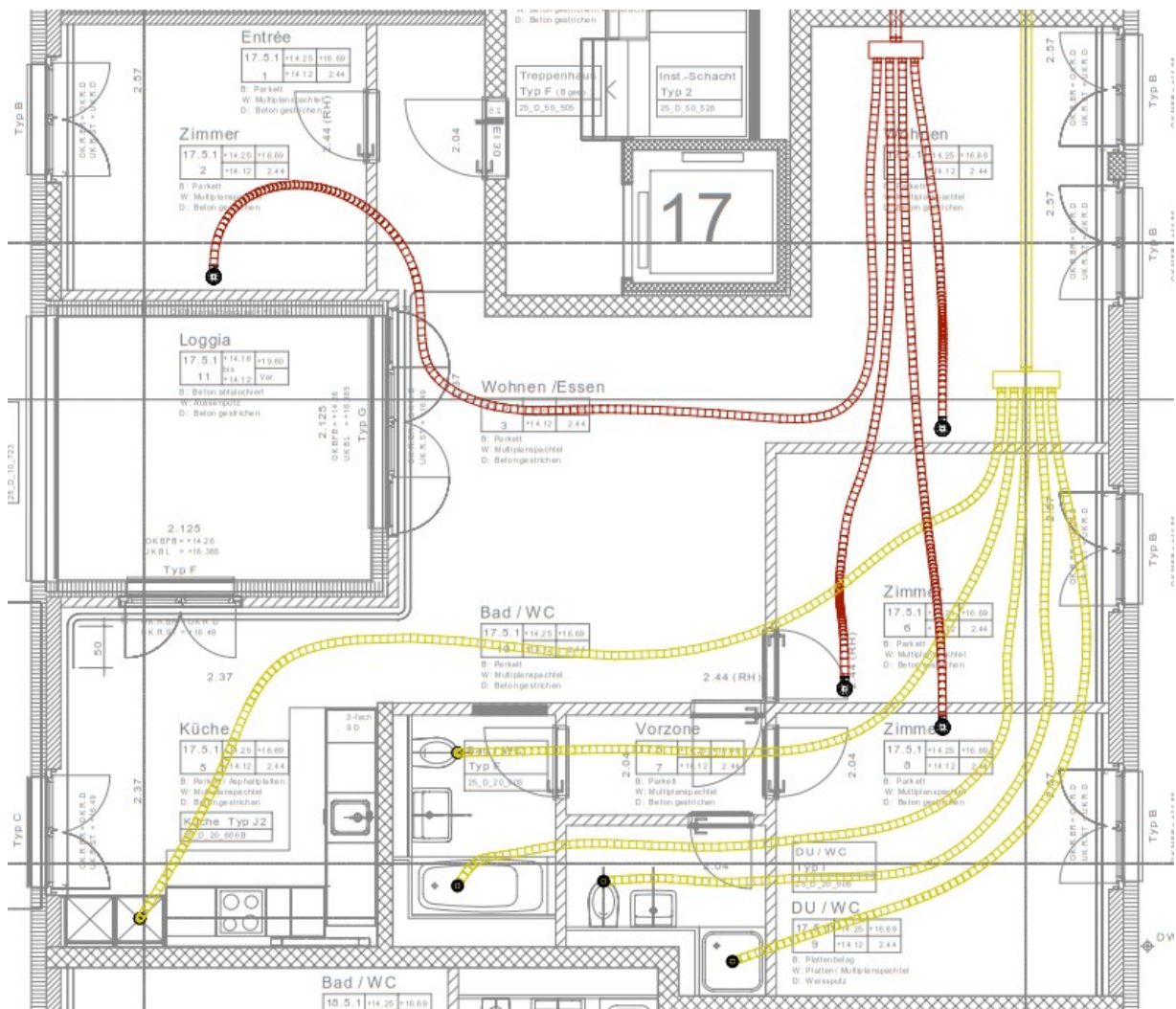
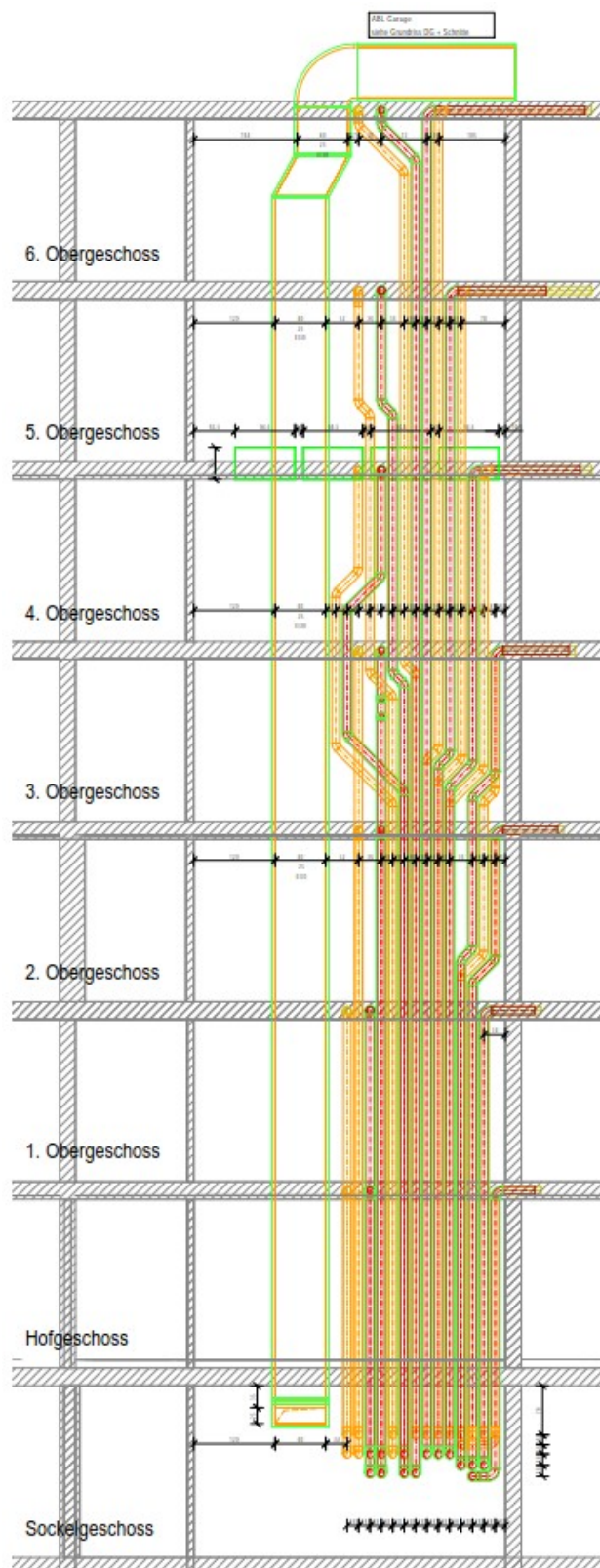


Abbildung 4: Lüftungsplan einer GBMZ-Wohnung (Todt Gmür und Partner AG 2011)

<sup>5</sup> Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung gemäss Minergie-Nachweis des GBMZ-Gebäudeteils

Das Strangschema der zentralen Lüftungsanlage in Treppenhaus 11 ist in Abbildung 5 gezeigt. Die Zuluft ist wiederum rot und die Abluft orange gekennzeichnet.



**Abbildung 5: Strangschema von Treppenhaus 11 im GBMZ-Gebäudeteil (Todt Gmür und Partner AG 2011)**

Die vertikale Luftverteilung in den Steigzonen erfolgt über Lüftungsrohre aus verzinktem Stahlblech. Die horizontale Luftverteilung erfolgt grösstenteils über Lüftungsrohre aus Polyethylen, welche in den Betondecken eingelegt sind. Die verwendeten Komponenten entsprechen dem Stand der Technik. Inwiefern die Luftverteilung optimiert hätte gestaltet werden können, wird in dieser Studie nicht näher untersucht.

In Abbildung 6 ist das Prinzipschema des Monoblocks von Treppenhaus 11 dargestellt. Die Zuluft wird über Luftherhitzer mit Pumpwarmwasser (PWW) auf die gewünschte Zulufttemperatur (Sollwert = 21 °C) erwärmt. Der Vereisungsschutz wird mittels Abtauschaltung (Bypass und Nachheizung) gelöst, wobei die Aktivierung über einen Druckdifferenzsensor erfolgt. Überschreitet der abluftseitige Druckverlust über den Wärmeübertrager den Grenzwert, wird der Aussenluft-Bypass geöffnet. Die Aussenluft wird während der Abtauzeit über ein Luftherhitzer auf den Sollwert der Zulufttemperatur erwärmt. Der Zuluft- und Abluft-Volumenstrom wird während dem Abtaubetrieb nicht reduziert. Da die Wärmerückgewinnung währenddessen nicht in Betrieb ist, erhöht sich der Energieverbrauch (Heizwärme) im Abtaubetrieb.

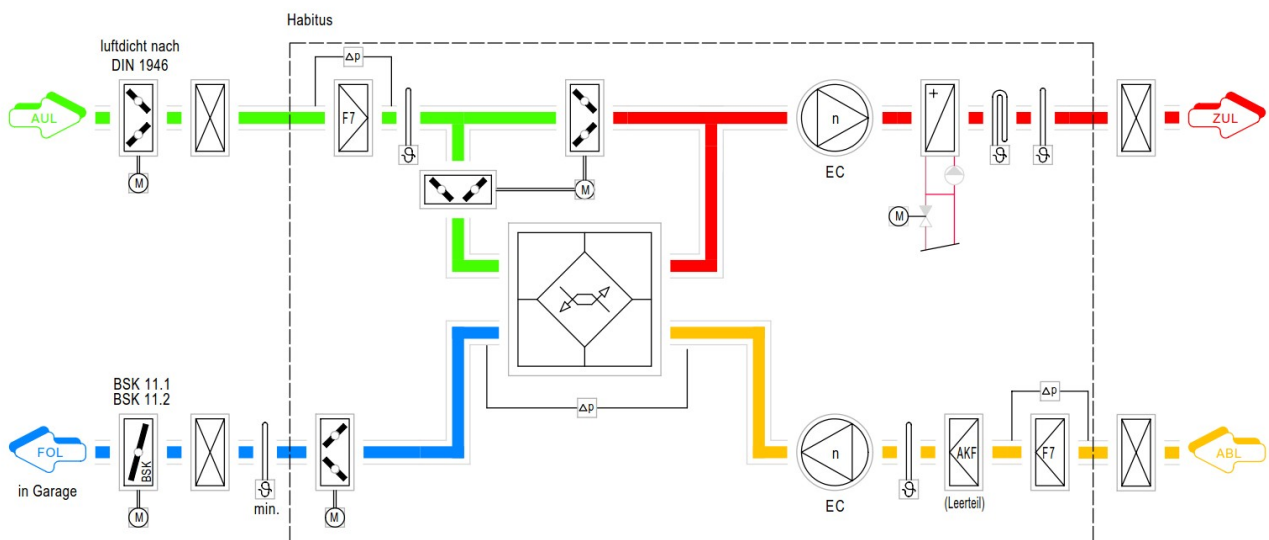


Abbildung 6: Prinzipschema des Monoblocks von Treppenhaus 11 (Todt Gmür und Partner AG)

Die Monoblocks in den restlichen neun Treppenhäuser des GBMZ-Gebäudeteils entsprechen ebenfalls dem gezeigten Prinzipschema, wobei sich die Leistungen der Ventilatoren und Luftherhitzern leicht unterscheiden.

Tabelle 2 zeigt die Kennwerte der Monoblocks der zehn Treppenhäuser im GBMZ-Gebäudeteil. Pro Treppenhaus ist jeweils ein Monoblock mit zwei identischen Ventilatoren (für Zu- und Abluft) verbaut. Der Sollwert entspricht dem maximalen Volumenstrom, gemäss welchem die Komponenten dimensioniert wurden.

**Tabelle 2: Monoblocks des GBMZ-Gebäudeteils (Todt Gmür und Partner AG)**

Treppenhaus	Zu-/Abluftventilator		Lufterhitzer
	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	Leistungsbedarf <sup>6</sup> bei Sollwert [kW]	Heizleistung [kW]
TH 11	Effektiv: 1'825 (Sollwert: 2'200)	2 x 0.5	13.5
TH 12	1'825 (2'200)	2 x 0.5	13.5
TH 13	2'520 (3'000)	2 x 0.7	17.9
TH 14	2'435 (2'900)	2 x 0.7	17.4
TH 15	1'960 (2'350)	2 x 0.5	14.1
TH 16	2'410 (2'900)	2 x 0.7	17.4
TH 17	1'890 (2'300)	2 x 0.5	13.8
TH 18	2'200 (2'650)	2 x 0.6	15.9
TH 19	1'615 (1'950)	2 x 0.5	12.0
TH 20	2'400 (2'900)	2 x 0.7	17.4
<b>Total</b>	<b>21'080 (25'350)</b>	<b>11.8</b>	<b>152.9</b>

6 Leistungsbedarf des Ventilators und nicht des Antriebsmotors (Wirkungsgrad des Ventilators noch nicht berücksichtigt)

## 2 Methodik

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>7</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 7 ist die Grundstruktur der Methode mit den verschiedenen Schritten, inkl. der Gewichtung mittels Ökofaktoren, zu sehen.

<sup>7</sup> 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.



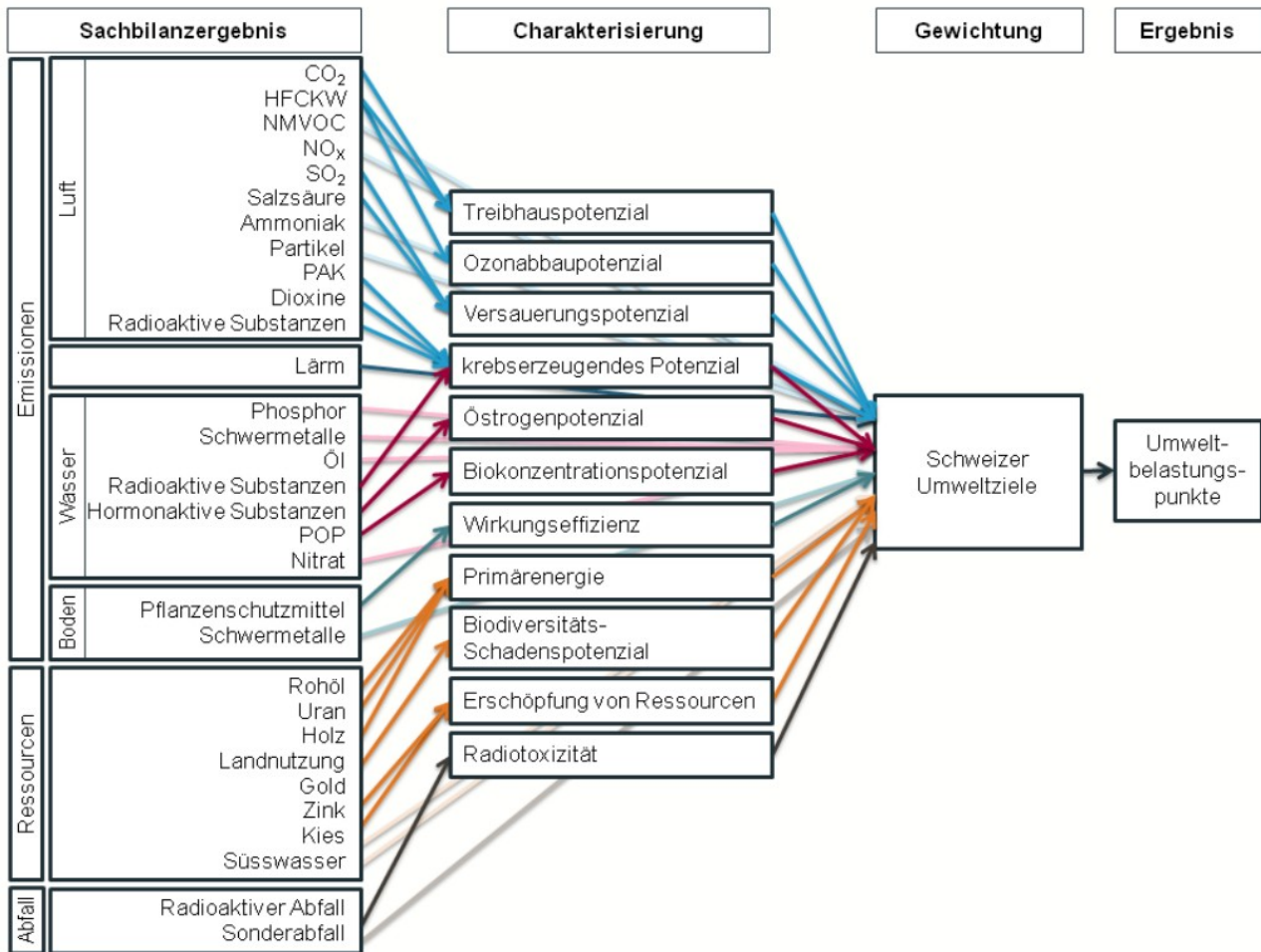


Abbildung 7: Struktur der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht R., Büsser Knöpfel S. 2013)

## 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. In der vorliegenden Studie wird ein Zinssatz von 1.5 % verwendet. 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 C.

## 2.3. Funktionelle Einheit

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

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

### 3 Sachbilanzdaten und Modellierungsannahmen

Bei der LCA und LCC werden die Umweltauswirkungen bzw. Kosten auf fünf verschiedene Verursacher verteilt. Nachfolgend werden diese fünf Kategorien sowie ihre Systemgrenzen, die verwendete Datengrundlage und die getroffenen Annahmen erläutert. Grundsätzlich werden die Systemgrenzen so gewählt, dass Komponenten oder Prozesse ausgeschlossen werden, die bei den beiden zu vergleichenden Lüftungssystemen identisch und daher nicht vergleichsrelevant sind. Die ökologischen Sachbilanzen (LCI), sprich die detaillierten Zusammenstellungen aller Material- und Energieverbräuche der betrachteten Lüftungssysteme über ihren gesamten Lebensweg, sind im Anhang F aufgeführt.

#### 3.1. Komponenten

Diese Kategorie umfasst sämtliche Bestandteile der jeweiligen Lüftungssysteme, wobei nur die Lüftungssysteme der 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 berücksichtigt.

Konkret werden im BGH-Gebäudeteil die folgenden Lüftungskomponenten berücksichtigt:

- Abluft Nasszellen (BKP 244.1)<sup>8</sup>
- Abluft Küchen<sup>9</sup> (BKP 244.2)
- Fiktive Nachströmelemente (nur im idealen Szenario; siehe Kapitel 5.2)

Im GBMZ-Gebäudeteil werden die folgenden Lüftungskomponenten berücksichtigt:

- Lufterhitzeranschlüsse<sup>10</sup> für KWL (BKP 242.9)
- Aussenluftfassungen der zentralen Lüftungsanlagen (BKP 244.10)
- Zentrale Lüftungsanlagen für KWL (BKP 244.11-20)

Bei der LCA und LCC werden die Umweltauswirkungen und Kosten, welche durch die Herstellung, die Installation, den Ersatz (nach Ablauf der individuellen Lebensdauer einer Komponente) und die Entsorgung (inkl. Demontage) der einzelnen Lüftungskomponenten verursacht werden, berücksichtigt. Die Lebensdauern der einzelnen Komponenten wurden aus der Norm SIA 382/1 übernommen.<sup>11</sup> Dabei wurde jeweils eine mittlere Beanspruchung der Komponenten angenommen. Da die Norm eher konservative Lebensdauern enthält, sprich die Lebensdauern eher unterschätzt, wird zudem in Kapitel 5.3 eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Lebensdauern der Komponenten durchgeführt.

In der ökologischen Bewertung (LCA) werden alle durch die Lüftungskomponenten verursachten Materialverbräuche berücksichtigt. Als Datengrundlage dienen die Materialspezifikationen in den Submissionseingaben der ausführenden Unternehmer. Die Submissionseingaben sind in den Werkverträgen, welche von der BGH und GBMZ zur Verfügung gestellt wurden, enthalten. Da in den Materialspezifikationen jede einzelne verbaute Komponente genau beschrieben wird, können die Materialverbräuche sehr genau ermit-

<sup>8</sup> BKP-Nummer des Werkvertrages

<sup>9</sup> Die Dunstabzugshauben werden nicht berücksichtigt, sondern nur die Rohre und Dachhauben. Denn die Abluft-Dunstabzugshauben im BGH-Gebäudeteil unterscheiden sich gemäss Hersteller praktisch nicht von den Umluft-Dunstabzugshauben im GBMZ-Gebäudeteil bezüglich Materialaufwand, Investitionskosten und Energieverbrauch, und sind somit vergleichsneutral.

<sup>10</sup> Es werden nur die (gegenüber dem BGH-Gebäudeteil) 10 zusätzlichen Lufterhitzeranschlüsse für die zentralen Lüftungsanlagen der Wohnungen betrachtet

<sup>11</sup> SIA 382/1: Lüftungs- und Klimaanlageanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen

telt werden. Falls die genaue Materialspezifikation einer Komponente in den Submissionseingaben nicht verfügbar ist, werden die benötigten Informationen über die Datenblätter oder direkt über den Hersteller mittels telefonischer Auskunft erhoben. Die genauen Materialauszüge werden in den Sachbilanzen im Anhang F dieser Studie aufgeführt.

In der finanziellen Bewertung (LCC) werden die Investitionskosten aller betrachteten Lüftungskomponenten berücksichtigt. Als Datengrundlage dienen die Schlussabrechnungen für die Lüftungs- und Heizungsanlagen (BKP 244 und 240). Damit werden die tatsächlich angefallenen Kosten und keine Schätzungen verwendet. Inwiefern die Investitionskosten für die Lüftungskomponenten über oder unter dem Schweizerischen Durchschnitt liegen, wird in dieser Studie nicht untersucht.

### 3.2. Rohbau: Mehrverbrauch Stahlbeton

Diese Kategorie umfasst den aufgrund der dickeren Decken im GBMZ-Gebäudeteil (gegenüber dem BGH-Gebäudeteil) zusätzlich verbauten Beton und Betonstahl. Die Bodenaufbauten der beiden Gebäudeteile sind in Tabelle 3 beschrieben und in Abbildung 8 sowie Abbildung 9 dargestellt.<sup>12</sup>

Tabelle 3: Bodenaufbauten der beiden Gebäudeteile

Schicht	BGH-Gebäudeteil	GBMZ-Gebäudeteil
Bodenbelag	1 cm	1 cm
Zementunterlagsboden	8 cm	8 cm
PE-Folie	–	–
Trittschalldämmplatte	2 cm	2 cm
Polystyrolplatte	2 cm	2 cm
Beton	24 cm	28 cm
Verputz (BGH), Decke gestrichen (GBMZ)	–	–
<b>Total</b>	<b>37 cm</b>	<b>41 cm</b>

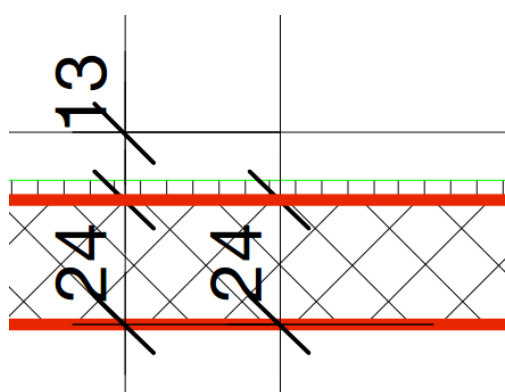


Abbildung 8: Bodenaufbau BGH-Gebäudeteil

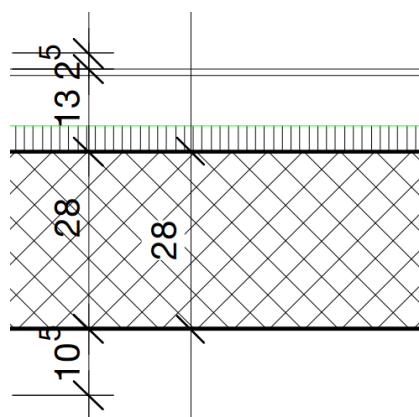


Abbildung 9: Bodenaufbau GBMZ-Gebäudeteil

Die Decken in den GBMZ-Wohnungen sind aufgrund der horizontalen Luftverteilung mittels Lüftungsrohren aus Polyethylen rund 4 cm dicker als die Decken in den BGH-Wohnungen. Der deswegen zusätzlich anfall-

<sup>12</sup> Gemäss Ausführungspläne der Kaschka Knapkiewicz und Axel Fickert AG

lende Stahlbeton (Beton und Betonstahl) wird 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>13</sup>.

Die Menge an zusätzlich verbautem Stahlbeton lässt sich über die folgenden beiden Methoden bestimmen:

- **Materialspezifikation in Submissionseingaben:** Die Werkverträge für die Beton- und Stahlbetonarbeiten (BKP 211.5) enthalten die Submissionseingaben der Unternehmer mit genauen Materialauszügen. Werden die Submissionseingaben der beiden Gebäudeteile verglichen, resultiert ein Mehrverbrauch von **1'258 m<sup>3</sup> Beton** und **211 Tonnen Betonstahl** des GBMZ-Gebäudeteils (gegenüber dem BGH-Gebäudeteil).<sup>14</sup>
- **Berechnung mittels EBF:** Wird angenommen, dass die Fläche der Decken mit erhöhter Deckendicke im GBMZ-Gebäudeteil der EBF entspricht, entspricht die zusätzlich verbaute Betonkubatur dem Produkt der erhöhten Deckendicke und der EBF. Auf diese Weise resultiert ein Mehrverbrauch von **780 m<sup>3</sup> Beton** und **78 Tonnen Betonstahl**.<sup>15</sup>

Je nach Methode fällt der ermittelte Mehrverbrauch an Stahlbeton unterschiedlich hoch aus. Die Gründe, wieso der Mehrverbrauch nach Submissionseingabe deutlich über dem theoretisch berechneten Mehrverbrauch liegt, können nicht genau eruiert werden. Einerseits verfügt der GBMZ-Gebäudeteil über mehr UG-Räumlichkeiten im Vergleich zum BGH-Gebäudeteil, womit ein Teil des Mehrverbrauchs nicht direkt auf die aufgrund der Lüftungsrohre dickeren Decken zurückführen lässt. Andererseits führen die zehn zentralen Lüftungsanlagen (der KWL in den GBMZ-Treppenhäusern) zu einem höheren Platzbedarf im UG, womit ein Teil der Differenz zwischen Abschätzung und Wert gemäss Submissionseingaben wieder auf das Lüftungssystem zurückzuführen ist. In der vorliegenden Studie wird der konservativere Wert gewählt, sprich es wird ein Mehrverbrauch von 780 m<sup>3</sup> Beton und 78 Tonnen Betonstahl angenommen. So wird sichergestellt, dass der tatsächlich aufgrund des zentralen Lüftungssystems resultierende Mehrverbrauch nicht überschätzt, sondern eher unterschätzt wird.

Zudem ist zu erwähnen, dass die Mengen an Stahlbeton, die zusätzlich verbaut wurden, für den konkreten Bau «Siedlung Klee» ermittelt wurden. Es ist durchaus möglich, dass der Mehrverbrauch im Durchschnitt deutlich geringer oder höher ausfällt. Auch aus diesem Grund werden die Umweltauswirkungen und Kosten des zusätzlich verbauten Stahlbetons separat ausgewiesen.

Für die finanzielle Bewertung werden die durchschnittlichen Mengenpreise aus den Submissionseingaben verwendet. Pro Kubikmeter Beton wurde demnach CHF 142 (exkl. MwSt.) und für ein Kilogramm Betonstahl durchschnittlich CHF 1.9 (exkl. MwSt.) bezahlt.

### 3.3. Betrieb: Stromverbrauch

Diese Kategorie umfasst den Verbrauch an Allgemiestrom der beiden Gebäudeteile, wobei anfänglich die totalen Verbräuche ausgewertet werden, für die Lebenszyklusbetrachtungen dann jedoch nur noch die Mehrverbräuche berücksichtigt werden.<sup>16</sup> Nicht im Allgemiestrom inbegriffen ist der Haushaltsstrom, sprich der Strom, welcher von bzw. in den einzelnen Wohnungen verbraucht wird, wie beispielsweise die Stromverbräuche der Waschmaschinen und Trockner.<sup>17</sup> Im BGH-Gebäudeteil befinden sich die Wascha-

13 SIA 480: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau

14 Die unterschiedlichen EBFs der beiden Gebäudeteile sind in diesen Werten berücksichtigt

15 Gemäss den Materialspezifikationen in den Submissionseingaben wurde in der Siedlung Klee pro Kubikmeter Beton durchschnittlich 100 kg Betonstahl verbaut. Das (geringe) Volumen des Betonstahls wird vernachlässigt.

16 Mit „Strom“ ist elektrische Energie gemeint

17 Im BGH-Gebäudeteil sind die Waschmaschinen und Trockner jeweils direkt in den Wohnungen, wohingegen der

schinen und Trockner jeweils direkt in den Wohnungen, wohingegen der GBMZ-Gebäudeteil über gemeinsame Waschsaloons verfügt (deren Stromverbräuche jedoch ebenfalls nicht im Allgmeinstrom enthalten sind). Der Verbrauch an Allgmeinstrom wird berücksichtigt, da er unter anderem den Stromverbrauch des jeweiligen Lüftungssystems der Wohnungen enthält (neben dem Stromverbrauch für die Beleuchtung der allgemein zugänglichen Flächen, etc.) und keine Einzelmessungen der Lüftungsstromverbräuche zur Verfügung stehen.

Nachdem in einer Energiebilanz die totalen Allgmeinstromverbräuche der beiden Gebäudeteile gegenübergestellt werden, wird für die LCA und LCC jeweils nur noch der Mehrverbrauch des GBMZ-Gebäudeteils berücksichtigt, da angenommen wird, dass der Mehrverbrauch an Allgmeinstrom auf die unterschiedlichen Wohnungslüftungssysteme zurückzuführen ist (da die beiden Gebäudeteile ansonsten über die gleichen Stromverbraucher verfügen). Da der Allgmeinstrom 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 wird in Kapitel 4.1 ihr Strombedarf berücksichtigt und zum gemessenen BGH-Allgmeinstromverbrauch hinzuaddiert.

Als Datengrundlage für die Allgmeinstromverbräuche der beiden Gebäudeteile dienen die Abrechnungen des zuständigen Elektrizitätswerkes<sup>18</sup> über die Zeitperiode vom 04.09.2013 bis 01.09.2016. Allerdings beziehen der BGH- und der GBMZ-Gebäudeteil 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<sup>19</sup> von 20.08 Rp./kWh sowie der von der BGH bezogene Strommix *ewz.basis*<sup>20</sup> verwendet.

### 3.4. 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. Heizwärme wird hauptsächlich in den Wohnungen (über die Fussbodenheizung und im GBMZ-Gebäudeteil auch über die Lufterhitzer der KWL) – jedoch auch in den Quartier- und Nebenräumen verbraucht.

Für die LCA und LCC wird jeweils nur der Mehrverbrauch des BGH-Gebäudeteils berücksichtigt, da angenommen wird, dass der Mehrverbrauch an Heizwärme auf die unterschiedlichen Wohnungslüftungssysteme zurückzuführen ist (da sich die beiden Gebäudeteile hauptsächlich bezüglich Lüftungswärmeverlusten unterscheiden).

---

GBMZ-Gebäudeteil über gemeinsame Waschsaloons verfügt (deren Stromverbräuche jedoch ebenfalls nicht im Allgmeinstrom enthalten sind)

18 ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich)

19 Gemäss Abrechnungen der ewz (Elektrizitätswerke der Stadt Zürich) über die Zeitperiode vom 04.09.2013 bis 01.09.2016

20 Beim bezogenen Strommix stammt die elektrische Energie grösstenteils aus Wasserkraft (verwendeter ecoinvent Prozess: Market for Electricity, Low Voltage, Label-Certified, CH)

Als Datengrundlage dienen die Heizkostenabrechnungen der *ista swiss ag* über die Zeitperiode vom 01.07.2013 bis 30.06.2016. 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. Für die Gasheizung wurde ein Jahresnutzungsgrad<sup>21</sup> von 95 % angenommen, um den gemessenen Heizwärmeverbrauch in einen Gasverbrauch umzurechnen. Dieser wurde dann mit dem über die betrachtete Zeitperiode durchschnittlichen Gaspreis<sup>22</sup> von 6.16 Rp./kWh multipliziert um die Heizkosten zu berechnen. Da nur der Mehrverbrauch, sprich die Differenz zwischen den beiden Heizwärmeverbräuchen berücksichtigt wird, können die beiden Leistungspreise, welche für beide Gebäudeteile gleich gross sind, vernachlässigt werden.

### 3.5. 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 in der Kategorie Unterhalt und Wartung dar, da der Ersatz der einzelnen Komponenten (z.B. Filter) schon in der Kategorie Komponenten berücksichtigt wird. Sowohl für die Bestimmung der Autokilometer der Wartungsfahrzeuge wie auch für die Bestimmung der Unterhalts- und Wartungskosten dienen die Serviceverträge zwischen den Baugenossenschaften und den Firmen, welche die periodischen Kontroll- und Wartungsarbeiten ausführen, als Datengrundlage.

In vereinzelt Wohnungen im BGH-Gebäudeteil sind mittlerweile Feuchteschäden aufgetreten. Dafür soll jedoch hauptsächlich falsches Nutzerverhalten verantwortlich sein.<sup>23</sup> Natürlich begünstigt die luftdichte Gebäudehülle (da ursprünglich auch in den BGH-Wohnungen eine KWL geplant war) in Kombination mit fehlenden Nachströmelementen solche Feuchteschäden – allerdings ist dieser Zustand auch nicht normkonform. Es wird davon ausgegangen, dass bei normkonformer Umsetzung des Lüftungskonzeptes «Fensterlüftung», sprich bei einer weniger dichten Gebäudehülle oder einer dichten Gebäudehülle in Kombination mit Nachströmelementen (wie im idealen Szenario in Kapitel 5.2 angenommen), solche Feuchteschäden nicht aufgetreten wären. Deshalb wird auf die Berücksichtigung solcher Schäden verzichtet.

---

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

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

23 Gemäss Leiter technische Liegenschaftenbewirtschaftung BGH

## 4 Ergebnisse und Diskussion der Bilanzierungen

### 4.1. Energiebilanzen

Die absoluten Allgemeinstrom- und Heizwärmeverbräuche des BGH- und GBMZ-Gebäudeteils sind in Tabelle 4 dargestellt. Dabei handelt es sich jeweils um den Durchschnittswert über den Zeitraum Mitte 2013 bis Mitte 2016.

Tabelle 4: Absolute Allgemeinstrom- und Heizwärmeverbräuche

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

Da der Allgemeinstrom 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.<sup>24</sup> 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 Allgemeinstromverbrauch hinzuaddiert werden. Da der Stromverbrauch der Abluft-Ventilatoren jedoch nicht separat gemessen wird, muss ihr Strombedarf theoretisch berechnet werden<sup>25</sup>. Wird ihr Strombedarf dann zum gemessenen Allgemeinstromverbrauch hinzuaddiert, ergibt sich ein korrigierter Stromverbrauch, welcher ebenfalls in Tabelle 4 aufgeführt ist.

24 Zudem wird davon ausgegangen, dass das Nutzerverhalten bezüglich Abluft-Dunstabzugshauben bzw. Umluft-Dunstabzugshauben in beiden Gebäudeteilen gleich ist.

25 Die detaillierte Berechnung des Strombedarfs der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen ist im Anhang D zu finden.

Die allgemeinen Stromverbräuche pro Quadratmeter EBF sind in Abbildung 10 und die Heizwärmeverbräuche pro Quadratmeter EBF in Abbildung 11 dargestellt. Bei den Stromverbräuchen handelt es sich bereits um die korrigierten Werte, d.h. der Stromverbrauch der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen ist enthalten.

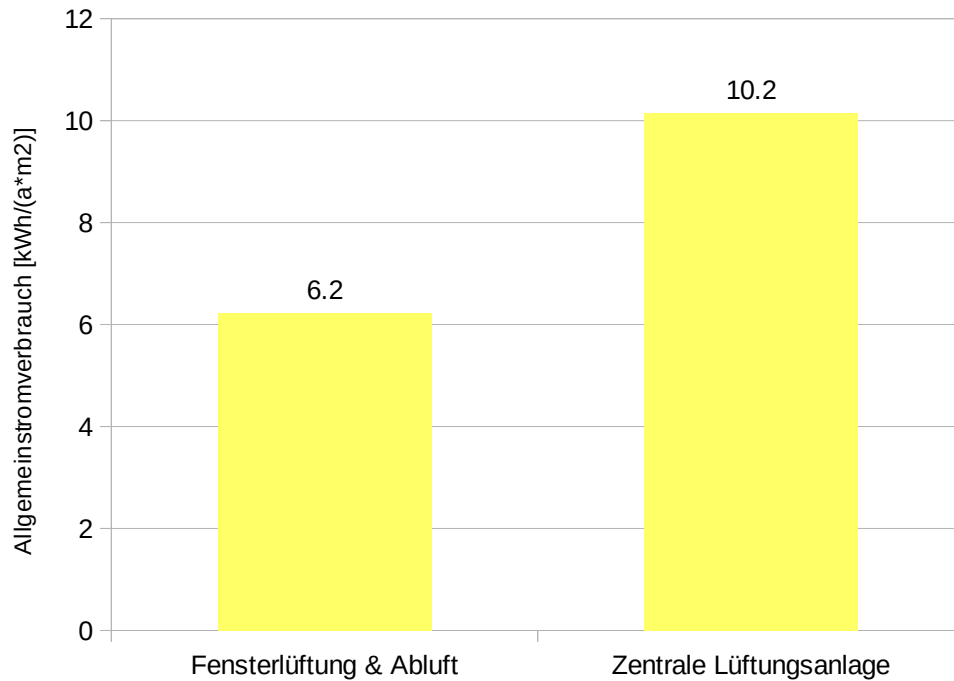


Abbildung 10: Allgemeinstromverbrauch der beiden Gebäudeteile

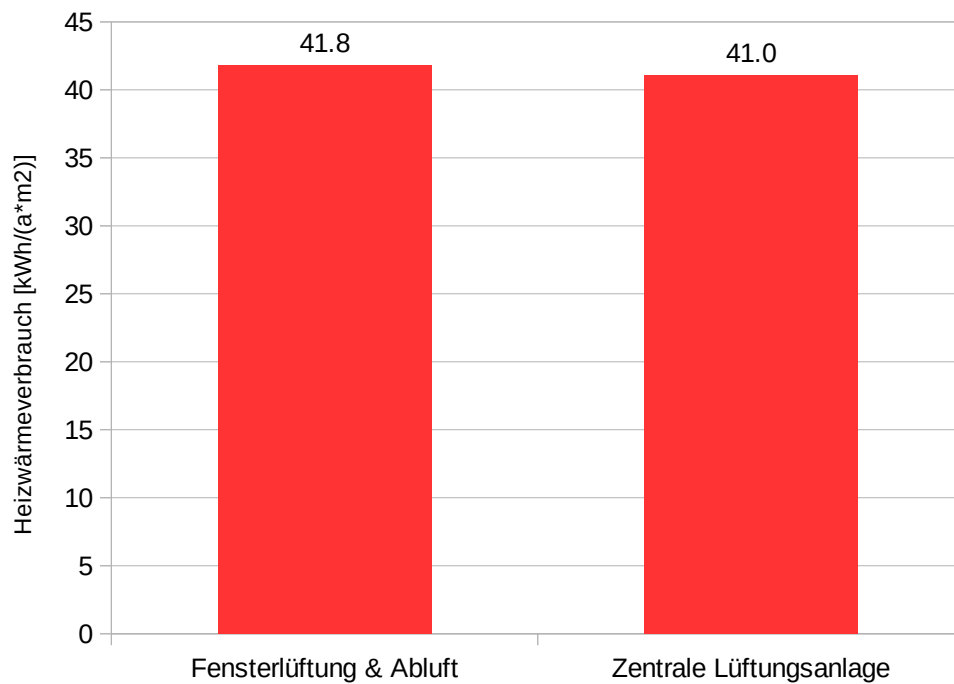


Abbildung 11: Heizwärmeverbräuche der beiden Gebäudeteile



Der GBMZ-Gebäudeteil weist einen um **3.93 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>)** oder 63 % 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 (bzw. der zugehörigen Antriebsmotoren) der zehn zentralen Lüftungsanlagen berechnet. Der mittlere Leistungsbedarf (der Ventilatoren), effektivem Volumenstrom, Wirkungsgrad und jährlichen Betriebsstunden berechnete Strombedarf der (Antriebsmotoren der) Ventilatoren beläuft sich auf 88'700 kWh/a (ausführliche Berechnung im Anhang E). Der gemessene Mehrverbrauch des GBMZ-Gebäudeteils beträgt 85'000 kWh/a und stimmt somit gut mit dem berechneten Wert überein. Aufgrund dieser geringen Abweichung ist davon auszugehen, dass die zentralen Lüftungsanlagen der zehn Treppenhäuser im GBMZ-Gebäudeteil für den höheren Stromverbrauch verantwortlich sind. Der SIA 382/1 Grenzwert für Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung und dem effektiv im GBMZ-Gebäudeteil eingestellten Luftvolumenstrom (siehe Kapitel 1.4.2, Tabelle 2) beträgt 64'630 kWh/a, sprich der maximale Mehrverbrauch (unter Berücksichtigung der Abluft-Ventilatoren im BGH-Gebäudeteil) dürfte höchstens 60'450 kWh/a oder – mit der in dieser Studie verwendeten EBF – **3.10 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>)** betragen.<sup>26</sup> Somit konnte im Zeitraum von Mitte 2013 bis Mitte 2016 der SIA-Grenzwert nicht eingehalten werden.

In den nachfolgenden LCAs und LCCs wird nur noch der Mehrverbrauch an Allgemeinstrom des GBMZ-Gebäudeteils von 3.93 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>) berücksichtigt, da angenommen werden kann, dass dieser auf die unterschiedlichen Lüftungssysteme zurückzuführen ist. In einem idealen Szenario wird zudem untersucht, wie die zentrale Lüftungsanlage abschneidet, wenn der SIA-Grenzwert eingehalten wird und somit ein Mehrverbrauch von lediglich 3.10 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>) entsteht (siehe Kapitel 5.2).

Beim Heizwärmeverbrauch schneidet der GBMZ-Gebäudeteil leicht besser ab. Sein Heizwärmeverbrauch ist um **0.77 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>)** oder 1.8 % tiefer als jener des BGH-Gebäudeteils. Allerdings sollte gemäss Minergie-Antrag des GBMZ-Gebäudeteils<sup>27</sup> eine Einsparung von 10.14 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>) möglich sein, da der thermisch wirksame Aussenluft-Volumenstrom durch die KWL von 0.7 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h) auf 0.36 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h) verringert wird.<sup>28</sup> Dies würde einer Einsparung von 24.3 % gegenüber dem BGH-Gebäudeteil entsprechen. 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), eine nicht optimal funktionierende WRG oder ein häufiger Betrieb der Abtauschaltung (WRG wird mit Bypass umgangen) sein. Die tatsächliche Ursache des erhöhten Heizwärmeverbrauches im GBMZ-Gebäudeteil wird in dieser Studie jedoch nicht genauer untersucht. Stattdessen wird in einem idealen Szenario untersucht, wie die zentrale Lüftungsanlage unter optimalen Bedingungen abschneiden würde, sprich wenn die maximal mögliche Einsparung an Heizwärme von 10.14 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>) gegenüber dem BGH-Gebäudeteil erreicht wird (siehe Kapitel 5.2).

26 SIA 382/1 Grenzwert für Lüftungsanlagen mit Lufterwärmung = 0.35 W/(m<sup>3</sup>/h)

27 Systemnachweis SIA 380/1:2007 mit Objekt-Nr. 782

28 Unter der Annahme, dass der GBMZ-Gebäudeteil ohne KWL (sprich mit einem thermisch wirksamen Aussenluft-Volumenstrom von 0.7 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h)) den gleichen Heizwärmeverbrauch wie der BGH-Gebäudeteil (41.8 kWh/(a\*m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>)) hätte

## 4.2. 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.

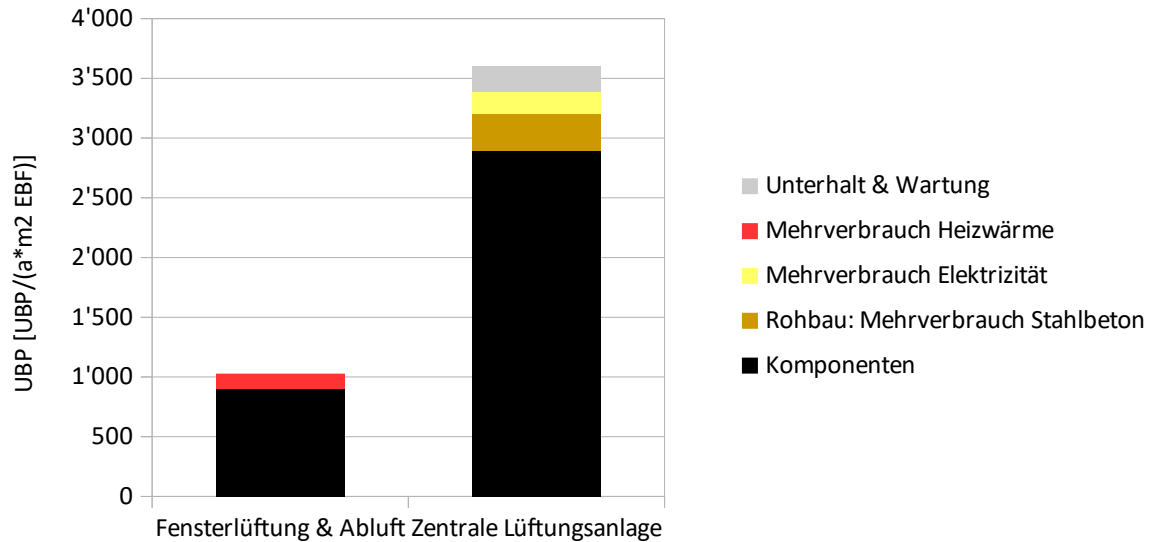


Abbildung 12: Umweltauswirkungen der Lüftungssysteme, ausgedrückt in UBP

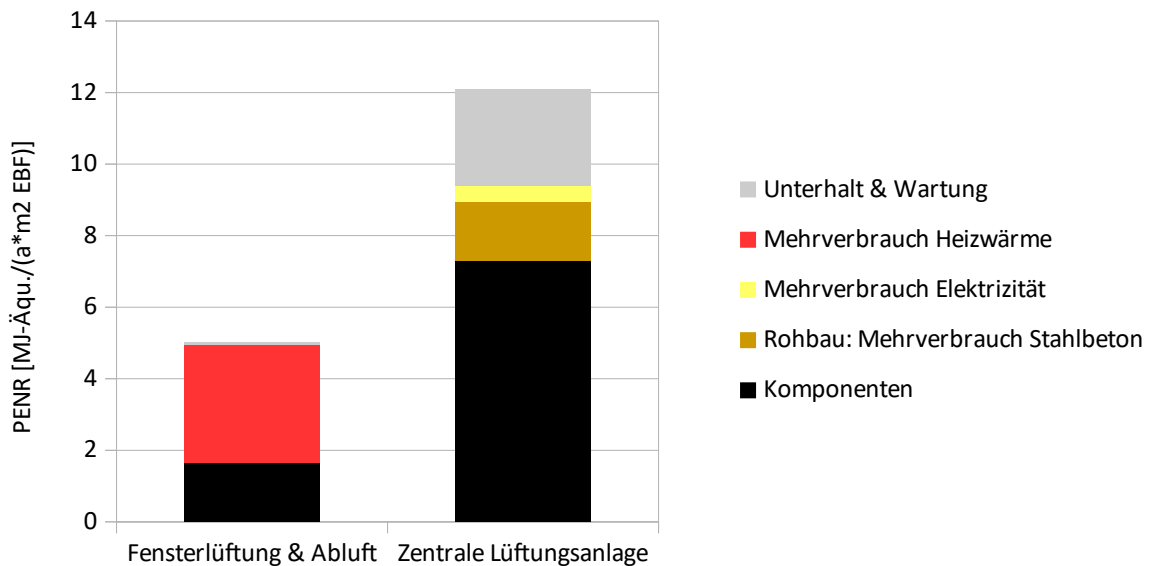
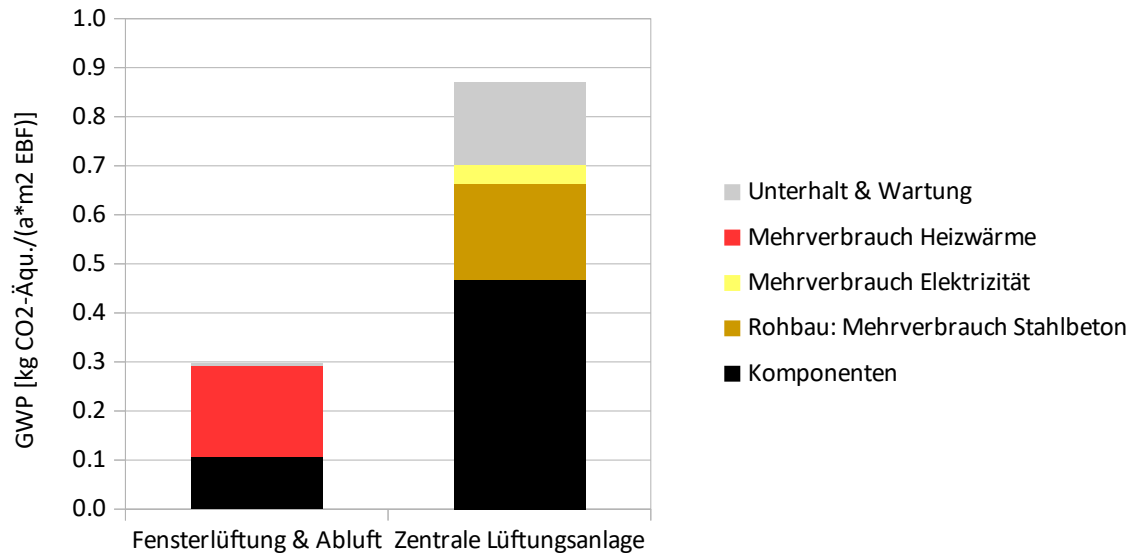


Abbildung 13: Umweltauswirkungen der Lüftungssysteme, ausgedrückt in PENR



**Abbildung 14: Umweltauswirkungen der Lüftungssysteme, 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 140 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 190 % 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 fast 250 % höher als diejenige der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft im BGH-Gebäudeteil.

Bei allen drei Indikatoren verursachen die Lüftungskomponenten der zentralen Lüftungsanlage die mit Abstand grösste Umweltbelastung. Die materialintensive zentrale Lüftungsanlage führt zu einer grauen Umweltbelastung, welche grösser ist als die Umweltbelastung der Fensterlüftung über den gesamten Lebenszyklus. Die hohen Umweltbelastungen zu Beginn können durch den leicht effizienteren Betrieb (bezüglich Heizwärmeverbrauch) nicht kompensiert werden.

### 4.3. Lebenszykluskostenrechnung

Die Annuitäten (Jahreskosten) der beiden betrachteten Lüftungssysteme sind in Abbildung 15 dargestellt.

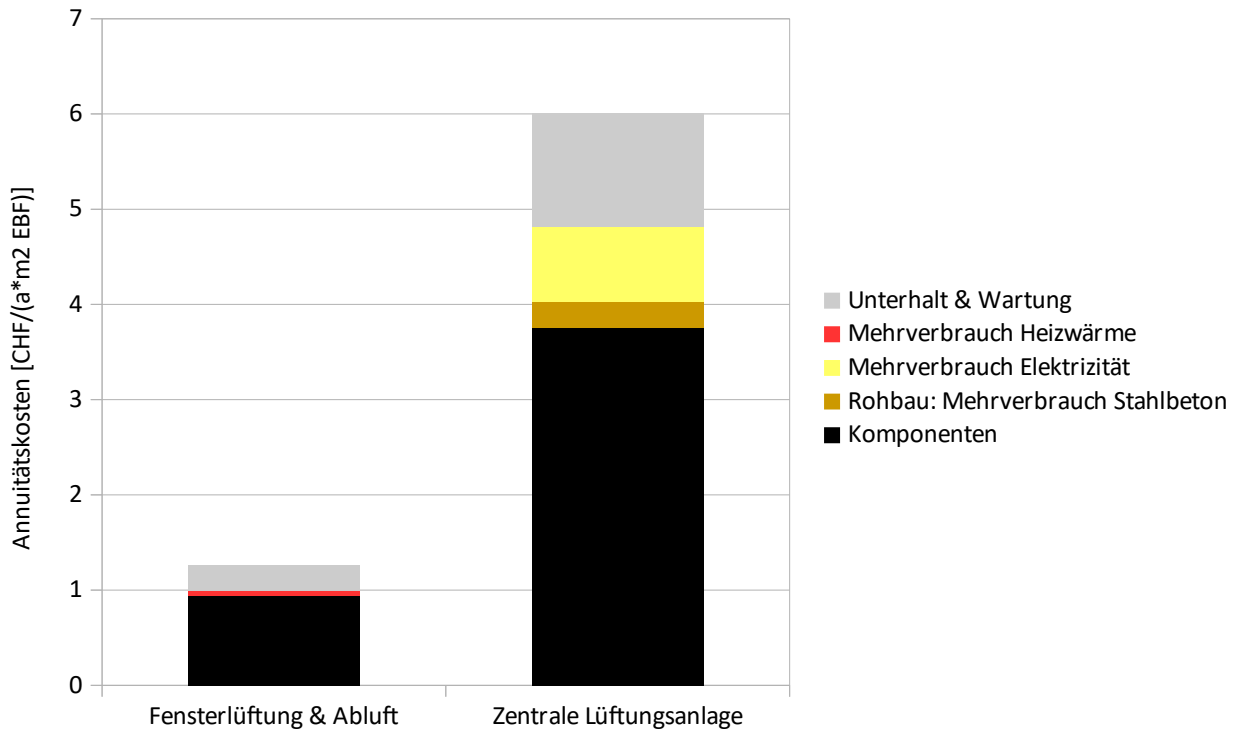


Abbildung 15: Annuitäten der beiden Lüftungssysteme

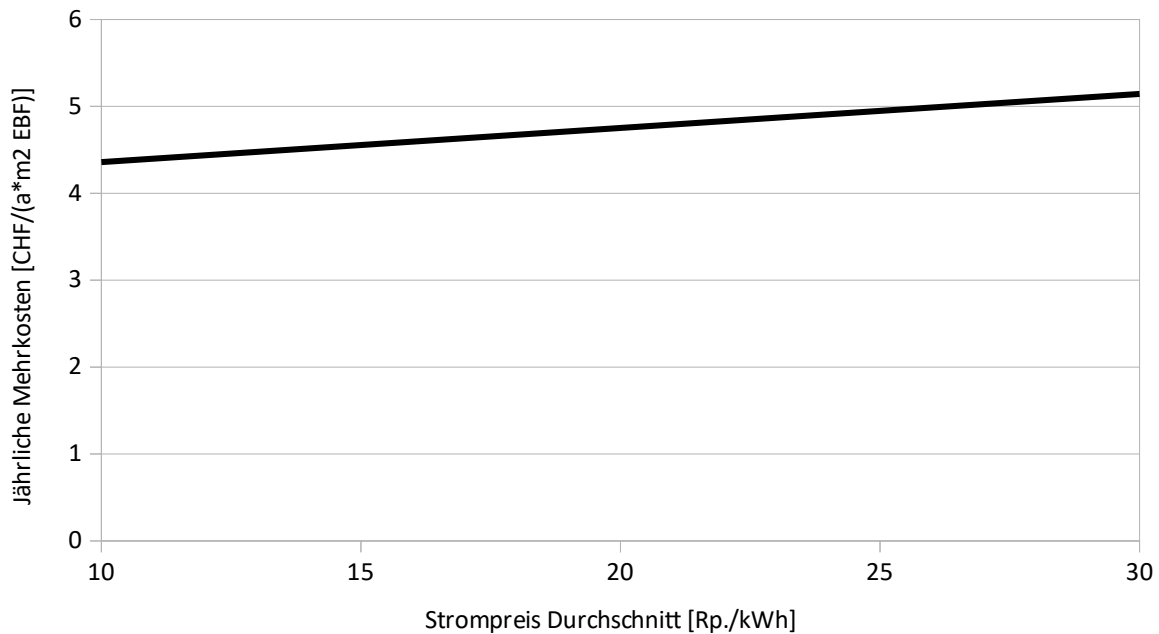
Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verursacht die zentrale Lüftungsanlage des GBMZ-Gebäudeteils 380 % höhere Annuitätskosten gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft im BGH-Gebäudeteil. Pro Quadratmeter EBF bedeutet dies jährlich Mehrkosten von fast CHF 5.00 für den GBMZ-Gebäudeteil. Der Hauptgrund dafür sind die hohen Investitionskosten der Komponenten der zentralen Lüftungsanlage, welche in Abbildung 15 im schwarzen Balkenabschnitt enthalten sind. Des Weiteren fallen beträchtliche Kosten für den erhöhten Stromverbrauch sowie Unterhalt und Wartung der zentralen Lüftungsanlage an, denn neben den jährlichen Kontroll- und Wartungsarbeiten (inkl. Ersatz der Monoblock-Filtern) wird durchschnittlich alle zehn Jahre eine umfassende und damit kostenintensive Lüftungsreinigung durchgeführt. 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 deutlich geringer ist.

## 5 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.

### 5.1. Einfluss der finanziellen Parameter

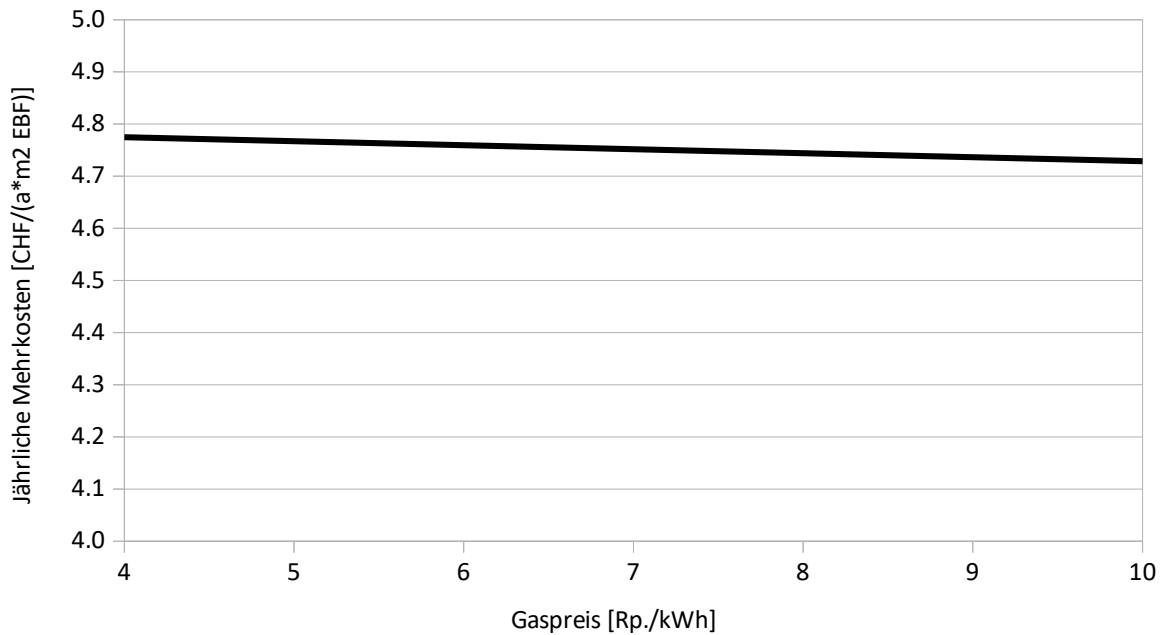
Der Einfluss des durchschnittlichen Strompreises auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage ist in Abbildung 16 ersichtlich.



**Abbildung 16: Einfluss des Strompreises auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage**  
(Verwendeter Wert für Analysen: 20.1 Rp./kWh)

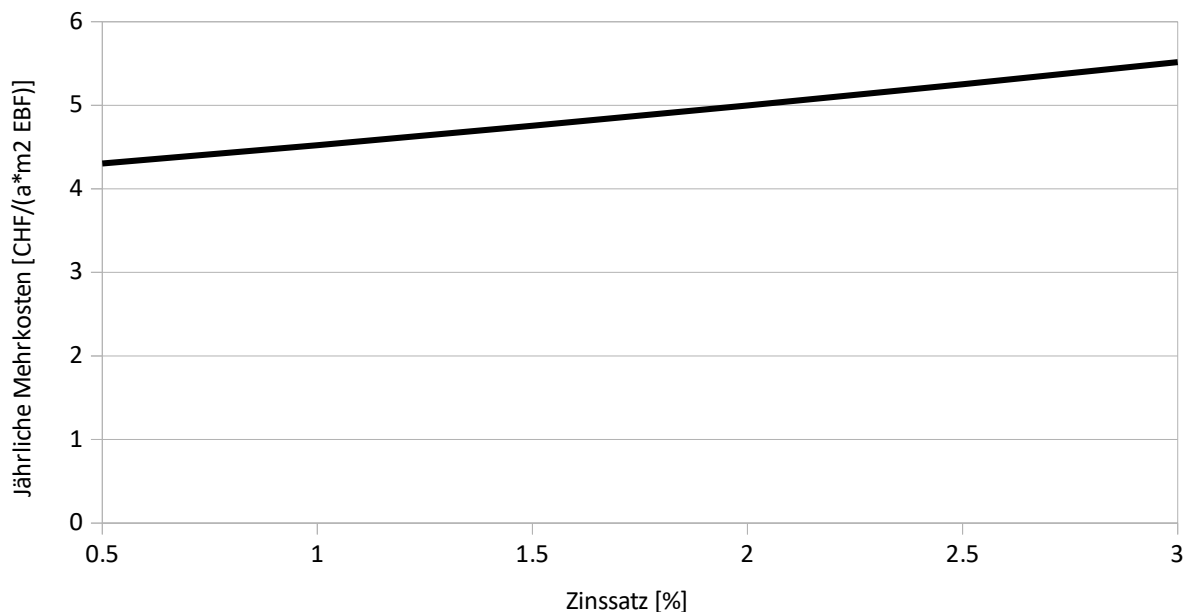
Die Differenz der beiden Annuitätskosten, sprich die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage, nehmen mit zunehmendem Strompreis zu. Grund dafür ist im Vergleich zur Fensterlüftung höhere Stromverbrauch.

Der Einfluss des Gaspreises auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage ist in Abbildung 17 ersichtlich. Die jährlichen Mehrkosten sinken mit zunehmendem Gaspreis kaum, da der Heizwärme- und somit auch Gasverbrauch im BGH-Gebäudeteil (Fensterlüftung mit Abluft) nur minimal höher ist als im GBMZ-Gebäudeteil (zentrale Lüftungsanlage mit WRG).



**Abbildung 17: Einfluss des Gaspreises auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage  
(Verwendeter Wert für Analysen: 6.1 Rp./kWh)**

Der Einfluss des Kapitalkostenzinssatzes auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage ist in Abbildung 18 ersichtlich.



**Abbildung 18: Einfluss des Zinssatzes auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage  
(Verwendeter Wert für Analysen: 1.5 %)**

Da die zentrale Lüftungsanlage deutlich investitionsintensiver ist als die Fensterlüftung, steigen die Mehrkosten mit zunehmendem Zinssatz stark an. Die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft verhält sich in Bezug auf Zinssatzschwankungen deutlich stabiler.

## 5.2. Ergebnisse bei idealem Nutzerverhalten und idealer Wärmerückgewinnung

Gemäss Minergie-Nachweis des GBMZ-Gebäudeteils sollte durch die WRG der zentralen Lüftungsanlage eine deutlich höhere Reduktion des Heizwärmeverbrauchs möglich sein ( $10.14 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$ ) statt der gemessenen  $0.77 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$ .<sup>29</sup> Wie bereits erwähnt, könnten ein falsches Nutzerverhalten, eine nicht optimal funktionierende WRG und/oder ein häufiger Abtaubetrieb Gründe sein, weshalb die theoretisch möglichen Einsparungen nicht erzielt werden. Um dennoch generell gültige Aussagen zu zentralen Lüftungsanlagen mit WRGs 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. Im idealen Szenario fällt der Heizwärmeverbrauch im GBMZ-Gebäudeteil daher um  $10.14 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  geringer aus als im BGH-Gebäudeteil. Dies entspricht einer Einsparung von 24.3 %.

Des weiteren wird angenommen, dass der Stromverbrauch der zentralen Lüftungsanlage dem SIA-Grenzwert entspricht. Somit wird in der nachfolgenden Betrachtung für die zentrale Lüftungsanlage ein Mehrverbrauch von lediglich  $3.10 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  – statt den gemessenen  $3.93 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  – verwendet.

Zusätzlich wird im idealen Szenario die fiktive Annahme getroffen, dass in den BGH-Wohnungen während der Bauphase<sup>30</sup> Nachströmelemente verbaut wurden (wie in Kapitel 1.4.1 beschrieben). Die Umweltauswirkungen bzw. Kosten dieser Nachströmelemente werden folglich im idealen Szenario berücksichtigt. Bei den betrachteten Nachströmelementen handelt es sich um passive Elemente, sprich es sind keine Ventilatoren integriert. Des weiteren wird angenommen, dass die Nachströmelemente in eine Rahmenverbreiterung über dem Fenster eingebaut wurden. Die Kosten wurden mittels Offerten eines Lüftungsplaners und Fensterbauers ermittelt und enthalten die Kosten für das Material, die Montage sowie die Aussparungen in den Rahmenverbreiterungen.

Die kalte Nachströmluft wird nicht berücksichtigt, da unklar ist, ob der Heizwärmeverbrauch ansteigen (da der thermisch wirksame Aussenluft-Volumenstrom theoretisch zunimmt) oder sinken würde (da beim Betrieb der Abluftventilatoren die Fenster nicht jedes Mal geöffnet werden müssten). Denn aufgrund der dichten Gebäudehülle ist zwar der thermisch wirksame Aussenluft-Volumenstrom zur Zeit (ohne Nachströmelemente) sehr tief, allerdings müssen die Fenster aufgrund von Unterdruck immer geöffnet werden sobald die Abluftventilatoren in den Nasszellen oder Küchen in Betrieb sind. Deshalb wird im idealen Szenario für den BGH-Gebäudeteil wiederum der gemessene Heizwärmeverbrauch verwendet.

29 Die  $10.14 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}})$  entsprechen der im Minergie-Nachweis aufgeführten Differenz zwischen dem Heizwärmebedarf mit Standardluftwechsel ( $Q_h$ ) und dem effektiven Heizwärmebedarf mit Lüftungsanlage ( $Q_{h,\text{eff}}$ )

30 Würden die Wohnungen nachträglich mit Nachströmelementen ausgerüstet werden, wären die Kosten deutlich höher.

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.

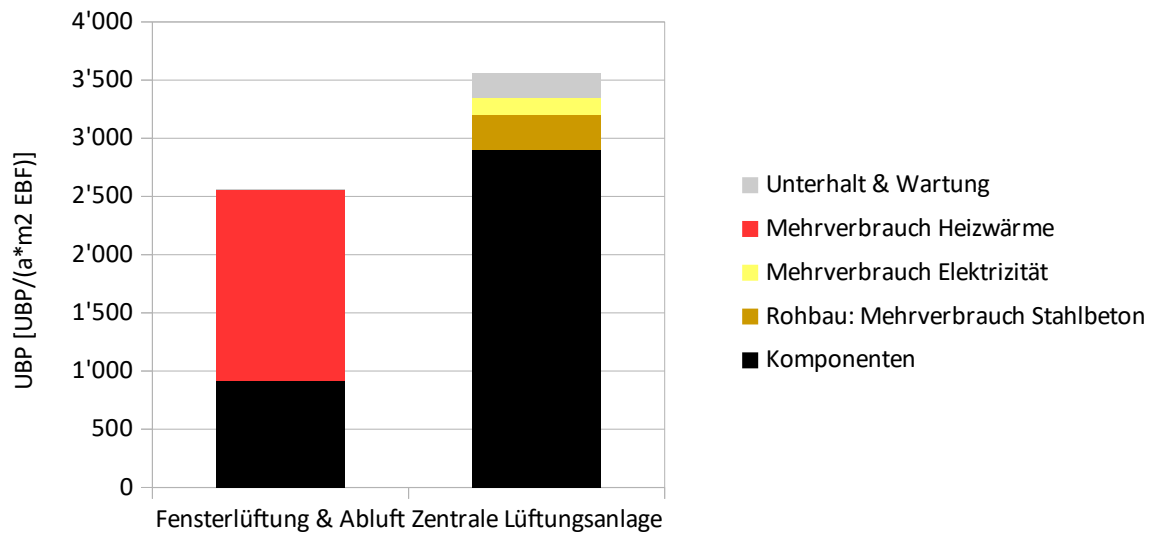


Abbildung 19: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in UBP

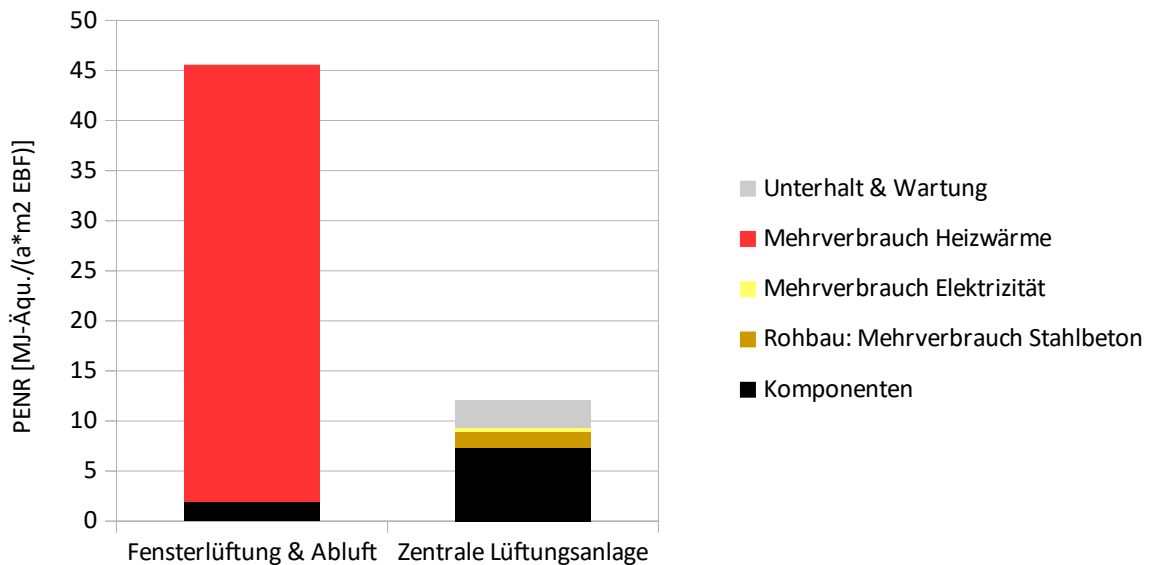
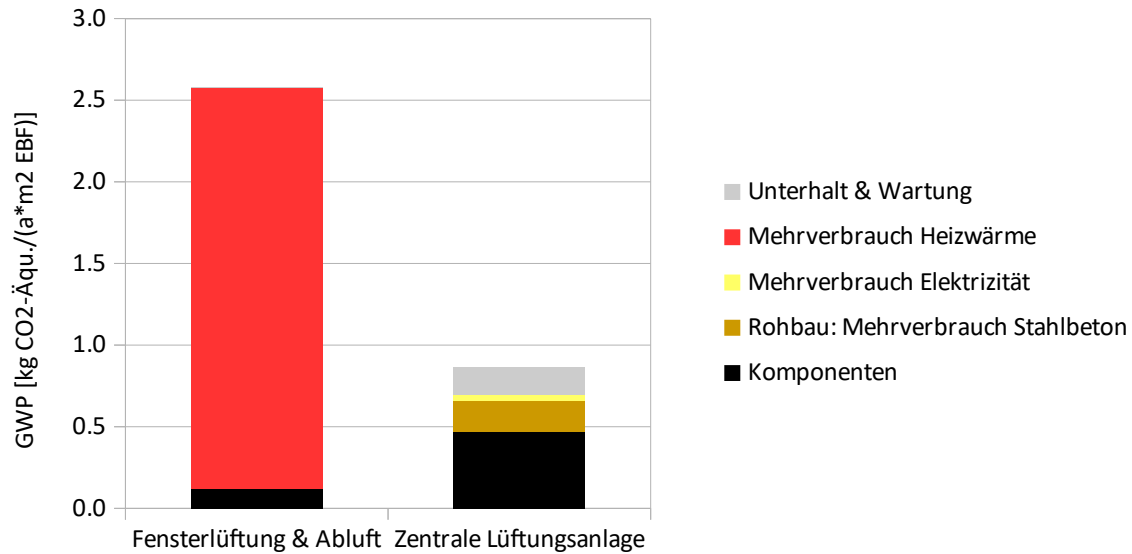


Abbildung 20: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in PENR





**Abbildung 21: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in GWP**

Durch den 24.3 % tieferen Heizwärmeverbrauch schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei zwei von drei Indikatoren deutlich besser ab. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, verbraucht sie 74 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 67 % 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 20 und 21 ist der enorme Einfluss des Mehrverbrauchs an Heizwärme (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 39 % 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 22 dargestellt.

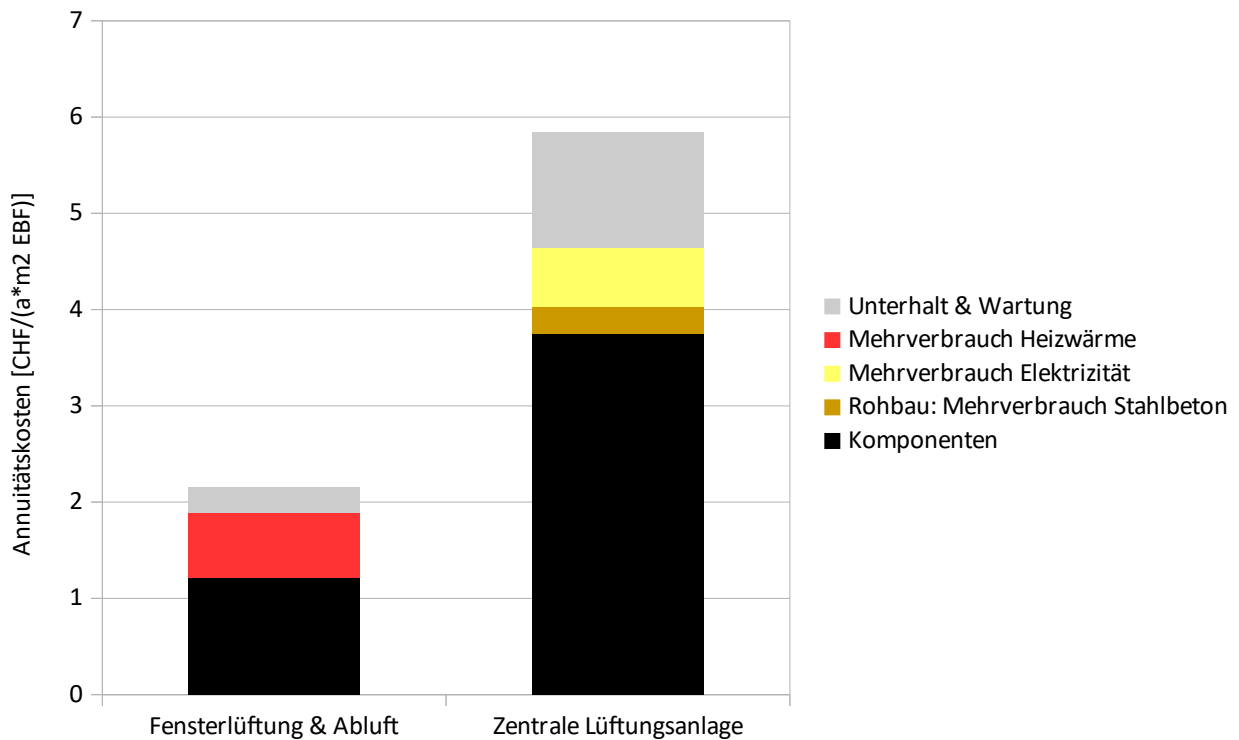


Abbildung 22: Annuitäten im idealen Szenario

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 171 % höhere Annuitätskosten. Die gegenüber der Fensterlüftung mit Abluft erzielte Einsparung an Heizkosten kann die hohen Investitionskosten der Komponenten sowie die höheren Wartungs- und Stromkosten nicht annähernd kompensieren.

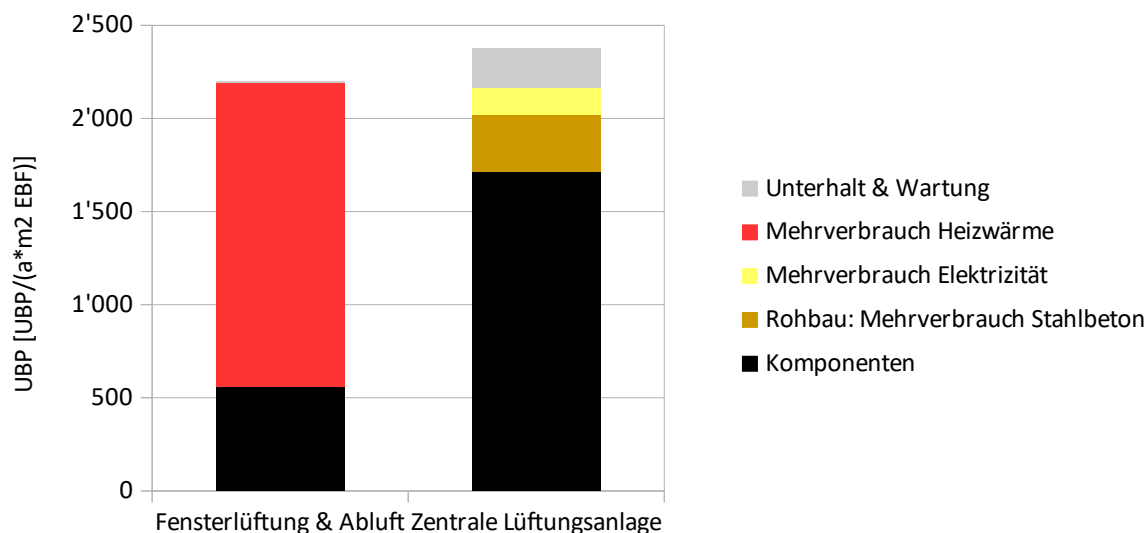
### 5.3. Ergebnisse bei längeren Lebensdauern der Komponenten

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 5.2 betrachtete ideale Szenario (mit maximaler Einsparung an Heizwärme sowie fiktiven Nachströmelementen im BGH-Gebäudeteil). In Tabelle 5 sind die bisher verwendeten sowie die neuen, realitätsnahen Lebensdauern der verschiedenen Komponenten zu sehen.

**Tabelle 5: Lebensdauern der Komponenten**

Komponente	Lebensdauer	
	SIA 382/1	Optimistische Annahme
Filtermaterial	1	1
Kanäle/Rohre	30	50
Luftdurchlasse	30	50
Monoblocks (inkl. WRG und Luftheritzer)	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 23: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in UBP**

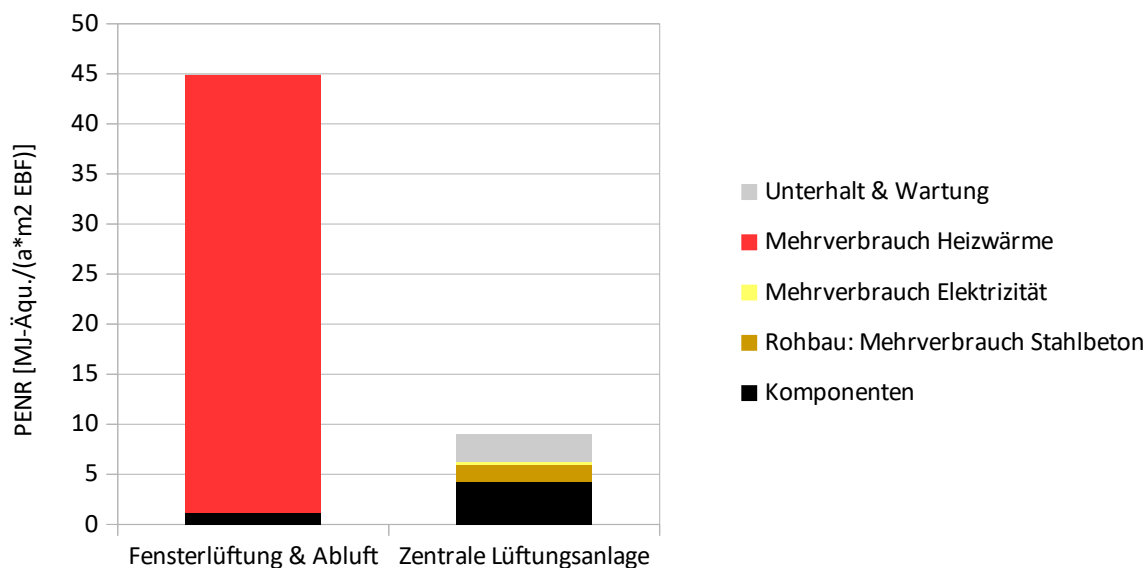


Abbildung 24: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR

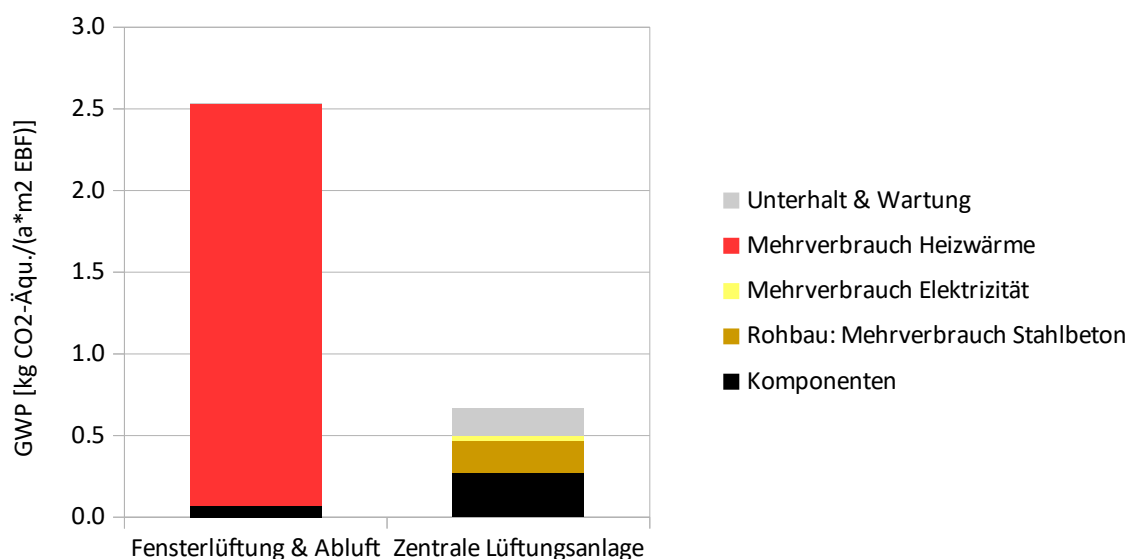
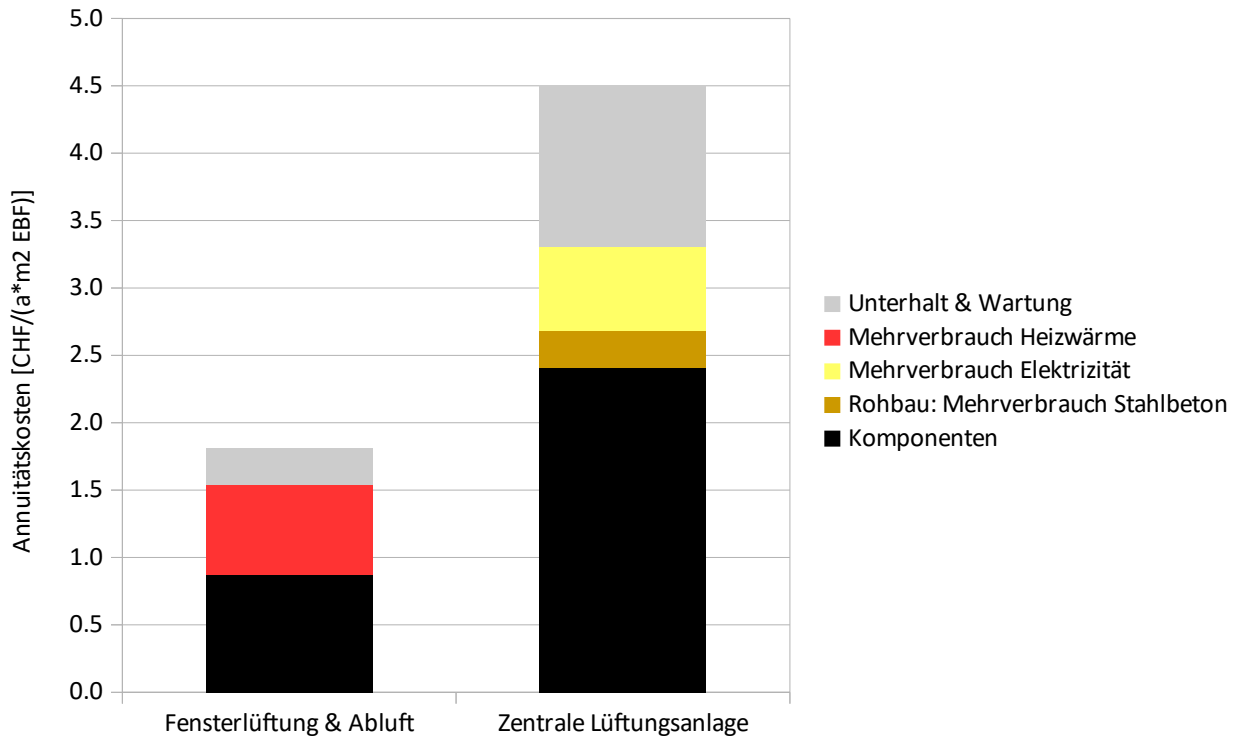


Abbildung 25: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP

Wiederum schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG bei zwei von drei Indikatoren besser ab als die Fensterlüftung mit Abluft. Durch die – neben dem 24.3 % tieferen Heizwärmeverbrauch – längeren Lebensdauern der Komponenten verbraucht die zentrale Lüftungsanlage nun 80 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 74 % 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 23 zu sehen ist. Trotzdem weist die zentrale Lüftungsanlage mit WRG, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, immer noch 8 % mehr UBPs 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 26 dargestellt.



**Abbildung 26: Annuitäten im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten**

Auch mit längeren Lebensdauern der Komponenten verursacht die zentrale Lüftungsanlage mit WRG immer noch 148 % 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.

## 6 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>31</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 untersuchen, wird ein weiteres, fiktives Szenario gebildet. Es wird angenommen, dass die gesamte Siedlung Klee mittels Erdwärmesonden-Wärmepumpen (EWS-Wärmepumpen) beheizt wird. Dafür wird neu auch die graue Energie der Wärmegewinnung 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 erneut 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 5.2). Diese Annahmen dienen dazu, einen möglichst allgemein gültigen Fall zu betrachten.

Die wichtigsten verwendeten Parameter finden sich in Tabelle 6.

**Tabelle 6: Verwendete Parameter im verallgemeinerten Szenario**

Bezeichnung	Wert
Strompreis <sup>32</sup>	17.10 Rp./kWh
Verwendeter Strommix LCA	Market for Electricity, Low Voltage, CH <sup>33</sup>
Verwendeter Prozess für Wärmeerzeugung inkl. grauer Energie	Heat Production, Borehole Heat Exchanger, Brine-Water Heat Pump 10 kW, CH <sup>34</sup>
Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe <sup>35</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 24.3 % kleiner dimensioniert werden kann als das Heizsystem im Gebäudeteil mit Fensterlüftung und Abluft (entsprechend der Einsparung an Heizwärme). Dies ist eine

31 [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)

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

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

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

35 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.

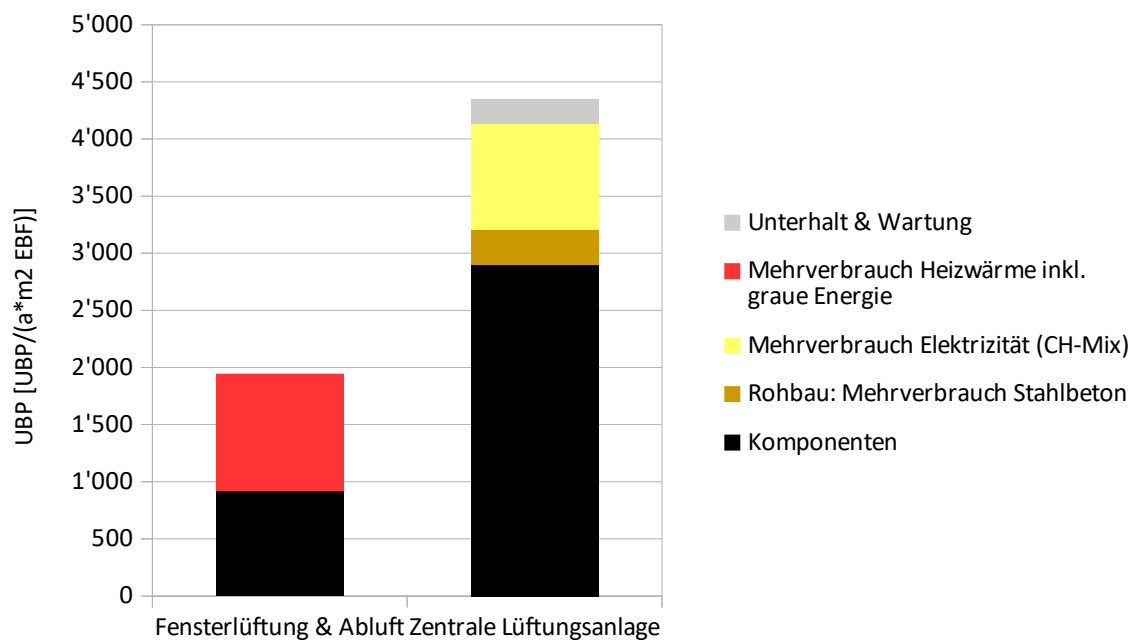


Abbildung 27: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in UBP

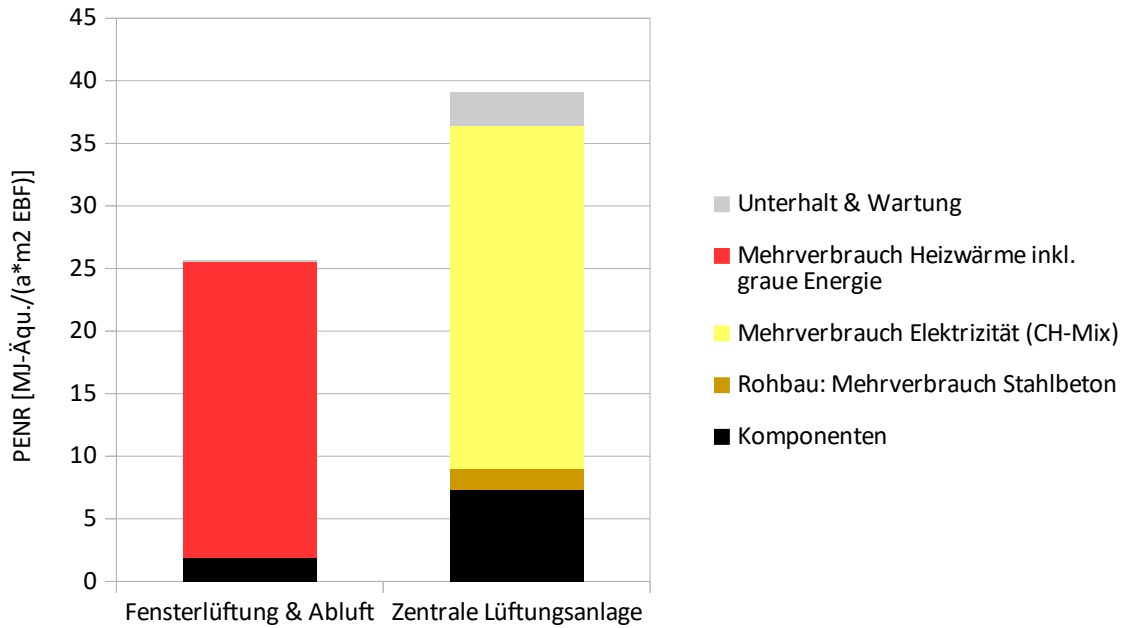


Abbildung 28: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in PENR

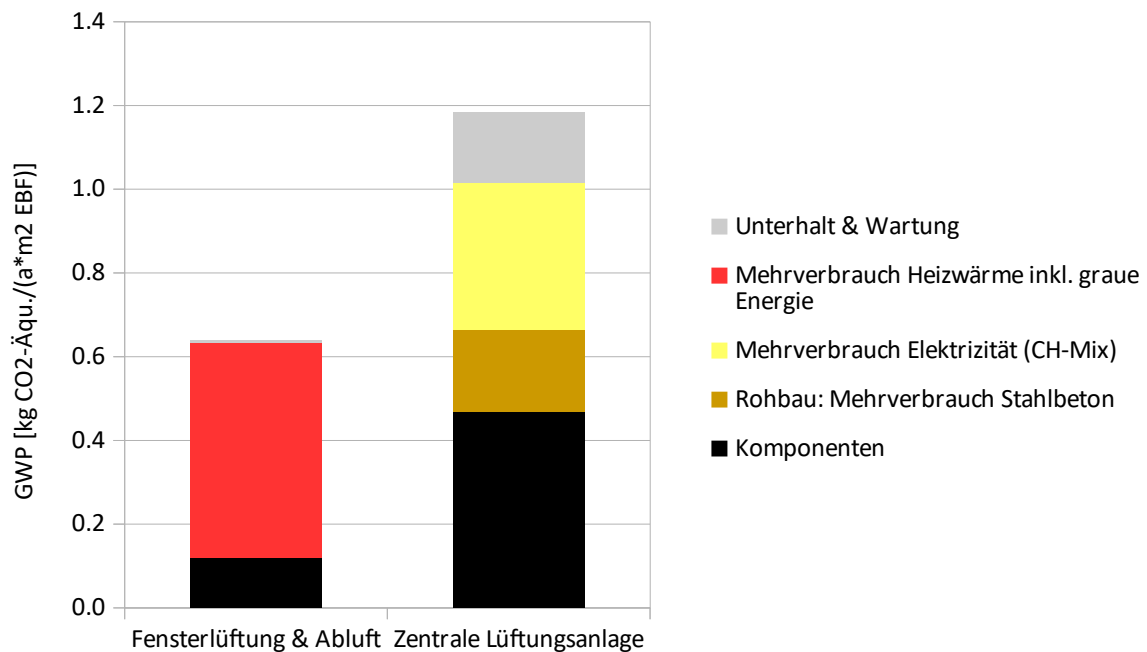


Abbildung 29: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in GWP

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 52 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 85 % 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



123 % höher als diejenige der Fensterlüftung mit Abluft.

Die Fensterlüftung verbraucht nicht nur mehr Heizwärme, sondern das grössere Heizsystem (EWS-Wärmepumpen) verursacht auch mehr graue Emissionen. Insgesamt schneidet die zentrale Lüftungsanlage aber aufgrund der grauen Emissionen der Lüftungskomponenten, des zusätzlich verbauten Stahlbetons sowie des erhöhten Stromverbrauches und Wartungsaufwandes trotzdem deutlich schlechter ab.

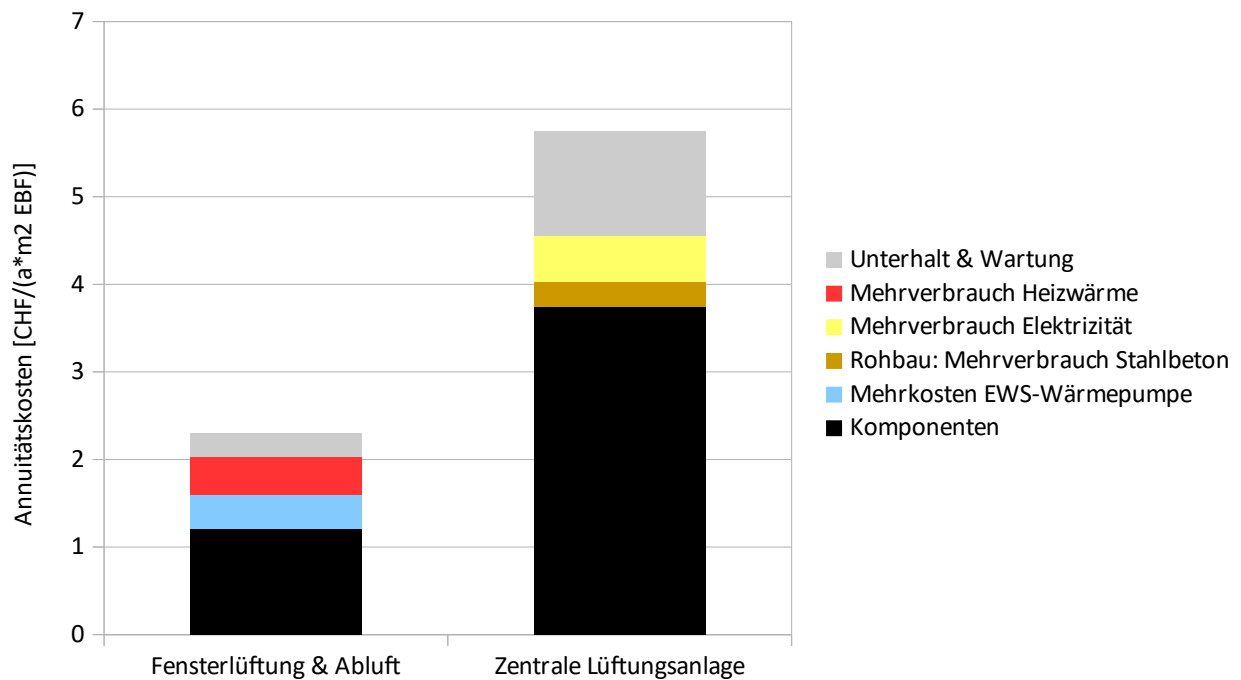
Auffallend ist zudem, dass die zentrale Lüftungsanlage mit WRG im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, sprich bei einer nachhaltigen Wärmeerzeugung, schlechter abschneidet (relativ betrachtet) als wenn die Heizwärmeproduktion durch Gas erfolgt (siehe Ergebnisse bei idealem Nutzerverhalten und idealer Wärmerückgewinnung in Kapitel 5.2). Der Grund dafür ist der Folgende: Zwar kann durch die zentrale Lüftungsanlage mit WRG im EWS-Wärmepumpen-Szenario wiederum 24.3 % 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 Stahlbeton, dem Stromverbrauch und der Wartung. Diese Ergebnisse sind insofern von hoher Relevanz, da heutzutage eine Mehrheit der Neubauten mit Wärmepumpen-Heizsystemen ausgestattet werden.

Bei der LCC, sprich der finanziellen Bewertung der beiden Lüftungssysteme, wird ebenfalls davon ausgegangen, dass das Heizsystem im Gebäudeteil mit zentraler Lüftungsanlage und WRG 24.3 % 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 24.3 % 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 260'000 für die Erdwärmesonden und Wärmepumpe anfallen.<sup>36</sup> Wie schon erwähnt, stellt dies eine 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>36</sup> Die CHF 260'000 entsprechen 24.3 % 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 30 dargestellt.



**Abbildung 30: Annuitäten im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario**

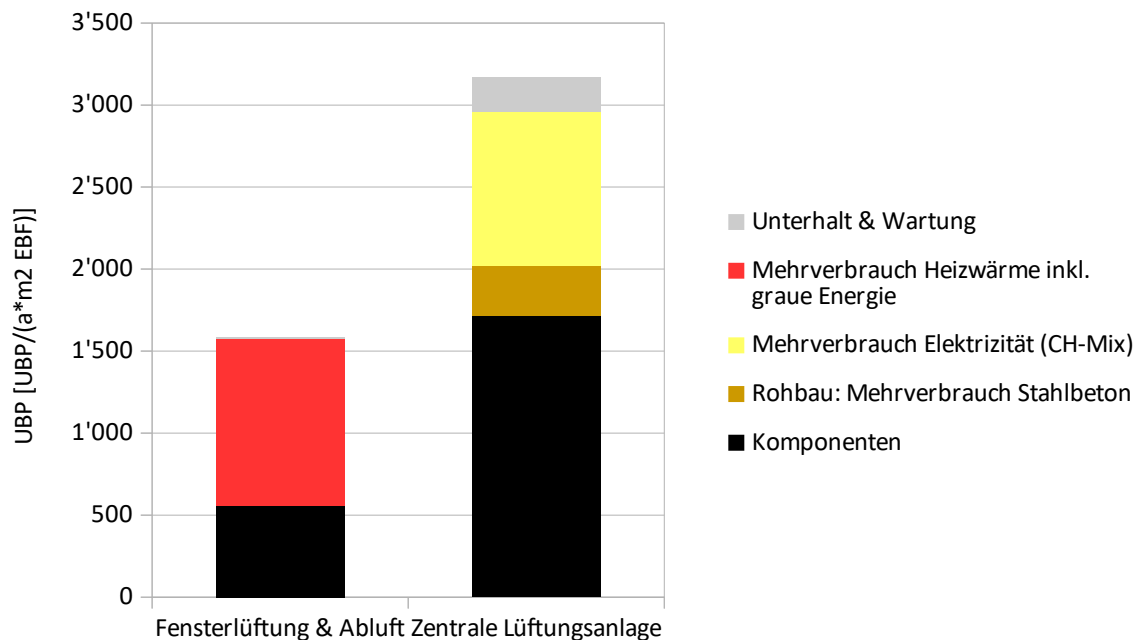
Wie auch bei den Ökobilanzen schneidet die zentrale Lüftungsanlage mit WRG, finanziell über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, deutlich schlechter ab als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft. Die Lebenszykluskosten der zentralen Lüftungsanlage mit WRG sind über doppelt so hoch (150 % höher) als jene der Fensterlüftung mit Abluft. Die Mehrkosten für die Erdwärmesonden und Wärmepumpe bei der Fensterlüftung fallen aufgrund der hohen Investitionskosten der Zentrallüftungskomponenten, den höheren Stromkosten sowie den hohen Kosten für Unterhalt und Wartung der zentralen Lüftungsanlage kaum ins Gewicht.

## 6.1. 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 5.3 in Tabelle 5 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 5.2)
- Optimistische Lebensdauer der Lüftungskomponenten (siehe Kapitel 5.3)
- Maximale Einsparung an grauer Energie bzw. Investitionskosten (siehe Kapitel 6)

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

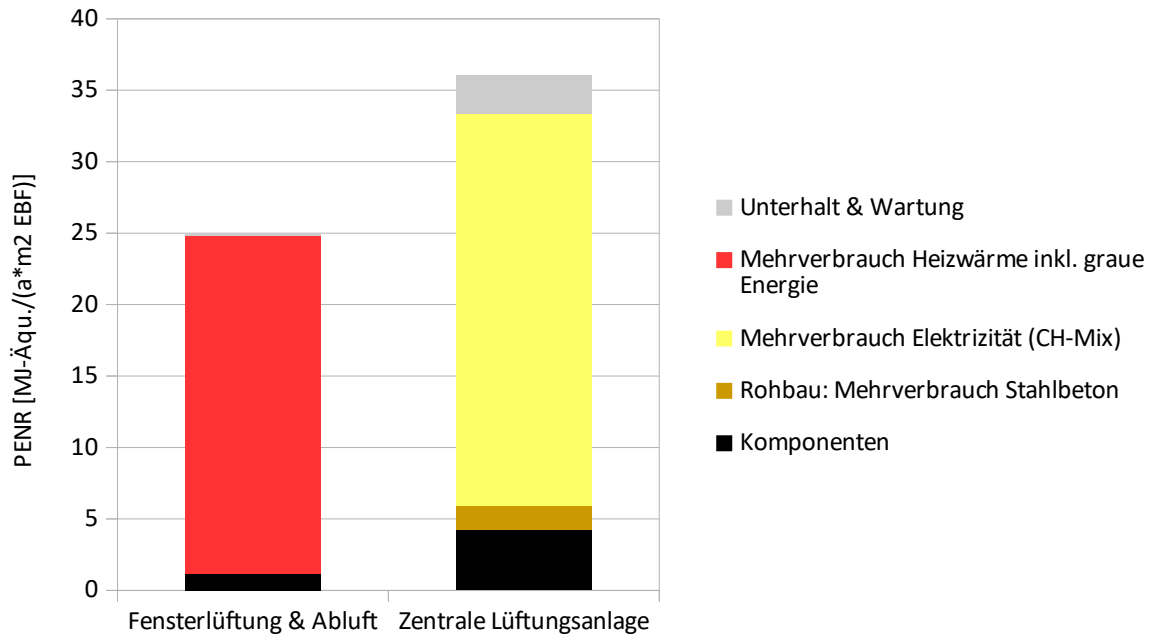


Abbildung 32: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR

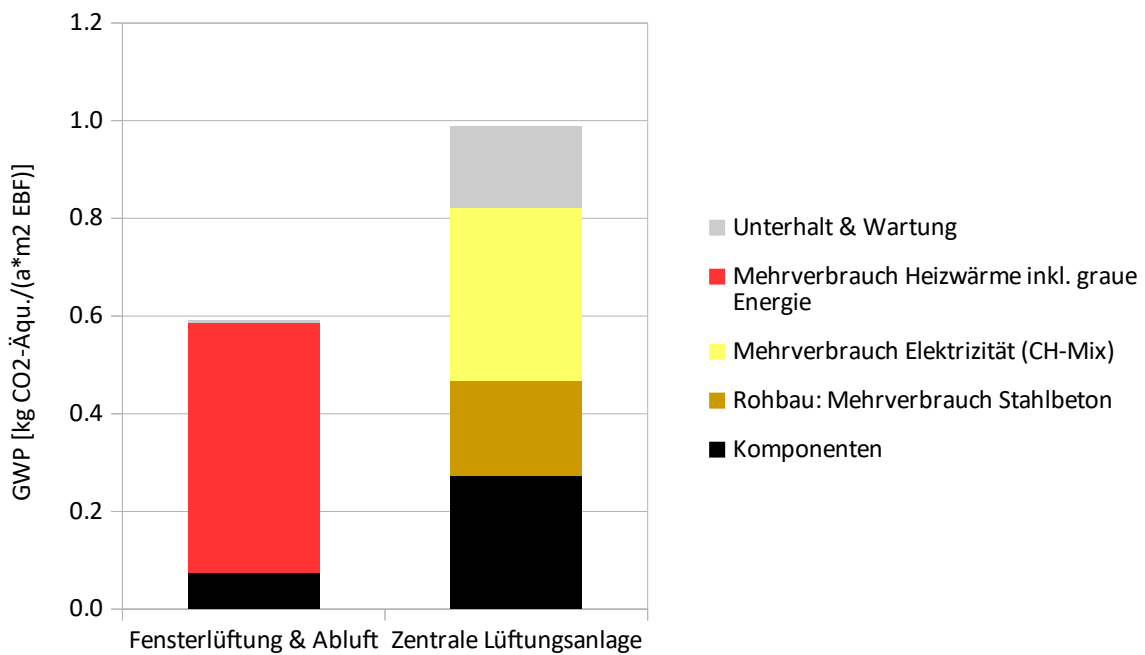
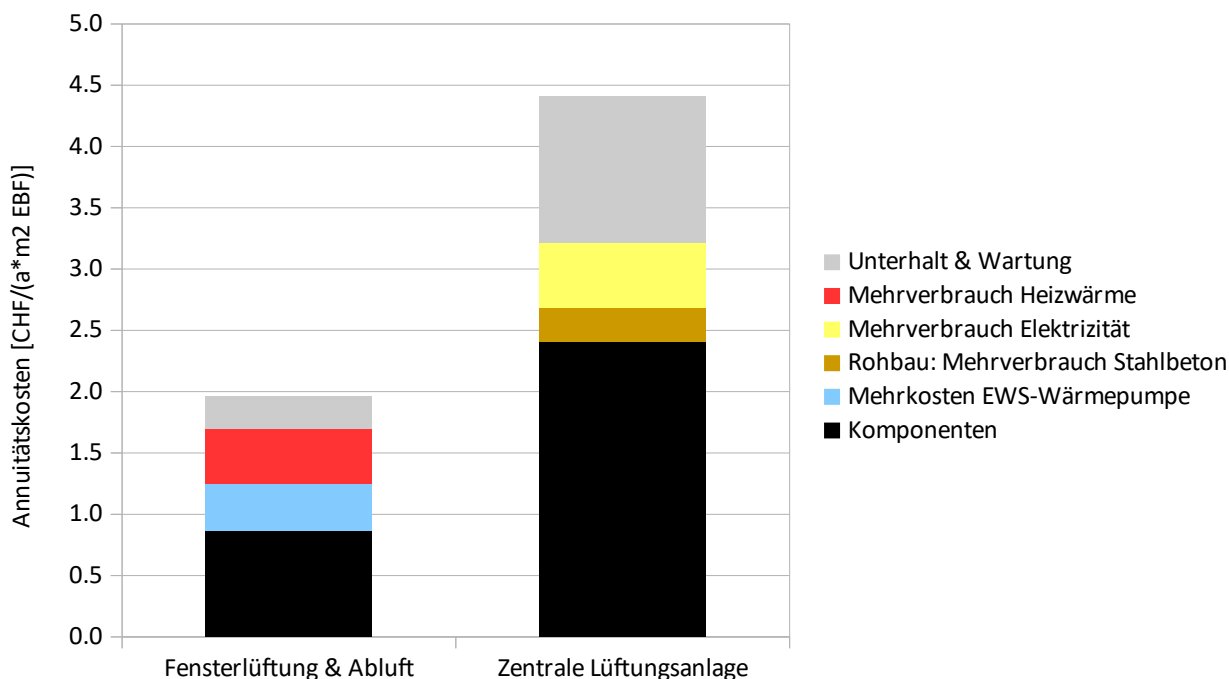


Abbildung 33: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP

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 45 % mehr nicht erneuerbare Primärenergie und verursacht 67 % mehr Treibhaus-

gasemissionen. 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 rund doppelt so hoch, sprich 100 % 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.

Die Annuitäten (Jahreskosten) der beiden Lüftungssysteme im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten sind in Abbildung 34 dargestellt.



**Abbildung 34: 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 125 % höhere, sprich über doppelt so hohe Annuitätskosten als die Fensterlüftung mit Abluft.

## 7 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 störungsfreie 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 über 24 % 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 Wärmezeugung 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 doppelt so hoch (100 % 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 über 24 % 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 2.5-fach höhere Kosten (+148 %) als die unkontrollierte Fensterlüftung mit Abluft.

In dieser Studie wurde für ein konkretes Wohnobjekt 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. Demzufolge scheint eine zentrale Lüftungsanlage kein Instrument zu sein, um die Ökobilanz eines Gebäudes zu verbessern oder die Kosten zu senken, sondern dient einer allfälligen Steigerung der Luftqualität und des Komforts. Es stellt sich somit die Frage, ob diese Mehrwerte nicht auch mit weniger materialintensiven, dezentralen Lüftungsanlagen erreicht werden könnten. 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. Folglich könnten eine verbesserte Luftqualität und ein höherer Komfort auch mit geringeren Umweltauswirkungen und Mehrkosten für die Mieter erreicht werden.

Die Resultate dieser Studie zeigen zudem eine grundsätzliche Problematik im Gebäudebereich auf: Oft wird die Frage nach den Umweltauswirkungen eines Gebäudes über den ganzen Lebenszyklus vernachlässigt. Stattdessen konzentrieren sich Label und gesetzliche Anforderungen auf Energieverbrauch und Effizienz im Betrieb. Dieser einseitige Fokus auf Energieeffizienz ist nicht unproblematisch und führt manchmal zu Resultaten, die dem eigentlichen Sinn der Bemühungen zuwiderlaufen: Der Senkung der Umweltauswirkungen.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundriss der Siedlung Klee (Knapkiewicz & Fickert AG 2008).....	3
Abbildung 2: Lüftungsplan einer BGH-Wohnung (Todt Gmür und Partner AG 2011).....	4
Abbildung 3: Strangschema von Treppenhaus 1 im BGH-Gebäudeteil (Todt Gmür und Partner AG 2011).....	5
Abbildung 4: Lüftungsplan einer GBMZ-Wohnung (Todt Gmür und Partner AG 2011).....	6
Abbildung 5: Strangschema von Treppenhaus 11 im GBMZ-Gebäudeteil (Todt Gmür und Partner AG 2011).....	7
Abbildung 6: Prinzipschema des Monoblocks von Treppenhaus 11 (Todt Gmür und Partner AG).....	8
Abbildung 7: Struktur der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht R., Büsser Knöpfel S. 2013).....	11
Abbildung 8: Bodenaufbau BGH-Gebäudeteil.....	13
Abbildung 9: Bodenaufbau GBMZ-Gebäudeteil.....	13
Abbildung 10: Allgemeinstromverbrauch der beiden Gebäudeteile.....	18
Abbildung 11: Heizwärmeverbräuche der beiden Gebäudeteile.....	18
Abbildung 12: Umweltauswirkungen der Lüftungssysteme, ausgedrückt in UBP.....	20
Abbildung 13: Umweltauswirkungen der Lüftungssysteme, ausgedrückt in PENR.....	20
Abbildung 14: Umweltauswirkungen der Lüftungssysteme, ausgedrückt in GWP.....	21
Abbildung 15: Annuitäten der beiden Lüftungssysteme.....	22
Abbildung 16: Einfluss des Strompreises auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage (Verwendeter Wert für Analysen: 20.1 Rp./kWh).....	23
Abbildung 17: Einfluss des Gaspreises auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage (Verwendeter Wert für Analysen: 6.1 Rp./kWh).....	24
Abbildung 18: Einfluss des Zinssatzes auf die jährlichen Mehrkosten der zentralen Lüftungsanlage (Verwendeter Wert für Analysen: 1.5 %).....	24
Abbildung 19: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in UBP.....	26
Abbildung 20: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in PENR.....	26
Abbildung 21: Umweltauswirkungen im idealen Szenario, ausgedrückt in GWP.....	27
Abbildung 22: Annuitäten im idealen Szenario.....	28
Abbildung 23: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in UBP.....	29
Abbildung 24: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR.....	30
Abbildung 25: Umweltauswirkungen im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP.....	30
Abbildung 26: Annuitäten im idealen Szenario mit langlebigen Komponenten.....	31
Abbildung 27: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in UBP.....	33
Abbildung 28: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in PENR.....	34
Abbildung 29: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario, ausgedrückt in GWP.....	34
Abbildung 30: Annuitäten im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario.....	36
Abbildung 31: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in UBP.....	37
Abbildung 32: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in PENR.....	38
Abbildung 33: Umweltauswirkungen im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten, ausgedrückt in GWP.....	38
Abbildung 34: Annuitäten im verallgemeinerten EWS-Wärmepumpen-Szenario mit langlebigen Komponenten.....	39
Abbildung 35: Prinzipschema der BGH-Heizzentrale (Huustechnik Rechberger AG 2008).....	44
Abbildung 36: Prinzipschema der GBMZ-Heizzentrale (Huustechnik Rechberger AG 2008).....	44
Abbildung 37: Prinzipschema der Wärmeversorgung des BGH-Gebäudeteils (Huustechnik Rechberger AG 2008).....	45

Abbildung 38: Prinzipschema der Wärmeversorgung des GBMZ-Gebäudeteils (Huustechnik Rechberger AG 2008)..... 45

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Allgemeine Angaben zum BGH- und GBMZ-Gebäudeteil..... 2  
Tabelle 2: Monoblocks des GBMZ-Gebäudeteils (Todt Gmür und Partner AG)..... 9  
Tabelle 3: Bodenaufbauten der beiden Gebäudeteile..... 13  
Tabelle 4: Absolute Allgemeinstrom- und Heizwärmeverbräuche..... 17  
Tabelle 5: Lebensdauern der Komponenten..... 29  
Tabelle 6: Verwendete Parameter im verallgemeinerten Szenario..... 32  
Tabelle 7: Vorliegende Angaben zu den EBFs der beiden Gebäudeteile..... 43  
Tabelle 8: Angaben zum Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen..... 47  
Tabelle 9: Angaben zum Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen..... 48  
Tabelle 10: LCI der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft..... 48  
Tabelle 11: LCI der zentralen Lüftungsanlage mit WRG..... 49



## Anhang

### Anhang A – Energiebezugsflächen der beiden Gebäudeteile

In Tabelle 7 sind die unterschiedlichen Angaben zu den EBFs chronologisch aufgelistet. Es wird jeweils nur die EBF der Wohnzonen gezeigt, sprich der Zonen mit der Standardnutzung «Wohnen MFH».

**Tabelle 7: Vorliegende Angaben zu den EBFs der beiden Gebäudeteile**

Datum	Bezeichnung	BGH-Gebäudeteil	GBMZ-Gebäudeteil
07.2007	Minergie-Heizwärmebedarf-Berechnung (Kopitsis Bauphysik AG)	18'830 m <sup>2</sup> (Objekt-Nr. 527)	19'100 m <sup>2</sup> (Objekt-Nr. 526)
07.2008	Systemnachweis SIA 380/1:2007 (Kopitsis Bauphysik AG)	19'580 m <sup>2</sup> (Objekt-Nr. 527)	-
12.2008	Systemnachweis SIA 380/1:2007 (Kopitsis Bauphysik AG)	-	22'522 m <sup>2</sup> (Objekt-Nr. 782)

Bei den zuerst erstellten Nachweisen Nr. 526 und 527 wurde nachträglich nur der BGH-Nachweis (Nr. 527) angepasst. Der später für den GBMZ-Gebäudeteil neu erstellte Nachweis Nr. 782 umfasst im Vergleich zu allen anderen Nachweisen auch das Sockelgeschoss (UG) und fällt daher viel grösser aus. Weshalb beim Nachweis Nr. 782, welcher dann auch für die Minergie-Zertifizierung verwendet wurde, das Sockelgeschoss plötzlich berücksichtigt wird, ist nicht ersichtlich. Die Gebäudehülle sowie -nutzung im Sockelgeschoss unterscheidet sich in den beiden Gebäudeteilen kaum.<sup>37</sup> Auch ist im Sockelgeschoss des GBMZ-Gebäudeteils keine KWL vorhanden – bis auf den Kinderhort, welcher jedoch ohnehin bei jeglichen Betrachtungen ausgeschlossen wird. Aufgrund dieser unerklärlichen Erhöhung der EBF und weil zu den im Juli 2008 und Dezember 2008 erstellten Nachweisen kein Gegenstück des anderen Gebäudeteils vorliegt, werden die EBFs aus den im Juli 2007 erstellten Nachweisen verwendet.

Die EBFs werden verwendet, um eine funktionelle Einheit zu bilden (sprich die Umweltauswirkungen und Kosten auf einen Quadratmeter EBF zu beziehen). Durch das transparente Ausweisen aller vorliegenden EBFs können die Resultate dieser Studie problemlos in andere EBFs umgerechnet werden. Dafür müssen die Kosten bzw. Umweltauswirkungen (pro Quadratmeter EBF und Jahr) mit der im Juli 2007 berechneten EBF des jeweiligen Gebäudeteils multipliziert und anschliessend durch die gewünschte EBF geteilt werden.

<sup>37</sup> Gemäss Grundrissplänen des Sockelgeschosses und Auskunft der Kopitsis Bauphysik AG

## Anhang B – Prinzipschemata der Wärmeversorgung

Das Prinzipschema der BGH-Heizzentrale ist in Abbildung 35 und jenes der GBMZ-Heizzentrale in Abbildung 36 zu sehen.

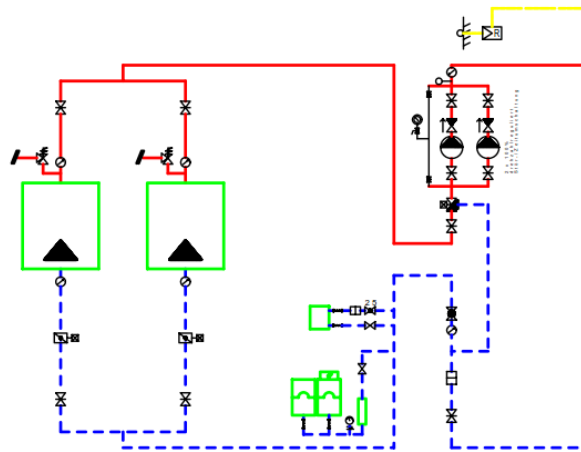


Abbildung 35: Prinzipschema der BGH-Heizzentrale  
(Huustechnik Rechberger AG 2008)

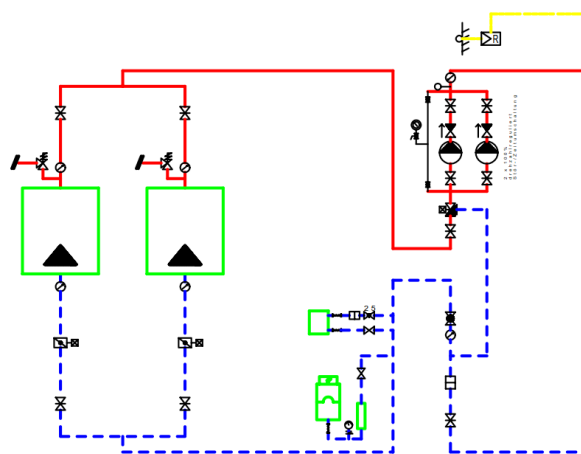


Abbildung 36: Prinzipschema der GBMZ-Heizzentrale  
(Huustechnik Rechberger AG 2008)

Das Prinzipschema der Wärmeversorgung des BGH-Gebäudeteils ist in Abbildung 37 zu sehen.

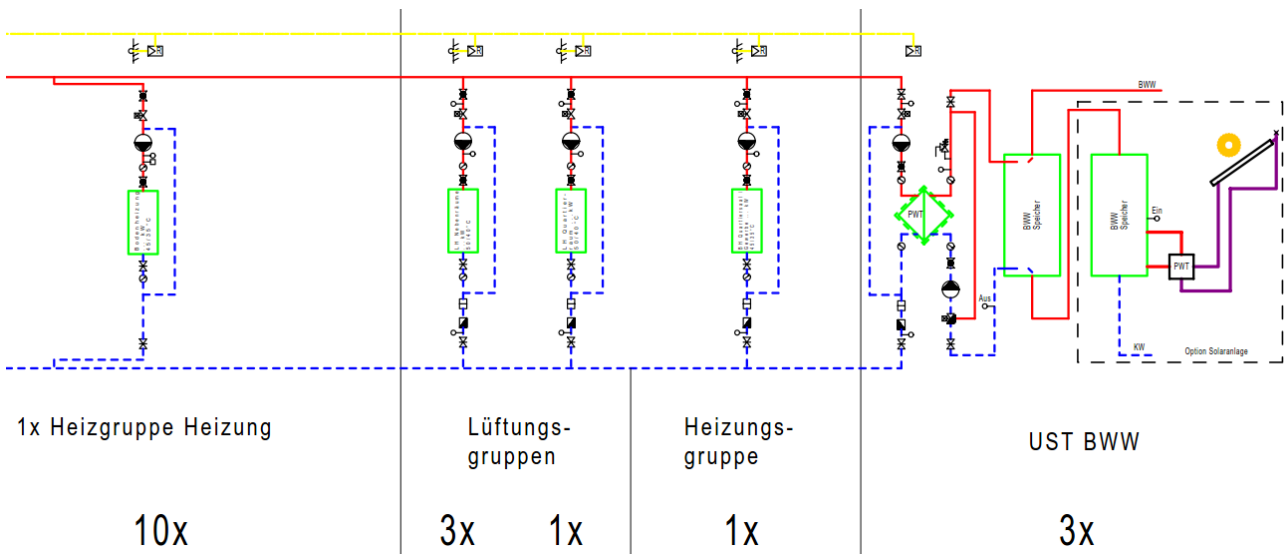


Abbildung 37: Prinzipschema der Wärmeversorgung des BGH-Gebäudeteils (Huustechnik Rechberger AG 2008)

Insgesamt gibt es elf Heizgruppen, zehn davon für die Wohnungen (eine Heizgruppe pro Treppenhaus) und eine für den Quartierraum. Weiter sind drei Lüftungsgruppen für die Lufterwärmung in den drei zentralen Lüftungsanlagen der Nebenräume sowie eine Lüftungsgruppe für die Lufterwärmung in der zentralen Lüftungsanlage des Quartierraums vorhanden. Schliesslich gibt es drei Unterstationen für das Warmwasser, welches sowohl mittels Gasheizung wie auch thermischen Solarkollektoren aufbereitet wird. Die thermischen Solarkollektoren werden jedoch ausschliesslich für die Warmwasseraufbereitung genutzt.

Das Prinzipschema der Wärmeversorgung des GBMZ-Gebäudeteils ist in Abbildung 38 zu sehen.

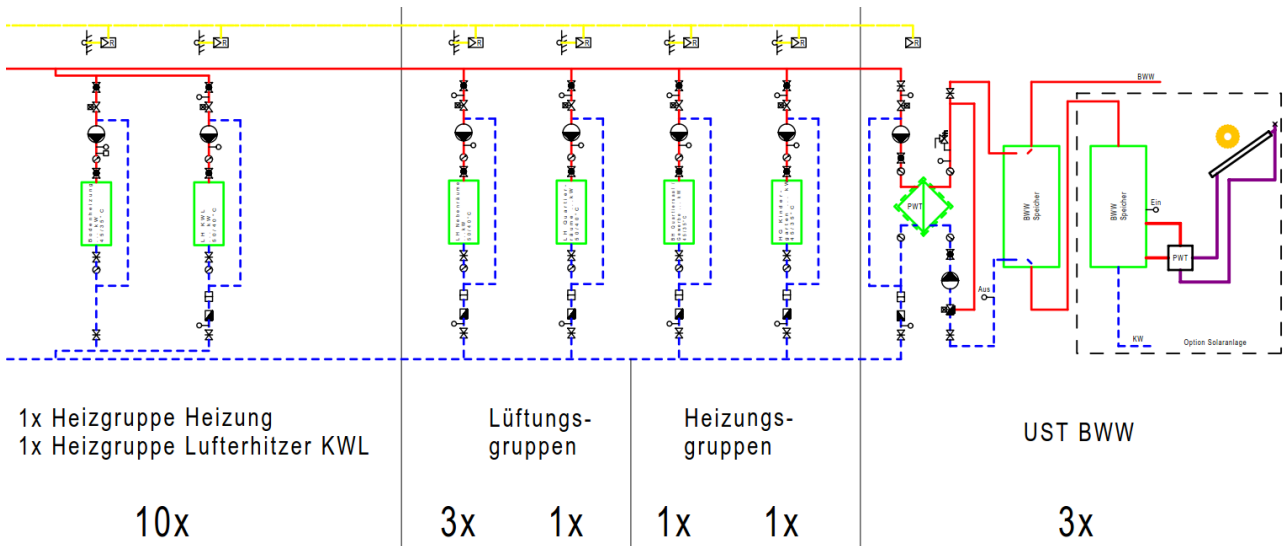


Abbildung 38: Prinzipschema der Wärmeversorgung des GBMZ-Gebäudeteils (Huustechnik Rechberger AG 2008)

Im Gegensatz zum BGH-Gebäudeteil verfügt der GBMZ-Gebäudeteil nicht über zehn, sondern 20 Heizgruppen für die Wohnungen. Denn neben den zehn Heizgruppen für die Bodenheizung (eine Heizgruppe pro Treppenhaus) fallen zusätzlich zehn Heizgruppen für die Lufterwärmung in den zentralen Lüftungsanlagen der Wohnungen (eine zentrale Lüftungsanlage pro Treppenhaus) an. Abgesehen von diesen zehn

zusätzlichen Lufterhitzern für die KWL sowie einer zusätzlichen Heizgruppe für den Hort unterscheidet sich die Wärmeversorgung im GBMZ-Gebäudeteil nicht von jener im BGH-Gebäudeteil. Die Warmhaltung der Warmwasserverteilung geschieht in beiden Gebäudeteilen mit einem Zirkulationssystem und nicht mit elektrischen Heizbändern.

### Anhang C – Formeln der Annuitätenmethode

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

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

**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 D – Strombedarf der Abluft-Ventilatoren der BGH-Nasszellen

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

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

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

$P_{el}$  entspricht dabei der elektrischen Leistungsaufnahme und  $t$  den jährlichen Vollast-Betriebsstunden aller Ventilatoren. In Tabelle 8 sind die verwendeten Werte sowie der resultierende Strombedarf zu sehen.

**Tabelle 8: 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 E – Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen

Der Strombedarf der Zu- und Abluft-Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen wird mit Formel 7, 8 und 9 berechnet.

$$P_{ven,eff} = P_{ven,soll} * \left( \frac{Q_{eff}}{Q_{soll}} \right)^3$$

**Formel 7: Effektiver Leistungsbedarf der Ventilatoren**

$$P_{el} = \frac{P_{ven,eff}}{\eta}$$

**Formel 8: Elektrischer Leistungsbedarf der Antriebsmotoren**

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

**Formel 9: Strombedarf der Antriebsmotoren**

$P_{ven,soll}$  entspricht dabei dem Leistungsbedarf der Ventilatoren bei maximalem Soll-Volumenstrom  $Q_{soll}$ ,  $P_{ven,eff}$  dem Leistungsbedarf der Ventilatoren bei effektivem Volumenstrom  $Q_{eff}$ ,  $\eta$  dem Wirkungsgrad der Ventilatoren,  $P_{el}$  der elektrischen Leistungsaufnahme der Antriebsmotoren (der Ventilatoren) und  $t$  den jährlichen Betriebsstunden der Ventilatoren.

Die verwendeten Werte und der resultierende Strombedarf sind in Tabelle 9 zu sehen.

**Tabelle 9: Angaben zum Strombedarf der Ventilatoren der zentralen Lüftungsanlagen**

Beschreibung	Wert
Max. Leistungsbedarf aller Ventilatoren bei Soll-Volumenstrom	11.8 kW
Soll-Volumenstrom	25.35 m <sup>3</sup> /h
Effektiver Volumenstrom	21.08 m <sup>3</sup> /h
Wirkungsgrad der Ventilatoren	67 %
Jährliche Betriebsstunden	8'760 h/a
<b>Strombedarf der Ventilator-Antriebsmotoren</b>	<b>88'700 kWh/a</b>

## Anhang F – Ökologische Sachbilanzen (LCI)

Die LCI der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft im BGH-Gebäudeteil ist in Tabelle 10 aufgelistet.

**Tabelle 10: LCI der unkontrollierten Fensterlüftung mit Abluft**

	Material/Prozess	Lebenszeit [a]	Anzahl	Einheit	#[/(a*m <sup>2</sup> EBF)]
<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>	Mehrverbrauch Elektrizität	1	0	kWh	<b>0.00000</b>
	Mehrverbrauch Heizwärme	1	13348	kWh	<b>0.76695</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 11 aufgelistet.

**Tabelle 11: LCI der zentralen Lüftungsanlage mit WRG**

	<b>Material/Prozess</b>	<b>Lebenszeit [a]</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Einheit</b>	<b>#[/(a*m2 EBF)]</b>
<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. Stahlblech (Isolation Typ2)	30	560	kg	<b>0.00112</b>
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>
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	<b>0.00000</b>
	Rauchmelder 230VAC 1 Wechselk.	30	0.1	kg	<b>0.00000</b>
	<b>Isolation:</b>				
	Isolation der Mauerdurchbrüche mit 20mm Mineralfasermatten	30	0.6	m <sup>3</sup>	<b>0.00000</b>
	Aussenisolation Mineralfaserplatten 25mm dick	30	14.5	m <sup>3</sup>	<b>0.00003</b>
	Wärmedämmung Rohrnetz (Dämmstärke: 50mm)	30	1320	kg	<b>0.00263</b>
<b>KOMPONENTEN Kontrollierte Wohnungslüftung TH 15 (BKP: 244.15)</b>	<b>Zuluft-Monobloc Seven-Air SHG 2.6:</b>				
	Flexible Manschette isoliert Gewebe	20	2.5	kg	<b>0.00007</b>
	Flexible Manschette isoliert Rahmen	20	5	kg	<b>0.00015</b>
	Flexible Manschette Isolation	20	1	kg	<b>0.00003</b>
	Aussenluftklappe innenliegend	20	15	kg	<b>0.00045</b>
	Filterteil: F7, Unifil	1	10	Stk	<b>0.00599</b>
	WRG-Alu-Plattentauscher	20	85.3335	kg	<b>0.00256</b>
	Lufterhitzerteil Rahmen aus verz. Stahlblech	20	3	kg	<b>0.00009</b>
	Lufterhitzerteil Kupfer Rohre	20	5	kg	<b>0.00015</b>
	Lufterhitzerteil Alu-Lamellen	20	2	kg	<b>0.00006</b>
	Zuluft-Ventilatorteil	20	10.8	kg	<b>0.00032</b>
	EC-Aussenläufermotor	20	15	kg	<b>0.00045</b>
	Flexible Manschette Gewebe	20	2.5	kg	<b>0.00007</b>
	Flexible Manschette Rahmen	20	5	kg	<b>0.00015</b>
	Differenzdruck-Manometer	20	0.9	kg	<b>0.00003</b>
	<b>Fortluft-Monobloc Seven-Air SHG 2.6:</b>				
	Flexible Manschette Gewebe	20	2.5	kg	<b>0.00007</b>
	Flexible Manschette Rahmen	20	5	kg	<b>0.00015</b>
	Fortluftklappe inneliegend	20	15	kg	<b>0.00045</b>
	Filterteil: F7, Unifil	1	10	Stk	<b>0.00599</b>
Abluft-Ventilatorteil	20	10.8	kg	<b>0.00032</b>	

EC-Aussenläufermotor	20	15	kg	<b>0.00045</b>
Flexible Manschette isoliert Gewebe	20	2.5	kg	<b>0.00007</b>
Flexible Manschette isoliert Rahmen	20	5	kg	<b>0.00015</b>
Flexible Manschette Isolation	20	1	kg	<b>0.00003</b>
Differenzdruck-Manometer	20	0.9	kg	<b>0.00003</b>
WRG-Alu-Plattentauscher	20	75.411	kg	<b>0.00226</b>
<b>Kanäle/Rohre:</b>				
Aussenluftkanalnetz 200x750 mm aus verz. Stahlblech	30	25.5	kg	<b>0.00051</b>
Aussenluftkanalnetz 300x750 mm aus verz. Stahlblech	30	9.4	kg	<b>0.00019</b>
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 -stutzen 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 mm	30	2.7872	m <sup>2</sup>	<b>0.00006</b>
	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>ROHBAU: MEHRVERBRAUCH STAHLBETON</b>	Mehrverbrauch Beton	100	780.28	m <sup>3</sup>	<b>0.00040</b>
	Mehrverbrauch Betonstahl	100	78028	kg	<b>0.04000</b>
<b>BETRIEB</b>	Mehrverbrauch Elektrizität	1	80820	kWh	<b>3.92688</b>
	Mehrverbrauch Heizwärme	1	0	kWh	<b>0.00000</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>