Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**BAT G_22_27** **Vergleich von dezentralen Lüftungsanlagen zu dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlagen in Verwaltungsbauten**
Diplomandin/Diplomand	**Schnieper, Raphael**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Gebäudetechnik| Energie**
Semester	**FS22**
Dozentin/Dozent	**Prof. Altenburger, Adrian** **Prof. Wouters, Volker**
Expertin/Experte	**Steinmann, Markus**

Abstract Deutsch
Diese Bachelorarbeit befasst sich mit dem Vergleich von dezentralen Lüftungsanlagen zu dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlagen in Verwaltungsbauten. Im Bachelor+-Projekt der Gruppe B ist eine dezentrale Lüftungsanlage geplant. Mit dem Vergleich sollen nun die beiden Lüftungssysteme für das Projekt untersucht und anschliessend eine Empfehlung abgegeben werden. Danach ist die Empfehlung mit dem geplanten Lüftungssystem zu vergleichen. Es stellt sich die Frage, ob das richtige Lüftungssystem im Bachelor+-Projekt gewählt wurde. Für den Vergleich wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Hierzu wird ein Vergleichstool erarbeitet. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse hat gezeigt, dass die dezentrale Lüftungsanlage für das Bachelor+-Projekt besser geeignet ist als die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage. Für das Bachelor+-Projekt der Gruppe B wurde dementsprechend das richtige Lüftungssystem gewählt.

Abstract Englisch
This bachelor thesis deals with the comparison of decentralised ventilation systems to decentralised supply air and centralised extract air systems in administration buildings. In the Bachelor+-project of Group B, a decentralised ventilation system is planned. The comparison is now used to analyse the two ventilation systems for the project and to then make a recommendation. Afterwards the recommendation is compared with the planned ventilation system. The question arises as to whether the correct ventilation system was selected in the Bachelor+ project. A utility analysis is carried out for the comparison. A comparison tool is developed for this purpose. The result of the utility analysis showed that the decentralised ventilation system is more suitable for the Bachelor+ project than the decentralised supply air and central extract air systems. Accordingly, the right ventilation system was selected for the Bachelor+ project of Group B.

Ort, Datum Horw, 10. Juni 2022

© Raphael Schnieper, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

INHALT

1 Einleitung 1

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung 2

2.1 Aufgabenstellung 2

2.2 Zielsetzung 2

3 Methodik 3

3.1 Vorgehen 3

3.2 Systemgrenzen 3

3.3 Allgemeine Grundlagen 3

3.4 Bachelor+-Projekt der Gruppe B 8

4 Definition Lüftungssysteme 9

4.1 Dezentrale Lüftungsanlage 9

4.2 Dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 10

5 Merkmale Lufterneuerung 11

6 Kriterien 14

6.1 Aspekt Kosten 14

6.1.1 Erstellung 15

6.1.2 Raumbedarf 16

6.1.3 Betrieb 17

6.1.4 Wartung und Unterhalt 18

6.1.5 Akustik, Schallschutz 18

6.2 Aspekt Qualität 19

6.2.1 Ökologie, Erstellung 19

6.2.2 Ökologie, Betrieb 20

6.2.3 Flächen- und Raumbedarf 21

6.2.4 Flexibilität Raumeinteilung 23

6.2.5 Eingriff in Bausubstanz 24

6.2.6 Lüftungsgeräte, Ventilator 25

6.2.7 Lüftungsgeräte, WRG 26

6.2.8 Akustik, Schallemissionen 26

6.3 Aspekt Zeit 27

6.3.1 Dauer für Erstellung 27

6.3.2 Lieferfristen 27

7 Bewertungsraster 28
7.1 Aspekt Kosten 28
7.1.1 Erstellung 28
7.1.2 Raumbedarf 29
7.1.3 Betrieb 29
7.1.4 Wartung und Unterhalt 29
7.1.5 Akustik, Schallschutz 30
7.2 Aspekt Qualität 30
7.2.1 Ökologie, Erstellung 30
7.2.2 Ökologie, Betrieb 30
7.2.3 Flächen- und Raumbedarf 30
7.2.4 Flexibilität Raumeinteilung 31
7.2.5 Eingriff in Bausubstanz 31
7.2.6 Lüftungsgeräte, Ventilator 32
7.2.7 Lüftungsgeräte, WRG 32
7.2.8 Akustik, Schallemissionen 32
7.3 Aspekt Zeit 33
7.3.1 Dauer für Erstellung 33
7.3.2 Lieferfristen 33

8 Präferenzmatrix 34

9 Nutzwertanalyse 35

10 Sensitivitätsanalyse 36

11 Diskussion 37

12 Fazit 40

Abbildungsverzeichnis IV

Tabellenverzeichnis V

Formelverzeichnis VI

Literaturverzeichnis VII

Anhang IX

1 EINLEITUNG

Zur Belüftung von Verwaltungsbauten können unterschiedliche Lüftungssysteme eingesetzt werden. Damit für ein Gebäude das optimale Lüftungssystem ermittelt werden kann, sind die Lüftungssysteme in Bezug auf die Ökonomie, die Ökologie sowie den Komfort zu vergleichen.

Im Rahmen des Bachelor+ wurde im Modul IP2 ein Verwaltungsbau geplant. Als Lüftungssystem wurde eine dezentrale Lüftungsanlage vorgesehen. Während der Planung stand auch eine dezentrale Zuluft- und eine zentrale Abluftanlage zur Diskussion. Das Ziel der Bachelorthesis ist, die beiden Lüftungssysteme für das Bachelor+-Projekt der Gruppe B zu vergleichen und das besser geeignete Lüftungssystem zu ermitteln. Anhand des Resultats soll anschliessend das geplante Lüftungssystem im Bachelor+-Projekt beurteilt werden. Zum Vergleich der beiden Lüftungssysteme wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Dies erlaubt eine rationale Entscheidungsfindung. Für die Nutzwertanalyse wird ein Tool erarbeitet, welches auch in anderen Verwaltungsbauten in einer frühen Phase zur Entscheidungsfindung genutzt werden kann.

Die Bachelorthesis ist in mehrere Kapitel gegliedert. Zu Beginn wird die Aufgabenstellung und die Zielsetzung erläutert. Anschliessend wird im Kapitel Methodik das Vorgehen, die Systemgrenzen, die allgemeinen Grundlagen und das Bachelor+-Projekt der Gruppe B beschrieben. Danach werden die betrachteten Lüftungssysteme aufgezeigt und deren Funktionsweise erklärt. Als nächstes wird auf die Merkmale der Lufterneuerung eingegangen. Im Anschluss werden die Kriterien und deren Bewertungsraster erläutert. Darauf folgt die Erklärung der Präferenzmatrix und der Nutzwertanalyse. Danach wird auf die Sensitivitätsanalyse eingegangen. Zum Schluss werden die Ergebnisse in einer Diskussion thematisiert und anschliessend in einem Fazit zusammengefasst.

2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Im Folgenden wird auf die Aufgabenstellung der Bachelorthesis und die daraus abgeleitete Zielsetzung eingegangen.

2.1 Aufgabenstellung

Es sollen dezentrale Lüftungsanlagen mit dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlagen verglichen werden. Dabei soll die Nutzungsflexibilität im Raum in Abhängigkeit der Anzahl Geräte (Modularität) untersucht werden. Weiter soll die Raumakustik beim Einsatz von mehreren dezentralen Lüftungsgeräten geprüft und beurteilt werden. Aus der Raumakustik abgeleitet, soll ein Rückschluss auf die maximale mögliche Anzahl an Lüftungsgeräten im Raum gezogen werden können. Ausserdem soll der Wartungsaufwand der dezentralen Lüftungsanlagen mit der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlagen verglichen werden. Für den Variantenvergleich ist zudem ein Tool zu erarbeiten, welches die beiden Lüftungskonzepte in Abhängigkeit der Projektdaten gegenüberstellt und anhand der Werte sowie des Vergleichs eine Empfehlung abgibt. Die Berechnungen und Validierungen werden auf Basis des Bachelor+-Projektes der Gruppe B durchgeführt.

2.2 Zielsetzung

Die Bachelorthesis hat zum Ziel, die dezentrale Lüftungsanlage und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage für das Bachelor+-Projekt der Gruppe B zu vergleichen und eine Empfehlung für ein Lüftungssystem abzugeben. Aufgrund der Empfehlung soll beurteilt werden, ob die im Bachelor+-Projekt geplante dezentrale Lüftungsanlage die richtige Wahl ist. Als Hilfsmittel für den Vergleich ist ein Tool zu erarbeiten, welches die beiden Lüftungssysteme anhand der Grundlagen vergleicht und eine Empfehlung abgibt. Das Vergleichstool soll auch in anderen Verwaltungsbauten in einer frühen Phase zum Vergleich der beiden Lüftungssysteme genutzt werden können.

3 METHODIK

In diesem Kapitel wird auf die Methodik zur Erarbeitung der Bachelorthesis eingegangen. Zuerst wird das Vorgehen und die Systemgrenzen aufgezeigt. Anschliessend werden die allgemeinen Grundlagen und das Bachelor+-Projekt der Gruppe B erläutert.

3.1 Vorgehen

Um ein Grundverständnis für die beiden zu vergleichenden Lüftungssysteme zu erhalten, wurde zu Beginn die Definition der dezentralen Lüftungsanlage und der dezentrale Zuluft- und zentralen Abluftanlage formuliert. Danach wurden die Merkmale der Lufterneuerung einer zentralen und einer dezentralen Lüftungsanlage untersucht. Aus diesen Merkmalen konnten in einem nächsten Schritt die Kriterien für den Vergleich abgeleitet werden. Anschliessend wurde das Vergleichstool in einem stetigen Prozess erarbeitet. Dabei mussten immer wieder Recherchen und Abklärungen vorgenommen werden. Nachdem die Berechnungen der Kriterien standen, konnten die Bewertungsraster erarbeitet und die Kriterien bewertet werden. Als nächstes wurde die Präferenzmatrix der Kriterien erstellt. In einem weiteren Schritt wurde die Nutzwertanalyse erarbeitet. Anhand der Bewertung der Kriterien sowie der Präferenzmatrix konnte schlussendlich mit der Nutzwertanalyse eine Empfehlung für ein Lüftungssystem abgegeben werden. Mit einer Sensitivitätsanalyse wurde zum Schluss die Empfindlichkeit des Resultats der Nutzwertanalyse in Bezug auf die ökonomischen Berechnungen untersucht. Der gesamte Prozess wurde durch das Dozententeam begleitet und die Arbeit in verschiedenen Besprechungen kritisch hinterfragt.

3.2 Systemgrenzen

Das erarbeitete Vergleichstool kann bei Verwaltungsbauten geringer und mittlerer Höhe (bis 30 m) eingesetzt werden. Damit das Tool bei Hochhäusern (> 30 m) eingesetzt werden könnte, müsste es mit weiteren Kriterien (z.B. Brandschutz, Raumhöhe) ergänzt werden. Die Luftmenge des Gebäudes muss zwischen 1'000 und 100'000 m³/h liegen und das Gebäude sollte annähernd symmetrisch sein (keine komplexe, ausgefallene Form), weil sonst die Genauigkeit der Berechnungen des Raum- und Flächenbedarfs sowie der Kapitalkosten des Raumbedarfs stark abnimmt und das Resultat verfälscht. Weiter kann die Flexibilität der Raumeinteilung nur berechnet und beurteilt werden, wenn der Anforderungswert an Dauergeräusche im Raum und der Schallleistungspegel im Raum nahe beieinander liegen (Schallleistungspegel maximal ca. 4-8 dB oberhalb des Anforderungswerts an Dauergeräusche).

3.3 Allgemeine Grundlagen

Für den Vergleich der beiden Lüftungssysteme sind verschiedene grundlegende Angaben notwendig. Einige Werte konnten vom Bachelor+-Projekt der Gruppe B (vgl. Kapitel 3.4) übernommen werden. Andere mussten bei Herstellern / Lieferanten angefragt oder basierend auf Normen, Richtlinien und Skripten festgelegt werden. Wenn keine Grundlagen vorhanden waren, wurden Annahmen oder Abschätzungen getroffen. Die Annahmen und Abschätzungen wurden während dem Semester in Besprechungen diskutiert, kritisch hinterfragt und wenn notwendig angepasst.

Die Energiebezugsfläche des Gebäudes von 1'173 m², die Geschosshöhe von 3.1 m, die lichte Raumhöhe von 2.8 m und die Luftmenge der Lüftungsanlage von 8'500 m³/h wurden vom Grundlagenprojekt übernommen. Da im Untergeschoss keine Lüftungsanlage vorgesehen ist, wurden für den Vergleich nur die oberen drei Geschosse betrachtet. Bei der Raumakustik wurde für den Richtfaktor aufgrund der Platzierung der Lüftungsgeräte (bei Raumkante) ein Wert von 4 berücksichtigt (Odermatt, 2021). Die Nutzung Büro wird gemäss SIA 181 (SIA, 2020) in die mittlere Lärmempfindlichkeit eingestuft. Da der Anforderungswert für Dauergeräusche bei dieser Lärmempfindlichkeit mit den dezentralen Lüftungs- und Zuluftgeräten nicht erreicht werden kann, wurde der Anforderungswert für Dauergeräusche auf 33 dB festgelegt. Dies entspricht einer geringen Lärmempfindlichkeit. Für den Abstand der Lärmquelle zum Messpunkt wurden 1.5 m angenommen und die Nachhallzeit des Raumes wurde mit 0.6 s berücksichtigt (Odermatt, 2021).

Heizung / Kälte / Strom

Die Heiz- und Kälteenergiekosten wurden auf 0.00 Fr./kWh festgelegt, weil im Grundlagenprojekt die Serverabwärme zum Heizen und das Grundwasser zum Kühlen verwendet wird. Deshalb beträgt auch der Primärenergiefaktor nicht erneuerbar und der Treibhausgas-Emissionsfaktor für die Heizung und die Kälte jeweils 0 kWh/kWh resp. 0 kg/kWh. Die Stromenergiekosten wurden mit 0.20 Fr./kWh angenommen. Für den Primärenergiefaktor nicht erneuerbar und den Treibhausgas-Emissionsfaktor des Stromes wurden die Werte des CH-Verbrauchermix aus der Liste der Ökobilanzdaten (KBOB, 2016) verwendet. Der Wert beträgt für den Primärenergiefaktor nicht erneuerbar 2.52 kWh/k Wh und für den Treibhausgas-Emissionsfaktor 0.102 kg/kWh.

Ökonomie

Für sämtliche ökonomischen Berechnungen ist ein Kapitalzins von 1 % berücksichtigt. Die allgemeine Preissteigerung und die Energiepreissteigerung sind jeweils mit 2 % einkalkuliert. Die technische Lebensdauer der Lüftungsgeräte wurde anhand der SIA 382/1 (SIA, 2014) auf 20 Jahre geschätzt und die technische Lebensdauer der Gebäudestruktur gemäss der SIA 2040 (SIA, 2017) auf 60 Jahre festgelegt. Für die Baukosten des Raumbedarfs der Lüftungsanlagen wurden 500 Fr./m³ angenommen. Der Stundenansatz für die Installation der Lüftungsgeräte sowie deren Wartung und Unterhalt wurde mit 90 Fr./h berücksichtigt.

Brüstungslüftungsgeräte

Die Anzahl der Brüstungslüftungsgeräte wurde anhand dem Grundlagenprojekt auf 12 Stück festgelegt. Der Bruttopreis sowie der zu erwartende Rabatt der Unternehmer für die Brüstungslüftungsgeräte wurden bei der Firma Trox Hesco angefragt. Der Bruttopreis liegt bei 13'530 Fr./St. und der Rabatt kann für das vorliegende Projekt mit 30 % angenommen werden. Seitens Elektro wurde in Absprache mit dem Dozenten pro Lüftungsgerät 500 Fr./St. für den Starkstromanschluss und 1'000 Fr./St. für die Regulierung einkalkuliert. Für die Installationsdauer der Brüstungslüftungsgeräte wurde 1.5 h/St. geschätzt. Als Lieferfrist für die Brüstungslüftungsgeräte wurden vom Hersteller 26 Wochen angegeben. Gemäss dem Produktdatenblatt der Brüstungslüftungsgeräte (TROX HESCO, 2020) ist das Lüftungsgerät 1.59 m lang, 0.42 m breit und 0.65 m hoch. Der Wirkungsgrad der WRG (Wärmerückgewinnung) liegt bei 60 %, die Ventilatoren weisen einen SFP-Wert SFP 1 auf und der Schallleistungspegel des Lüftungsgerätes liegt beim Auslegungspunkt bei 34 dB. Die graue Energie und die Treibhausgasemissionen für die

Erstellung der Brüstungslüftungsgeräte konnten vom Hersteller nicht angegeben werden, deshalb wurden diese zwei Werte anhand dem Gewicht und der Materialität des Lüftungsgerätes mit Hilfe der Liste der Ökobilanzdaten (KBOB, 2016) abgeschätzt (vgl. Anhang). Die graue Energie liegt bei ca. 1'350 kWh/St. und die Treibhausgasemissionen bei ca. 296 kg/St. pro Brüstungslüftungsgerät. Gemäss dem Grundlagenprojekt liegt der Heizenergiebedarf für die Lufterhitzer bei 16'480 kWh/a und der Kälteenergiebedarf für die Luftkühler bei 700 kWh/a. Betreffend der Wartung und dem Unterhalt ist gemäss SWKI VA 104-01 (SWKI, 2019) jährlich ein Filterwechsel und eine Gerätereinigung vorgesehen. Pro Brüstungslüftungsgerät müssen zwei Filter ausgewechselt werden. Die Filterkosten betragen gemäss der Firma Trox Hesco 106 Fr./St pro Filter. Für den Filterwechsel und die Gerätereinigung wurden gesamthaft 20 min pro Brüstungslüftungsgerät geschätzt.

Deckenlüftungsgeräte

Die Anzahl der Deckenlüftungsgeräte liegt gemäss dem Grundlagenprojekt bei 32 Stück. Auch hier wurde der Bruttopreis sowie der Rabatt bei der Firma Trox Hesco angefragt. Der Bruttopreis liegt bei 14'310 Fr./St. und der Rabatt kann wieder mit 30 % angenommen werden. Bei den Deckenlüftungsgeräten wird für Elektro pro Lüftungsgerät 500 Fr./St. für den Starkstromanschluss und 1'000 Fr./St. für die Regulierung einkalkuliert. Die Installationsdauer wird gleich wie bei den Brüstungslüftungsgeräten auf 1.5 h/St. geschätzt. Die Lieferfrist bei den Deckenlüftungsgeräten beträgt 26 Wochen. Das Deckenlüftungsgerät weist gemäss Produktdatenblatt (TROX HESCO, 2021) eine Länge von 1.64 m, eine Breite von 0.8 m und eine Höhe von 0.4 m auf. Der Wirkungsgrad der WRG liegt bei 54 %, die Ventilatoren weisen einen SFP-Wert SFP 1 auf und der Schallleistungspegel des Lüftungsgerätes liegt beim Auslegungspunkt bei 38 dB. Die graue Energie und die Treibhausgasemissionen für die Erstellung der Deckenlüftungsgeräte mussten auch anhand dem Gewicht und der Materialität des Lüftungsgerätes mit Hilfe der Liste der Ökobilanzdaten (KBOB, 2016) abgeschätzt werden (vgl. Anhang). Die graue Energie liegt bei ca. 1'690 kWh/St. und die Treibhausgasemissionen bei ca. 370 kg/St. pro Deckenlüftungsgerät. Gemäss dem Grundlagenprojekt liegt der Heizenergiebedarf für die Lufterhitzer bei 30'820 kWh/a und der Kälteenergiebedarf für die Luftkühler bei 1'300 kWh/a. Für die Wartung und den Unterhalt wurde auch bei den Deckenlüftungsgeräten ein jährlichen Filterwechsel und eine Gerätereinigung gemäss SWKI VA 104-01 (SWKI, 2019) berücksichtigt. Pro Deckenlüftungsgerät sind zwei Filter auszuwechseln, welche gemäss der Firma Trox Hesco 95 Fr./St. pro Filter kosten. Für den Filterwechsel und die Gerätereinigung wurden gesamthaft 20 min pro Deckenlüftungsgerät geschätzt.

Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte

Der Stromenergiebedarf der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte liegt bei 2'500 kWh/a. Bei der Umwälzpumpen der Heizungs- und Kälteanlage liegt der Stromenergiebedarf bei 800 kWh/a. Die Aussenhülle des Gebäudes wird pro Brüstungs- und Deckenlüftungsgerät jeweils zweimal perforiert (Aussenluft und Fortluft).

Dezentrale Zuluftanlage

Die Anzahl der dezentralen Zuluftgeräte wurde von der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte aus dem Grundlagenprojekt abgeleitet. Da ein dezentrales Zuluftgerät nur etwa einen Drittel der Luftmenge der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte aufweist, musste die dreifache Anzahl Zuluftgeräte, also 132 Stück, für den Vergleich berücksichtigt werden. Das dezentrale Zuluftgerät setzt sich aus der

Airbox (Zuluftgerät) und der Instabox (Installations- und Schallschutzset) zusammen. Die Airbox wird in die Instabox integriert. Der Bruttopreis sowie der zu erwartende Rabatt der Unternehmer für die dezentralen Zuluftgeräte wurden bei der Firma Wesco angefragt. Der Bruttopreis der dezentralen Zuluftgeräte liegt bei 2'500 Fr./St., der Bruttopreis der Instabox bei 650 Fr./St. und der Rabatt kann für das vorliegende Projekt mit 30 % angenommen werden. In Absprache mit dem Dozenten wird pro dezentralem Zuluftgerät seitens Elektro für den Starkstromanschluss 500 Fr./St. und für die Regulierung 600 Fr./St. berücksichtigt. Da die dezentralen Zuluftgeräte zwar grösser aber viel leichter als die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte sind, wird pro Zuluftgerät eine Installationsdauer von 1.0 h/St. geschätzt. Die Lieferfrist beträgt gemäss Lieferant zurzeit 43 Wochen. Die Instabox mit integrierter Airbox ist gemäss der Lieferantenbroschüre (WESCO, 2014) 1.5 m lang, 0.8 m breit und 0.12 m hoch. Anhand der Lieferantenangaben wurde für den Ventilator ein SFP-Wert SFP 1 berechnet und der Schallleistungspegel des dezentralen Zuluftgerätes beim Auslegungspunkt auf 32 dB geschätzt (vgl. Anhang). Vom Lieferanten konnten keine Angaben zu der grauen Energie und den Treibhausgasemissionen für die Erstellung pro dezentralem Zuluftgerät gemacht werden. Deshalb wurden diese zwei Werte anhand dem Gewicht und der Materialität der Instabox und der Airbox mit Hilfe der Liste der Ökobilanzdaten (KBOB, 2016) abgeschätzt (vgl. Anhang). Die graue Energie liegt bei ca. 390 kWh/St. und die Treibhausgasemissionen bei ca. 88 kg/St. pro dezentralem Zuluftgerät. Für die Wartung und den Unterhalt der dezentralen Zuluftgeräte ist gemäss SWKI VA 104-01 (SWKI, 2019) jährlich ein Filterwechsel und eine Gerätereinigung zu berücksichtigen. Das Zuluftgerät verfügt über einen Filter. Die Filterkosten belaufen sich gemäss der Firma Wesco auf 30 Fr./St. pro Filter. Für den Filterwechsel und die Gerätereinigung wurden gesamthaft 15 min pro dezentralem Zuluftgerät geschätzt.

Zentrale Abluftanlage

Aufgrund des Grundlagenprojekts wurde eine zentrale Abluftanlage mit einer Luftmenge von 8'500 m³/h berücksichtigt. Diese Luftmenge wird für die Berechnungen anschliessend auf die 3 Geschosse, 2 Geschossabgänge und 6 Raumabgänge pro Geschossabgang aufgeteilt. Die Anzahl der Geschossabgänge und Raumabgänge pro Geschossabgang wurden anhand des Grundlagenprojekts abgeschätzt. Die Geschossabgänge wurden mit 15 m und die Raumabgänge mit 6 m berücksichtigt. Der totale Druckverlust der zentralen Abluftanlage wurde anhand der SIA 382/1 (SIA, 2014) auf 300 Pa geschätzt (einfache Abluftanlage mit Abwärmenutzung). Mit Hilfe dem Merkblatt 24 Luftförderung (Topmotors, 2021) wurde der Wirkungsgrad des Ventilators auf 60 %, der Wirkungsgrad des Antriebs auf 97 %, der Wirkungsgrad des Motors auf 78 % und der Wirkungsgrad der Regulierung auf 90 % abgeschätzt. Für die graue Energie und die Treibhausgasemissionen der zentralen Abluftanlage wurden die spezifischen Werte einer Abluftanlage ohne WRG gemäss der Rechenhilfe SIA 2040 Effizienzpfad (SIA, 2021) eingesetzt. Dort wird die graue Energie mit 0.50 kWh/a*m^2_{EBF} und die Treibhausgasemissionen mit 0.12 kg/a*m^2_{EBF} ausgewiesen. Für die Wartung und den Unterhalt der zentralen Abluftanlage ist gemäss SWKI VA 104-01 (SWKI, 2019) jährlich ein Filterwechsel und eine Gerätereinigung vorgesehen. Das zentrale Abluftgerät verfügt über einen Filter, welcher schätzungsweise 500 Fr./St. kostet. Für den Filterwechsel und die Gerätereinigung wurden gesamthaft 4 h pro zentraler Abluftanlage geschätzt. Der Schallleistungspegel der Ablufteinlässe wurde auf 30 dB geschätzt.

Zur Ermittlung der Kosten der zentralen Abluftanlage wurden spezifische Kosten von Komponenten verwendet. Die spezifischen Kosten der Komponenten basieren auf Erfahrungswerten. Da diese spezifischen Kosten für eine Zu- und Abluftanlage sind, mussten sie reduziert werden. Hierbei wurde ange-

nommen, dass die Zu- und Abluftseite je 50 % der gesamten Kosten ausmachen. Zu den spezifischen Kosten der Schalldämpfer waren keine Angaben zu finden. Die spezifischen Kosten der Schalldämpfer wurden auf 30 % der spezifischen Kosten der Armaturen geschätzt. Die technischen Lebensdauern der Komponenten wurden anhand der SIA 382/1 (SIA, 2014) festgelegt. Die Lieferfristen der Komponenten wurden abgeschätzt. Die spezifischen Kosten, die technische Lebensdauer und die Lieferfristen der Komponenten sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Für den Vergleich wurde jeweils ein Starkstromanschluss und ein Elektrosteuerschrank berücksichtigt. Die Datenpunkte wurden anhand des Grundlagenprojekts auf 46 Stück geschätzt.

Tabelle 1: Spezifische Kosten, technische Lebensdauer und Lieferfristen der Komponenten der zentralen Abluftanlage

Komponenten	**Spezifische Kosten**	**Technische Lebensdauer**	**Lieferfristen**
Abluftgerät inkl. WRG, Filter	5.00 Fr./m³/h	20 Jahre	12 Wochen
Kanäle	3.00 Fr./m³/h	30 Jahre	6 Wochen
Armaturen (inkl. Schalldämpfer)	1.00 Fr./m³/h	20 Jahre	1 Woche
nur Schalldämpfer	0.30 Fr./m³/h	20 Jahre	
Regel- und Sicherheitsorgane	0.50 Fr./m³/h	15 Jahre	1 Woche
Starkstromanschluss	1'000 Fr./St.	20 Jahre	
Elektrosteuerschränke	10'000 Fr./St.	20 Jahre	12 Wochen
Regulierung (anhand Datenpunkte)	500 Fr./DP	20 Jahre	

Die Montagezeiten der Komponenten der zentralen Abluftanlage wurden aufgrund von Erfahrungswerten festgelegt. Die Formstücke des Kanalsystems sind mit einem Formstückzuschlag berücksichtigt. Es ist ein zentrales Abluftgerät und eine Fortluftführung mit Regenhut einkalkuliert. Für die zentrale Abluftanlage wurden 36 Lufteinlässe und ein Kanalsystem von 306 m abgeschätzt. Die Montagezeiten der Komponenten der zentralen Abluftanlage sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Montagezeiten der Komponenten der zentralen Abluftanlage

Komponenten	**Montagezeiten**
Abluftgerät	4.0 h/St.
Regenhut	1.5 h/St.
Lufteinlass	0.3 h/St.
Kanäle	0.5 h/m (durchschnittliche Montagezeit)
Zuschlag für Formstückinstallation	20 % von Montagezeit Kanäle

Dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Der Wirkungsgrad der WRG der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurde mit 70 % angenommen. Der Heiz- und Kälteenergiebedarf der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurde anhand der Heiz- und Kälteenergie der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte abgeschätzt. Hierzu wurde über den Wirkungsgrad der WRG der gesamte Heiz- und Kälteenergiebedarf (Energiebedarf des Lufterhitzers / Luftkühlers und der WRG) berechnet. Dieser Wert konnte anschliessend mit dem Wirkungs-

grad der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage multipliziert werden. Dies ergab einen Heizenergiebedarf von 32'460 kWh/a und einen Kälteenergiebedarf von 1'370 kWh/a. Der Stromenergiebedarf der dezentralen Zuluftgeräte wurde auf 1'584 kWh/a und der Stromenergiebedarf der zentralen Abluftanlage auf 2'081 kWh/a geschätzt. Der Stromenergiebedarf der Umwälzpumpen der Heizungs- und Kälteanlage wurde von der dezentralen Lüftungsanlage übernommen und beträgt 800 kWh/a. Die Berechnungen des Heiz- und Kälteenergiebedarf sowie des Stromenergiebedarfs der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage sind im Anhang beigelegt. Die Aussenhülle des Gebäudes wird pro dezentralem Zuluftgerät (Aussenluft) und zentraler Abluftanlage (Fortluft) einmal perforiert.

3.4 Bachelor+-Projekt der Gruppe B



Abbildung 1: Visualisierung des Bachelor+-Projekts (Agugliaro et al., 2022)

Als Grundlage für die vorliegende Bachelorthesis dient die im Rahmen des Bachelor+ im Modul IP2 erarbeitete Projektarbeit der Gruppe B (Agugliaro et al., 2022). Beim Projekt handelt es sich um einen Um- / Neubau des bestehenden Werkstattgebäudes auf dem Areal der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf, Kanton Zürich. Der Neubau wird mittels einer Pfahlbaukonstruktion über den Bestand gebaut und als Holz-Skelettbauweise realisiert. Das bestehende Werkstattgebäude wird umgebaut und kann durch die Pfahlkonstruktion des Neubaus zu einem grossen Teil erhalten werden. Das Projekt "Werk-Atelier" verfügt über vier Geschosse, wobei das Untergeschoss und das Erdgeschoss einen ebenerdigen Zugang haben (vgl. Abbildung 1). Das Untergeschoss wird für die Server, die gebäudetechnischen Anlagen und für die Autowerkstatt sowie deren Lager genutzt. Im Erdgeschoss sind diverse Werkstattnutzungen vorgesehen. Für das 1. Obergeschoss ist eine Büronutzung und für das 2. Obergeschoss eine Büronutzung mit Cafeteria angedacht. Die Nutzungen werden mit dezentralen Lüftungsanlagen gelüftet. Hierzu sind in den unteren Geschossen Deckenlüftungsgeräte und im 2. Obergeschoss Brüstungslüftungsgeräte geplant. Die Nutzungen werden über die Lüftungsanlagen im Winter geheizt und im Sommer gekühlt. Als Wärmequelle für die Heizung wird die Abwärme der Server verwendet. Die Raumkühlung und die Kühlung der Server erfolgen über das Grundwasser.

4 DEFINITION LÜFTUNGSSYSTEME

Im Rahmen der Bachelorthesis wird eine dezentrale Lüftungsanlage und eine dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage miteinander verglichen. Nachfolgend werden die beiden Lüftungssysteme erklärt und die Funktionsweise aufgezeigt. Sämtliche anderen Lüftungssysteme (z.B. Fensterlüftung, zentrale Lüftungsanlage etc.) sind nicht Teil der Bachelorthesis und werden deshalb auch nicht erläutert.

4.1 Dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage werden sämtliche Räume mit einem oder mehreren dezentralen Lüftungsgeräten ausgestattet und unabhängig von den anderen Räumen gelüftet (vgl. Abbildung 2). Bei den Lüftungsgeräten handelt es sich um Kompaktgeräte, welche sämtliche für den Luftaustausch notwendigen Komponenten (Ventilatoren, Luftfilter, Lufterhitzer / Luftkühler, WRG, Schalldämpfer etc.) enthalten. Sowohl die Zuluft als auch die Abluft erfolgt über die Lüftungsgeräte, welche dezentral in den Räumen platziert sind. Mit diesem Lüftungssystem kann auf eine zentrale Lüftungsanlage mit Lüftungskanälen, Steigschächten, Armaturen und Luftdurchlässen verzichtet werden.

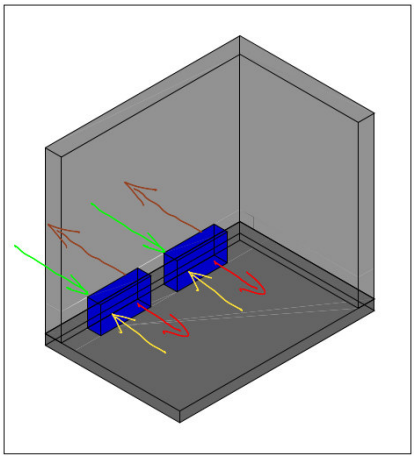


Abbildung 2: Dezentrale Lüftungsanlage

Funktionsweise:
Die Aussenluft wird über die Fassade angesaugt und zum dezentralen Lüftungsgerät geführt. Dort durchströmt sie die Aussenluftklappe, den Aussenluftfilter und wird anschliessend je nach Situation über die WRG oder den WRG-Bypass geführt. Bevor die Zuluft über den Schalldämpfer in den Raum einströmt, wird sie bei Bedarf in einem Wärmeübertrager erwärmt oder abgekühlt. Die Abluft des Raumes wird beim Lüftungsgerät angesaugt. Sie strömt zuerst über den Schalldämpfer, bevor sie danach den Abluftfilter, die WRG und die Fortluftklappe durchströmt. Anschliessend wird die Fortluft über die Fassade nach draussen geführt. Die Aussenluftfassung und die Fortluftführung sind so platziert, dass kein Kurzschluss zwischen den beiden entstehen kann. Wenn die Raumluftqualität genügend hoch ist, wird die Aussenluftklappe geschlossen und das Lüftungsgerät im Umluftbetrieb betrieben (TROX HESCO, 2020).

4.2 Dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

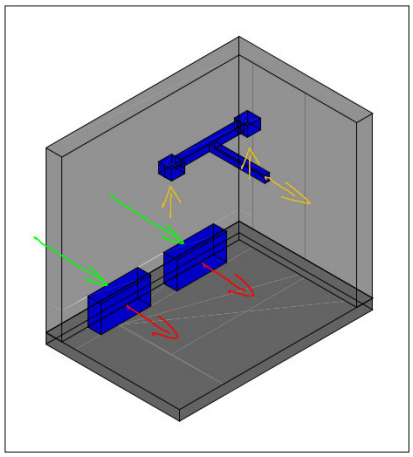


Abbildung 3: Dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wird die Zuluft dezentral mit einem oder mehreren Zuluftgeräten in die Räume eingebracht. Die Abluft wird anschliessend über Lufteinlässe in den Räumen gefasst und über die zentrale Abluftanlage abgeführt (vgl. Abbildung 3). Bei den Zuluftgeräten handelt es sich um Kompaktgeräte, welche über einen Ventilator, Luftfilter, einen Lufterhitzer / Luftkühler und einen Schalldämpfer verfügen. Der Monoblock der Abluftanlage wird in der Lüftungszentrale disponiert und verfügt über einen Ventilator, Abluftfilter, Wärmetauscher für die Wärmerückgewinnung und einen Schalldämpfer. Mit dem Wärmetauscher in der Abluftanlage kann die Wärme der Abluft zurückgewonnen werden. Im Gegensatz zu der dezentralen Lüftungsanlage wird bei diesem Lüftungssystem eine zentrale Abluftanlage mit Lüftungskanälen, Steigschächten, Armaturen und Luftdurchlässen benötigt. Dafür ist nur ein einfaches dezentrales Zuluftgerät zu installieren.

Funktionsweise:
Die Aussenluft wird über die Fassade angesaugt und zum dezentralen Zuluftgerät geführt. Dort durchströmt sie die Aussenluftklappe und den Aussenluftfilter. Danach wird die Luft über einen Wärmeübertrager geführt und bei Bedarf erwärmt oder abgekühlt, bevor sie über den Schalldämpfer als Zuluft dem Raum zugeführt wird (WESCO, 2014). Die Abluft des Raumes wird bei den Lufteinlässen gefasst und über ein Kanalsystem zum Monoblock in der Lüftungszentrale befördert. Nachdem die Abluft den Schalldämpfer durchströmt hat, wird sie über einen Abluftfilter und einen Wärmetauscher für die Wärmerückgewinnung geführt. Danach wird die Fortluft über Dach abgeführt. Der Wärmetauscher wird in ein Kreislaufverbundsystem integriert. Im Winter kann der Wärmetauscher als Wärmequelle für eine Wärmepumpe genutzt und die Wärme in die Heizungsanlage eingespiesen werden. Im Sommer kann der Wärmetauscher als Rückkühler für eine Kältemaschine genutzt werden, welche die Kälteanlage versorgt.

5 MERKMALE LUFTERNEUERUNG

Damit in einem nächsten Schritt die Kriterien für den Vergleich der dezentralen Lüftungsanlage und der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlagen bestimmt werden konnten, wurden die Merkmale der Lufterneuerung einer zentralen und einer dezentralen Lüftungsanlage untersucht. Durch die strikte Differenzierung der beiden Lüftungsanlagen (zentral / dezentral) sind Unterschiede sowie Ähnlichkeiten bei den Merkmalen leichter erkennbar und die Kriterien lassen sich daraus besser ableiten. Die Merkmale wurden anhand von Herstellerangaben, Erfahrungswerten und Abschätzungen beurteilt. Die Raumluftqualität wurde ausgeklammert, da sie unabhängig von der Lüftungsanlage zwingend zu erreichen ist. In der folgenden Tabelle 3 sind die Merkmale der Lufterneuerung sowie deren Beurteilung für die zentrale und die dezentrale Lüftungsanlage aufgeführt.

Tabelle 3: Merkmale Lufterneuerung von zentralen und dezentralen Lüftungsanlagen

Merkmal	**zentrale Lüftungsanlage**	**dezentrale Lüftungsanlage**
Aussenluftfassung	in Umgebung / an Fassade	an Fassade
Erdregistervorwärmung	möglich	nicht möglich
Fortluftführung	über Fassade / Dach	über Fassade
Eingriff in Fassade	gering	gross
Platzbedarf Lüftungsgeräte	gross (ein Lüftungsgerät mit grösserem Platzbedarf)	mittel (mehrere Lüftungsgeräte mit geringem Platzbedarf)
Platzbedarf Lüftungskanäle / -rohre	gross	sehr gering
Platzbedarf Steigschächte	gross	keine Steigschächte
Installationsaufwand Lüftungsgeräte	mittel	hoch
Installationsaufwand Lüftungskanäle / -rohre	hoch	gering
Luftauslässe / -einlässe	separate Ein- / Auslässe	in Lüftungsgerät integriert
Materialaufwand	hoch	gering
minimal notwendige Raumhöhe	ja, für Lüftungsinstallation	Nein, bei Brüstungsgeräten Ja, bei Deckengeräten
flexible Raumeinteilung	begrenzt möglich (Planung der Ein- / Auslässe)	begrenzt möglich (Planung der Disposition und Anzahl Geräte)
Erweiterbar	begrenzt möglich	möglich
Brandschutz	grosser Einfluss	mittlerer Einfluss
Ausführung Lüftungsgeräte	individuell nach Bedarf	Standardmodelle
Regulierung	übergreifende Regulierung (Raum- / Zonenregulierung notwendig)	unabhängige Regulierung je Lüftungsgerät
Wärmerückgewinnung (WRG)	möglich	möglich

Wirkungsgrad WRG	hoch (> 70 %)	mittel (ca. 50 - 60 %)
Lufterhitzung	möglich	möglich
Luftkühlung	möglich	möglich
Luftbeförderung (Ventilator)	möglich	möglich
Luftfilterung	möglich	begrenzt möglich (Standardfilter)
Luftbefeuchtung	möglich	nicht möglich
Luftentfeuchtung	möglich	begrenzt möglich
Druckverlust	hoch	gering
Ventilatorleistung	hoch	gering
Schallemissionen nach aussen	hoch (Schalldämpfer notwendig)	gering
Schallemissionen zum Raum	mittel, Risiko von Telefonie (Schalldämpfer notwendig)	hoch, Schall von Lüftungsgeräte (Schalldämmmassnahmen bei Lüftungsgerät notwendig)
Wartung	durch Fachmann	durch Betreiber / Nutzer
Hygienereinigung	hoher Aufwand	geringer Aufwand
Kapitalkosten	hoch	mittel
Energiekosten Strom	mittel	gering
Energiekosten Wärme	mittel	hoch
Wartungs- / Unterhaltskosten	gering	mittel
graue Energie	hoch	mittel
Treibhausgasemissionen	hoch	mittel

Bei der Betrachtung der Merkmale und deren Beurteilung fällt auf, dass sich die zentrale und dezentrale Lüftungsanlage bei verschiedenen Merkmalen teilweise erheblich unterscheiden. So ist zwar der Eingriff in die Fassade bei der zentralen Lüftungsanlage kleiner als bei der dezentralen Lüftungsanlage. Dafür weist die zentrale Lüftungsanlage einen grösseren Platzbedarf sowie Installations- und Materialaufwand auf. Bei der Ausführung der Lüftungsgeräte ist man bei der dezentralen Lüftungsanlage auf Standardmodelle beschränkt, wohingegen bei der zentralen Lüftungsanlage individuelle Lüftungsgeräte konzipiert und eingesetzt werden können. Aufgrund des grösseren Druckverlustes wird jedoch bei der zentralen Lüftungsanlage eine grössere Ventilatorleistung benötigt, wodurch auch der Stromverbrauch höher liegt als bei der dezentralen Lüftungsanlage. Im Raum hat die zentrale Lüftungsanlage dafür einen grossen Vorteil gegenüber der dezentralen Lüftungsanlage, weil sich die Hauptschallquelle der Lüftungsanlage (Ventilatoren) im Monoblock in der Lüftungszentrale befindet und die Schallemissionen mit geringen Schallschutzmassnahmen (Schalldämpfer) reduziert werden können. Bei der dezentralen Lüftungsanlage hingegen sind die Ventilatoren in den Lüftungsgeräten in den Räume, was zu erhöhten Schallemissionen führt und höhere Schallschutzmassnahmen notwendig macht. Der Brandschutz hat je nach Gebäudehöhe (mittlere Höhe, Hochhaus) einen kleineren oder grösseren Einfluss auf die dezentrale Lüftungsanlagen. Der Einfluss ist jedoch geringer als bei der zentralen Lüftungsanlage. Dafür ist der Wartungs- und Unterhaltsaufwand bei der dezentralen Lüftungsanlage grösser, da mehr Lüftungsgeräte installiert und gewartet werden müssen. Zudem liegen die Lüftungsgeräte weiter auseinander. Auch bei den Kosten sind Unterschiede zu erkennen. Es kann angenommen werden, dass die Kapitalkosten bei

der zentralen Lüftungsanlage höher liegen als bei der dezentralen Lüftungsanlage. Weiter sind die Energiekosten für den Strom bei der zentralen Lüftungslage sehr wahrscheinlich höher, weil der Ventilator einen grösseren Druckverlust überwinden muss. Dafür weist die dezentrale Lüftungsanlage höhere Energiekosten bezüglich Wärme auf, weil die Wärmerückgewinnung der dezentralen Lüftungsgeräte einen schlechteren Wirkungsgrad aufweist. Zudem sind die Wartungs- und Unterhaltskosten bei der dezentralen Lüftungsanlage grösser, was wiederum mit den Anzahl Lüftungsgeräten und deren Komponenten zusammenhängt. Bei der grauen Energie und den Treibhausgasemissionen wird geschätzt, dass die zentrale Lüftungsanlage aufgrund des Kanalsystem und den restlichen Komponenten schlechter abschneidet als die dezentrale Lüftungsanlage.

6 KRITERIEN

Aus den Merkmalen der Lufterneuerung konnten in einem nächsten Schritt die Kriterien für den Vergleich der beiden Lüftungssysteme abgeleitet werden. Für den Vergleich sind hauptsächlich die Merkmale relevant, bei welchen sich die zentrale und die dezentrale Lüftungsanlage unterscheiden. Von den aufgeführten Merkmalen in der Tabelle 3 wurden bis auf die Erdregistervorwärmung, die minimale notwendige Raumhöhe, die Erweiterbarkeit sowie die Luftbefeuchtung und Luftentfeuchtung sämtliche Merkmale direkt als Kriterium oder indirekt in einem Kriterium berücksichtigt.
Da bei beiden Lüftungssystemen die Aussenluft über die Fassade gefasst wird, wurde die Erdregistervorwärmung nicht berücksichtigt. Die minimale notwendige Raumhöhe wurde nicht einbezogen, da auch eine minimale Raumhöhe für die Deckenlüftungsgeräte der dezentralen Lüftungsanlage notwendig ist und somit die minimale Raumhöhe für die dezentrale Lüftungsanlage sowie die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage etwa gleich ist. Die Erweiterbarkeit wurde vernachlässigt, weil der Aufwand für eine allfällige Erweiterung bei beiden Lüftungssystemen ähnlich ist. Die Luftbefeuchtung und die Luftentfeuchtung wurden nicht berücksichtigt, weil im Bachelor+-Projekt weder eine Luftbefeuchtung noch eine Luftentfeuchtung eingesetzt wird.

Die Kriterien wurden zur besseren Übersicht in die drei Aspekte Kosten, Qualität und Zeit eingeteilt. Nachfolgend wird auf die Kriterien eingegangen und aufgezeigt, welche Berechnungen vorgenommen und welche Daten sowie Formeln verwendet wurden. Als Grundlage für sämtliche Berechnungen dienten die allgemeinen Grundlagen (vgl. Kapitel 3.3) und das Bachelor+-Projekt der Gruppe B (vgl. Kapitel 3.4). Bei jedem Kriterium wurde eine separate Berechnung für die dezentrale Lüftungsanlage und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage durchgeführt. Um den Überblick zu gewährleisten, werden am Anfang die gemeinsamen Daten aufgezeigt. Danach wird jeweils die Berechnung der dezentralen Lüftungsanlage erklärt und anschliessend auf die Berechnung der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage eingegangen.

6.1 Aspekt Kosten

Unter dem Aspekt Kosten wurden die Kapitalkosten für die Erstellung, den Raumbedarf und den Schallschutz gegen Anlagegeräusche der Lüftungsanlagen angeschaut. Weiter wurden die Betriebskosten sowie die Wartungs- und Unterhaltskosten der Lüftungsanlagen betrachtet. Die Kosten bilden nicht die gesamten Kosten gemäss einer Kostenschätzung ab sondern nur die Kosten der zum Vergleich notwendigen Komponenten. Sowohl die Kapitalkosten, die Betriebskosten als auch die Wartungs- und Unterhaltskosten wurden anhand der Annuitätenmethode berechnet. Zur Berechnung wurden folgende Formeln aus dem Skript Wirtschaftlichkeitsberechnungen (Prof. Rieder & Felder, 2012) verwendet:

Annuitätsfaktor

$$a = \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$ Formel 1

a = Annuitätsfaktor [-] i = Kapitalzins [-]
n = technische Lebensdauer [Jahre]

Mittelwertfaktor

Wenn i ≠ e $m = \frac{(1+\frac{i-e}{1+e})^n - 1}{(\frac{i-e}{1+e}) * (1+\frac{i-e}{1+e})^n} * a$ Formel 2

Wenn i = e $m = n * a$ Formel 3

i = Kapitalzins [-] e = Preissteigerung [-]
n = technische Lebensdauer [Jahre]

Kapitalkosten

$K = I_o * a$ Formel 4

K = jährliche Kapitalkosten [Fr./a] I_0 = Investitionskosten zum Zeitpunkt 0 [Fr.]
a = Annuitätsfaktor [-]

Betriebs-, Wartungs- und Unterhaltskosten

$A = A_o * m$ Formel 5

A = jährliche durchschnittliche Betriebs-, Wartungs- und Unterhaltskosten [Fr./a] A_0 = jährliche Betriebs-, Wartungs- und Unterhaltskosten zum Zeitpunkt 0 [Fr./a]
m = Mittelwertfaktor [-]

6.1.1 Erstellung

Beim Kriterium Erstellung wurden die jährlichen Kapitalkosten der Lüftungskomponenten und deren Installation betrachtet. Neben den Lüftungskomponenten wurden auch die Kapitalkosten der Elektroinstallation und der Regulierung der Lüftungsanlagen einbezogen. Für die Beurteilung des Kriteriums wurden die jährlichen Kapitalkosten am Ende durch die Energiebezugsfläche geteilt.

dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurde aus den Bruttopreisen und dem Rabatt des Unternehmers für die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte der Nettopreis je Brüstungs- und Deckenlüftungsgerät bestimmt. Zusätzlich wurden die Kosten für den Starkstromanschluss und die Regulierung je Lüftungsgerät berücksichtigt. Gemeinsam mit der Installationsdauer und dem Stundenansatz für die Installation der Lüftungsgeräte konnten danach die Investitionskosten je Lüftungsgerät ermittelt werden. Als nächstes wurden die gesamten Investitionskosten der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte anhand der Anzahl Lüftungsgeräte berechnet. Mit dem festgelegten Kapitalzins und der technischen Lebensdauer der Lüftungsgeräte wurde anschliessend der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) berechnet. Danach konnten die jährlichen Kapitalkosten der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte (vgl. Formel 4) berechnet und daraus die gesamten jährlichen Kapitalkosten der dezentralen Lüftungsanlage gebildet werden. Diese betragen 23.90 Fr./a*m^2_{EBF}.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluftanlage wurde anhand des Bruttopreises und dem Rabatt des Unternehmers der Nettopreis je Zuluftgerät ermittelt. Weiter wurden die Kosten für den Starkstromanschluss und die

Regulierung je Zuluftgerät einbezogen. Mit diesen Daten und der Installationsdauer sowie dem Stundenansatz für die Installation der Zuluftgeräte wurden in einem nächsten Schritt die Investitionskosten je Zuluftgerät berechnet. Anschliessend konnte mit der Anzahl der Zuluftgeräte die gesamten Investitionskosten der Zuluftgeräte ermittelt werden. Anhand des festgelegten Kapitalzinses und der technischen Lebensdauer der Lüftungsgeräte wurde danach der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) und die jährlichen Kapitalkosten der dezentralen Zuluftanlage (vgl. Formel 4) berechnet. Bei der zentralen Abluftanlage wurde anhand der Luftmenge und der spezifischen Kosten der Komponenten die Investitionskosten abgeschätzt. Bei den Kosten der zentralen Abluftanlage wurde das Abluftgerät, die Kanäle, die Armaturen und Regel- sowie Sicherheitsorgane berücksichtigt. Weiter wurde ein Starkstromanschluss, ein Elektrosteuerschrank und die Regulierung in die Berechnung einbezogen. Die Regulierung wurde über Datenpunkte abgeschätzt. Danach wurde der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) je Komponente anhand des festgelegten Kapitalzinses und der technischen Lebensdauer der Komponente berechnet und daraus die jährlichen Kapitalkosten der zentralen Abluftanlage (vgl. Formel 4) ermittelt. Aus den jährlichen Kapitalkosten der dezentralen Zuluftanlage und der zentralen Abluftanlage wurden anschliessend die gesamten jährlichen Kapitalkosten der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage von 23.40 Fr./a*m^2_{EBF} berechnet.

6.1.2 Raumbedarf

Unter dem Kriterium Raumbedarf wurden die jährlichen Kapitalkosten für den Raumbedarf der Lüftungsanlagen angeschaut. Bei der Berechnung des Raumbedarfs der dezentralen Lüftungsanlage sowie der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurde gleich vorgegangen wie im Kriterium Qualität, Flächen- und Raumbedarf. Die Berechnungsschritte für den Raumbedarf sind im Kapitel 6.2.3 erklärt und werden in diesem Kapitel nicht näher erläutert. Für die Beurteilung des Kriteriums wurden die jährlichen Kapitalkosten am Ende durch die Energiebezugsfläche geteilt.

dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurden anhand des Raumbedarfs der dezentralen Lüftungsanlage und den Baukosten des Raumbedarfs der Lüftungsanlagen die Investitionskosten für den Raumbedarf der dezentralen Lüftungsanlage ermittelt. Anschliessend wurde mit dem festgelegten Kapitalzins und der technischen Lebensdauer der Gebäudestruktur der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) berechnet. Mit den Investitionskosten und dem Annuitätsfaktor konnten danach die jährlichen Kapitalkosten für den Raumbedarf der dezentralen Lüftungsanlage (vgl. Formel 4) ermittelt werden. Diese liegen bei 0.20 Fr./a*m^2_{EBF}.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurden die Investitionskosten für den Raumbedarf anhand dem Raumbedarf der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage und den Baukosten des Raumbedarfs der Lüftungsanlagen berechnet. Danach wurde mit dem festgelegten Kapitalzins und der technischen Lebensdauer der Gebäudestruktur der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) ermittelt. Mit den Investitionskosten und dem Annuitätsfaktor konnten anschliessend die jährlichen Kapitalkosten für den Raumbedarf der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage (vgl. Formel 4) berechnet werden. Diese liegen bei 1.60 Fr./a*m^2_{EBF}.

6.1.3 Betrieb

Beim Kriterium Betrieb wurden die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten aufgrund des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs der Lüftungsanlagen betrachtet. Für die Beurteilung des Kriteriums wurden die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten am Ende durch die Energiebezugsfläche geteilt.

dezentrale Lüftungsanlage

Die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Heiz- und Kälteenergiebedarfs wurden separat für die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte ermittelt. Die Ermittlung der jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Stromenergiebedarfs erfolgte für die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte gemeinsam. Der Vorgang für die Berechnung war beim Heiz- und Kälteenergiebedarf sowie beim Stromenergiebedarf derselbe. Für die Heizung wurde der Heizenergiebedarf der Lufterhitzer und für die Kälte der Kälteenergiebedarf der Luftkühler verwendet. Beim Strom wurde der gesamte Stromenergiebedarf der Lüftungsanlage berücksichtigt, welcher sich aus dem Stromenergiebedarf der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte sowie der Umwälzpumpen der Heizungs- und Kälteanlage zusammensetzt. Zuerst wurden die jährlichen Betriebskosten je Energiebedarf anhand der jeweiligen Energiekosten berechnet. Anschliessend wurde mit dem festgelegten Kapitalzins, der Energiepreisteuerung und der technischen Lebensdauer der Lüftungsgeräte der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) und der Mittelwertfaktor (vgl. Formel 2 und 3) ermittelt. Mit Hilfe des Mittelwertfaktors und den jährlichen Betriebskosten konnten danach die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs (vgl. Formel 5) berechnet werden. Die gesamten jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten der dezentralen Lüftungsanlage wurden anschliessend aus den jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs gebildet. Die gesamten jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten der dezentralen Lüftungsanlage betragen 0.70 Fr./a*m^2_{EBF}.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurden die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs gemeinsam über alle dezentralen Zuluftgeräte und das zentrale Abluftgerät berechnet. Dabei wurden die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Heiz- und Kälteenergiebedarfs sowie des Stromenergiebedarfs nach dem gleichen Muster ermittelt. Für die Heizung wurde der Heizenergiebedarf der Lufterhitzer und für die Kälte der Kälteenergiebedarf der Luftkühler der Zuluftgeräte verwendet. Beim Strom wurde der gesamte Stromenergiebedarf der Lüftungsanlage berücksichtigt, welcher sich aus dem Stromenergiebedarf der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage sowie der Umwälzpumpen der Heizungs- und Kälteanlage zusammensetzt. Auch bei dieser Lüftungsanlage wurden die jährlichen Betriebskosten je Energiebedarf anhand der jeweiligen Energiekosten berechnet. Anschliessend wurde erneut mit dem festgelegten Kapitalzins, der Energiepreisteuerung und der technischen Lebensdauer der Lüftungsgeräte der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) und der Mittelwertfaktor (vgl. Formel 2) ermittelt. Mit Hilfe des Mittelwertfaktors und der jährlichen Betriebskosten konnten danach die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs (vgl. Formel 5) berechnet werden. Die gesamten jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurden anschliessend aus den jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs gebildet. Die gesamten jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage liegen bei 0.90 Fr./a*m^2_{EBF}.

6.1.4 Wartung und Unterhalt

Unter dem Kriterium Wartung und Unterhalt wurden die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten der Lüftungsanlagen angeschaut. Diese beinhalten einen jährlichen Filterwechsel und eine jährliche Hygienereinigung der Lüftungsgeräte. Für die Beurteilung des Kriteriums wurden die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten am Ende durch die Energiebezugsfläche geteilt.

dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurde anhand der Anzahl Filter pro Lüftungsgerät, der Filterkosten, der Dauer für den Filterwechsel und die Gerätereinigung sowie dem Stundenansatz für die Wartung und den Unterhalt die jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten je Brüstungs- und Deckenlüftungsgerät ermittelt. Mit dem festgelegten Kapitalzins, der Preissteigerung und der technischen Lebensdauer der Luftfilter wurde danach der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) und der Mittelwertfaktor (vgl. Formel 2 und 3) berechnet. In Abhängigkeit der jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten je Lüftungsgerät, der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte und dem Mittelwertfaktor wurden anschliessend die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte (vgl. Formel 5) ermittelt. Daraus konnten danach die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten der dezentralen Lüftungsanlage gebildet werden. Diese betragen 8.60 Fr./a*m^2_{EBF}.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurde anhand der Anzahl Filter pro Lüftungsgerät, der Filterkosten, der Dauer für den Filterwechsel und die Gerätereinigung sowie dem Stundenansatz für die Wartung und den Unterhalt die jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten je Zuluft- und Abluftgerät ermittelt. Mit dem festgelegten Kapitalzins, der Preissteigerung und der technischen Lebensdauer der Luftfilter wurde anschliessend der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) und der Mittelwertfaktor (vgl. Formel 2 und 3) berechnet. Danach wurde anhand der jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten je Zuluftgerät, der Anzahl Zuluftgeräte und dem Mittelwertfaktor die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten der dezentralen Zuluftanlage (vgl. Formel 5) ermittelt. Die jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten der zentralen Abluftanlage wurde anhand der jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten je Abluftgerät, der Anzahl Abluftgeräte und dem Mittelwertfaktor (vgl. Formel 5) berechnet. Daraus konnten anschliessend die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage gebildet werden. Diese betragen 6.70 Fr./a*m^2_{EBF}.

6.1.5 Akustik, Schallschutz

Beim Kriterium Akustik, Schallschutz wurden die jährlichen Kapitalkosten für den Schallschutz gegen Anlagegeräusche der Lüftungsanlage betrachtet. Ausserhalb der Lüftungsanlagen wurden keine weiteren Schallschutzmassnahmen berücksichtigt. Für die Beurteilung des Kriteriums wurden die jährlichen Kapitalkosten am Ende durch die Energiebezugsfläche geteilt.

dezentrale Lüftungsanlage

Da es sich bei den dezentralen Lüftungsgeräten um Kompaktgeräte handelt, sind die Lüftungsgeräte gemäss Hersteller bereits schallschutztechnisch optimiert. Der Hersteller der Lüftungsgeräte bietet deshalb keine zusätzlichen Schallschutzmassnahmen an. Die gesamten jährlichen Kapitalkosten der Schallschutzmassnahmen der dezentralen Lüftungsanlage liegen somit bei 0.00 Fr./a*m^2_{EBF}.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluftanlage wurde anhand des Bruttopreises des Schallschutzsets (Instabox) und dem Rabatt des Unternehmers der Nettopreis des Schallschutzsets berechnet. Als nächstes konnte mit dem Nettopreis des Schallschutzsets und der Anzahl Zuluftgeräte die Investitionskosten der Schallschutzmassnahmen der dezentralen Zuluftanlage ermittelt werden. Mit dem festgelegten Kapitalzins und der technischen Lebensdauer der Lüftungsgeräte wurde danach der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) und die jährlichen Kapitalkosten der Schallschutzmassnahmen der dezentralen Zuluftanlage (vgl. Formel 4) berechnet. Bei der zentralen Abluftanlage wurde anhand der Luftmenge und der spezifischen Kosten der Schalldämpfer die Investitionskosten abgeschätzt. Anschliessend wurde der Annuitätsfaktor (vgl. Formel 1) anhand des festgelegten Kapitalzinses und der technischen Lebensdauer der Schalldämpfer berechnet. Daraus konnten im Weiteren die jährlichen Kapitalkosten der Schallschutzmassnahmen der zentralen Abluftanlage ermittelt werden. Aus den jährlichen Kapitalkosten der Schallschutzmassnahmen der dezentralen Zuluftanlage und der zentralen Abluftanlage wurden anschliessend die gesamten jährlichen Kapitalkosten der Schallschutzmassnahmen der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage von 2.90 Fr./a*m^2_{EBF} berechnet.

6.2 Aspekt Qualität

Unter dem Aspekt Qualität wurde die Ökologie in der Erstellung und im Betrieb, der Flächen- und Raumbedarf, die Flexibilität der Raumeinteilung, der Eingriff in die Bausubstanz, die Ventilatoren und Wärmerückgewinnung sowie die Schallemissionen der Lüftungsanlagen betrachtet.

6.2.1 Ökologie, Erstellung

Beim Kriterium Ökologie, Erstellung wurden die jährlichen Treibhausgasemissionen der Erstellung der Lüftungsanlagen angeschaut. Zwar wurden die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen berechnet, weil die graue Energie jedoch ein Mass für die aufgewendete Energie bei der Erstellung, der Verarbeitung und dem Transport ist und keinen direkten Einfluss auf die Ökologie hat, wurde sie bei der Beurteilung des Kriteriums nicht verwendet. Für die Beurteilung wurden die jährlichen Treibhausgasemissionen zum Schluss durch die Energiebezugsfläche geteilt.

dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurden die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen für die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte separat ermittelt. Hierzu wurden die graue Energie und die Treibhausgasemissionen je Lüftungsgerät mit der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte multipliziert und anschliessend durch die technische Lebensdauer der Lüftungsgeräte dividiert. Anschliessend wurde aus den Werten der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte die gesamte jähr-

liche graue Energie und die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen der dezentralen Lüftungsanlage berechnet. Die gesamte jährliche graue Energie liegt bei 3.00 kWh/a*m²$_{EBF}$. Die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen betragen 0.65 kg/a*m²$_{EBF}$.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen der dezentralen Zuluftanlage wurden anhand der Zuluftgeräte ermittelt. Hierzu wurden die graue Energie und die Treibhausgasemissionen je Zuluftgerät mit der Anzahl Zuluftgeräte multipliziert und anschliessend durch die technische Lebensdauer der Lüftungsgeräte dividiert. Für die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen der zentralen Abluftanlage wurden die spezifischen Werte einer Abluftanlage ohne WRG gemäss der Rechenhilfe SIA 2040 Effizienzpfad (SIA, 2021) verwendet. Anschliessend wurde aus den Werten der dezentralen Zuluft- und der zentralen Abluftanlage die gesamte jährliche graue Energie und die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen berechnet. Die gesamte jährliche graue Energie liegt bei 2.69 kWh/a*m²$_{EBF}$. Die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen betragen 0.62 kg/a*m²$_{EBF}$.

6.2.2 Ökologie, Betrieb

Unter dem Kriterium Ökologie, Betrieb wurden die jährlichen Treibhausgasemissionen aufgrund des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs der Lüftungsanlagen betrachtet. Auch bei diesem Kriterium wurden die jährliche graue Energie sowie die jährlichen Treibhausgasemissionen berechnet, jedoch wurden nur die jährlichen Treibhausgasemissionen in der Beurteilung berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.2.1). Für die Beurteilung des Kriteriums wurden die jährlichen Treibhausgasemissionen am Ende durch die Energiebezugsfläche geteilt.

dezentrale Lüftungsanlage

Die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen des Heiz- und Kälteenergiebedarfs wurden separat für die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte ermittelt. Die Berechnung der jährlichen grauen Energie und der jährlichen Treibhausgasemissionen des Stromenergiebedarfs erfolgte für die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte gemeinsam. Der Vorgang für die Berechnung war beim Heiz- und Kälteenergiebedarf sowie beim Stromenergiebedarf derselbe. Für die Heizung wurde der Heizenergiebedarf der Lufterhitzer und für die Kälte der Kälteenergiebedarf der Luftkühler verwendet. Beim Strom wurde der gesamte Stromenergiebedarf der Lüftungsanlage berücksichtigt, welcher sich aus dem Stromenergiebedarf der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte sowie der Umwälzpumpen der Heizungs- und Kälteanlage zusammensetzt. Als erstes wurde mit den Energiebedarfen und anhand den Primärenergiefaktoren nicht erneuerbar sowie den Treibhausgas-Emissionsfaktoren die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen je Energiebedarf berechnet. Danach wurde die gesamte jährliche graue Energie und die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen der dezentralen Lüftungsanlage aus der jährlichen grauen Energie und der jährlichem Treibhausgasemissionen des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs gebildet. Die gesamte jährliche graue Energie liegt bei 7.1 kWh/a*m²$_{EBF}$. Die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen betragen 0.29 kg/a*m²$_{EBF}$.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurden die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs gemeinsam über alle dezentralen Zuluftgeräte und das zentrale Abluftgerät berechnet. Dabei wurden die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs nach dem gleichen Muster ermittelt. Für die Heizung wurde der Heizenergiebedarf der Lufterhitzer und für die Kälte der Kälteenergiebedarf der Luftkühler der Zuluftgeräte verwendet. Beim Strom wurde der gesamte Stromenergiebedarf der Lüftungsanlage berücksichtigt, welcher sich aus dem Stromenergiebedarf der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage sowie der Umwälzpumpen der Heizungs- und Kälteanlage zusammensetzt. Als erstes wurde mit den Energiebedarfen und anhand den Primärenergiefaktoren nicht erneuerbar sowie den Treibhausgas-Emissionsfaktoren die jährliche graue Energie und die jährlichen Treibhausgasemissionen je Energiebedarf berechnet. Anschliessend wurde die gesamte jährliche graue Energie und die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage aus der jährlichen grauen Energie und der jährlichen Treibhausgasemissionen des Heiz-, Kälte- und Stromenergiebedarfs gebildet. Die gesamte jährliche graue Energie liegt bei 9.6 kWh/a*m²$_{EBF}$. Die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen betragen 0.39 kg/a*m²$_{EBF}$.

6.2.3 Flächen- und Raumbedarf

Beim Kriterium Flächen- und Raumbedarf wurde der Flächen- und Raumbedarf der Lüftungsanlagen angeschaut. Diese setzen sich aus dem Flächen- und Raumbedarf der Lüftungsgeräte, der Lüftungszentrale, des Steigschachtes und der Lüftungskanäle zusammen. Zur Beurteilung des Kriteriums wurde der Flächen- und Raumbedarf am Ende durch die Energiebezugsfläche geteilt. Für den Flächen- und Raumbedarf der Lüftungszentrale und des Steigschachtes wurden Formeln anhand der Diagramme der SIA 382/1 (SIA, 2014, Abb. 10 / 11 / 15) abgeschätzt. Da nur die zentrale Abluftanlage über eine Lüftungszentrale und einen Steigschacht verfügt, wurden ausschliesslich die Formeln für die Abluftanlage ermittelt. Beim Schachtquerschnitt wurde ein Schacht mit einer Luftleitung angenommen. Zur Berechnung des Flächen- und Raumbedarfs der Lüftungszentrale und des Steigschachtes wurden die folgenden Formeln verwendet:

Nettogeschossfläche Lüftungszentrale

$$A = 26 + 49 * ((\dot{V} - 1'000)/99'000)^{0.472}$$ Formel 6

A = Nettogeschossfläche Lüftungszentrale [m²] $\dot{V}$ = Luftmenge Lüftungsanlage [m³/h]

Lichte Raumhöhe Lüftungszentrale

$$h = 2.5 + 1.9 * ((\dot{V} - 1'000)/99'000)^{0.53}$$ Formel 7

h = Lichte Raumhöhe Lüftungszentrale [m] $\dot{V}$ = Luftmenge Lüftungsanlage [m³/h]

Schachtquerschnitt der Steigschächte

Wenn $\dot{V} < 4000$ m³/h $A = 0.0005513687 * \dot{V}^{0.8892647305}$ Formel 8

Wenn $\dot{V} > 4000$ m³/h $A = 0.0000000000000045 * \dot{V}^3 - 0.0000000008 * \dot{V}^2 + 0.000188297 * \dot{V} + 0.1888712413$ Formel 9

A = Schachtquerschnitt des Steigschachts [m²]

$\dot{V}$ = Luftmenge Lüftungsanlage [m³/h]

dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurde anhand der Abmessungen der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte das Volumen je Lüftungsgeräte ermittelt. Zusätzlich wurde bei den Brüstungslüftungsgeräten die Fläche je Lüftungsgerät berechnet. Die Fläche der Deckenlüftungsgeräte wurde nicht ermittelt, weil sie an der Decke montiert werden und die Raumfläche dadurch nicht beeinflussen. Als nächstes wurde in Abhängigkeit der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte die gesamte Fläche und das gesamte Volumen der dezentralen Lüftungsanlage berechnet. Der gesamte Flächenbedarf liegt bei 0.007 m^2/m^2_{EBF} und der gesamte Raumbedarf beträgt 0.019 m^3/m^2_{EBF}.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluftanlage wurde anhand der Abmessungen der Zuluftgeräte das Volumen je Lüftungsgerät berechnet. Für die Berechnung wurden die Abmessungen der Instabox (Installations- und Schallschutzset) verwendet, da die Airbox (Zuluftgerät) darin integriert wird. Bei den Zuluftgeräten wurde die Fläche nicht ermittelt, weil auch diese an der Decke montiert werden und die Raumfläche dadurch nicht beeinflussen. Mit dem Volumen je Lüftungsgerät wurde anschliessend in Abhängigkeit der Anzahl Zuluftgeräte das gesamte Volumen der dezentralen Zuluftanlage berechnet. Bei der zentralen Abluftanlage wurde anhand der Luftmenge und der Formel für die Nettogeschossfläche der Lüftungszentrale (vgl. Formel 6) deren Flächenbedarf ermittelt. In einem nächsten Schritt wurde mit der Luftmenge die lichte Raumhöhe der Lüftungszentrale (vgl. Formel 7) berechnet. Mit der Nettogeschossfläche und der lichten Raumhöhe konnte anschliessend das Volumen der Lüftungszentrale ermittelt werden. Für die Berechnung des Steigschachtes der Abluftanlage wurde der Schachtquerschnitt (vgl. Formel 8 und 9) anhand der Luftmenge berechnet. Mit der Geschosshöhe je Geschoss und den Anzahl Geschossen wurde danach das Volumen des Steigschachtes ermittelt. Für die Berechnung des Volumens der Lüftungskanäle wurde die Luftmenge auf die Geschosse, die Geschossabgänge und die Raumabgänge je Geschossabgang aufgeteilt. Die Luftmenge der Lüftungsanlage wurde gleichmässig auf alle Raumabgänge verteilt. Als nächstes wurden sämtliche Abgänge anhand der Luftmenge in die Kategorien der Luftgeschwindigkeiten gemäss der SIA 382/1 (SIA, 2014) eingeteilt. Daraus konnte anschliessend in Abhängigkeit der jeweiligen Luftgeschwindigkeit die Querschnittfläche der Lüftungskanäle berechnet werden. Mit den Kanallängen der jeweiligen Abgänge wurde anschliessend das Volumen der Lüftungskanäle ermittelt. Auch bei den Lüftungskanälen wurde die Fläche nicht berechnet, da die Fläche der Steigzonen beim Steigschacht berücksichtigt wurden und die Lüftungskanäle ansonsten die Raum-

fläche nicht beeinflussen. Aus der Fläche der Lüftungszentrale und dem Steigschacht wurde anschliessend die gesamte Fläche der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage gebildet. Das gesamte Volumen der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlagen wurde aus den Volumen der dezentralen Zuluftanlage, der Lüftungszentrale, des Steigschachtes und der Lüftungskanäle ermittelt. Der gesamte Flächenbedarf liegt bei 0.039 m^2/m^2_{EBF} und der gesamte Raumbedarf beträgt 0.145 m^3/m^2_{EBF}.

6.2.4 Flexibilität Raumeinteilung

Unter dem Kriterium Flexibilität Raumeinteilung wurde die kleinste maximal flexible Raumfläche in Abhängigkeit der Lüftungsanlagen betrachtet, bei welcher der Anforderungswert an Dauergeräusche im Raum erreicht werden kann. Zur Berechnung der kleinsten maximal flexiblen Raumfläche wurde die Formel 12 erarbeitet. Diese wurde aus der Sabineschen Formel (vgl. Formel 10) und der Formel für die Berechnung des Schalldruckpegels im Raum (vgl. Formel 11) abgeleitet. Damit die kleinste maximal flexible Raumfläche bestimmt werden konnte, wurde das Volumen des Raumes in der Sabineschen Formel durch die Raumfläche und die lichte Raumhöhe ersetzt. Bei mehr als einer Schallquelle im Raum wurden die Schallleistungspegel anhand der Formel 13 gemäss dem Skript Grundlagen Akustik (Odermatt, 2020) berechnet. Die Flexibilität der Raumeinteilung kann nur ermittelt werden, wenn die Systemgrenzen (vgl. Kapitel 3.2) eingehalten werden.

Sabinesche Formel

$$T = 0.163 * \frac{V}{A}$$ Formel 10

T = Nachhallzeit [s]
V = Volumen des Raumes [m³]
A = Äquivalente Absorptionsfläche des Raumes [m²]

Schalldruckpegel im Raum

$$L_P = L_W + 10 * \lg(\frac{Q}{4 * \pi * d^2} + \frac{4}{A})$$ Formel 11

L_P = Schalldruckpegel [dB]
L_W = Schallleistungspegel [dB]
Q = Richtfaktor [-]
d = Abstand zwischen Lärmquelle und Messpunkt [m]
A = Äquivalente Absorptionsfläche [m²]

Kleinste maximal flexible Raumfläche

$$A_R = \frac{4 * T}{\left(10^{\frac{L_P - L_W}{10}} - \frac{Q}{4 * \pi * d^2}\right) * 0.163 * h}$$ Formel 12

A_R = Kleinste maximal flexible Raumfläche [m²]
T = Nachhallzeit [s]
L_P = Schalldruckpegel [dB]
L_W = Schallleistungspegel [dB]
Q = Richtfaktor [-]
d = Abstand zwischen Lärmquelle und Messpunkt [m]
h = lichte Raumhöhe [m]

Schallpegeladdition

$$L_{ges} = 10 * \lg(\sum_{i=1}^{n} 10^{0.1*Li}) \qquad \text{Formel 13}$$

L_{ges} = gesamter Schallpegel [dB] L_i = i-ter Schallpegel [dB]

dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurde die kleinste maximal flexible Raumfläche für die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte separat berechnet. Die Berechnung erfolgte bei beiden Lüftungsgeräten nach demselben Muster. Die kleinste maximal flexible Raumfläche wurde mit der Formel 12 anhand des Schallleistungspegel der Lüftungsgeräte, dem Anforderungswert an Dauergeräusche im Raum, dem Richtfaktor, dem Abstand der Lärmquelle zum Messpunkt, der lichten Raumhöhe und der Nachhallzeit des Raumes berechnet. Anschliessend wurde mit der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte die durchschnittlich kleinste maximal flexible Raumfläche ermittelt. Diese beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 24.1 m².

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage musste zuerst der gesamte Schallleistungspegel der drei dezentralen Zuluftgeräte gemäss der Formel 13 berechnet werden. Anschliessend wurde mit der gleichen Formel der Schallleistungspegel der Lüftungsanlage im Raum ermittelt, welcher sich durch die Überlagerung des gesamten Schallleistungspegel der drei Zuluftgeräte und dem Schallleistungspegel des Lufteinlasses ergab. Die kleinste maximal flexible Raumfläche konnte danach mit der Formel 12 anhand des Schallleistungspegel der Lüftungsanlage im Raum, dem Anforderungswert an Dauergeräusche im Raum, dem Richtfaktor, dem Abstand der Lärmquelle zum Messpunkt, der lichten Raumhöhe und der Nachhallzeit des Raumes berechnet werden. Die kleinste maximal flexible Raumfläche der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage beträgt 30.1 m².

6.2.5 Eingriff in Bausubstanz

Beim Kriterium Eingriff in Bausubstanz wurden die Anzahl Durchdringungen der Aussenhülle (Fassade und Dach) angeschaut. Dadurch wird berücksichtigt, dass die Aussenhülle geschwächt und zusätzliche Wärmebrücken sowie Abdichtungsstellen generiert werden. Die Fassade im Bachelor+-Projekt besteht aus Holz und beim Gebäude handelt es sich um ein Gebäude mittlerer Höhe. Die Fassade darf folglich wie geplant mit Materialien RF2 (geringer Brandbreitrag) erstellt werden (VKF, 2017). Weil die Fassade und die dezentralen Lüftungsgeräte etwa das gleiche Brandrisiko aufweisen, ist die Schwächung der Fassade durch die dezentralen Lüftungsgeräte bezüglich Brandschutz unbedeutend und kann deshalb vernachlässigt werden.

dezentrale Lüftungsanlage

Bei der dezentralen Lüftungsanlage wird die gesamte Anzahl Durchdringungen der Aussenhülle anhand der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte und der Anzahl Durchdringungen je Lüftungsgerät berechnet. Die Aussenhülle wird pro Lüftungsgerät zweimal perforiert (Aussenluft und Fortluft). Die gesamte Anzahl Durchdringungen der Aussenhülle liegt bei der dezentralen Lüftungsanlage bei 88 Stück.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage setzen sich die Anzahl Durchdringungen der Aussenhülle aus den Durchdringungen der dezentralen Zuluft- und der zentralen Abluftanalage zusammen. Die Durchdringungen der dezentralen Zuluftanlage werden anhand der Anzahl Zuluftgeräte und der Anzahl Durchdringungen je Zuluftgerät ermittelt. Die Durchdringungen der zentralen Abluftanlage ergeben sich aus der Anzahl Abluftanlagen und der Anzahl Durchdringungen je Abluftanlage. Sowohl die Zuluftgeräte als auch die Abluftanlage perforieren die Aussenhülle jeweils einmal. Die gesamte Anzahl Durchdringungen der Aussenhülle liegt bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage bei 133 Stück.

6.2.6 Lüftungsgeräte, Ventilator

Unter dem Kriterium Lüftungsgeräte, Ventilator wurde die SFP-Kategorie der Ventilatoren der Lüftungsanlagen in Abhängigkeit der spezifischen Ventilatorleistung betrachtet. Für die Beurteilung wurden die Ventilatoren anhand der spezifischen Ventilatorleistung in die jeweilige SFP-Kategorie eingeordnet, falls diese nicht bereits vom Hersteller / Lieferanten angegeben wurde. Die spezifische Ventilatorleistung wurde anhand der Formel 14 gemäss dem Merkblatt Nr. 24 - Luftförderung (Topmotors, 2021) berechnet.

Spezifische Ventilatorleistung

$$P_{SFP} = \frac{\Delta p}{3600 s/h * \eta_{Fa} * \eta_{Ant} * \eta_{Mot} * \eta_{Reg}}$$ Formel 14

η_{Fa} = Wirkungsgrad Ventilator
η_{Ant} = Wirkungsgrad Antrieb
η_{Mot} = Wirkungsgrad Motor
η_{Reg} = Wirkungsgrad Regulierung
Δp = Gesamter Druckverlust Lüftungsanlage

dezentrale Lüftungsanlage

Bei den in der dezentralen Lüftungsanlage eingesetzten Lüftungsgeräten handelt es sich um Kompaktgeräte. Der Hersteller hat in seinen Unterlagen die SFP-Kategorie der Ventilatoren ausgewiesen. Die Ventilatoren des Brüstungs- und des Deckenlüftungsgerätes fallen beide in die Kategorie SFP 1.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage

Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage musste die SFP-Kategorie der Ventilatoren der Zuluftgeräte anhand der Lieferantenangaben abgeschätzt werden. Zur Ermittlung der SFP-Kategorie des Ventilators der zentralen Abluftanlage wurde die spezifische Ventilatorleistung gemäss der Formel 14 abgeschätzt. Anschliessend konnte daraus die SFP-Kategorie abgeleitet werden. Die Ventilatoren der Zuluftgeräte fallen in die Kategorie SFP 1. Der Ventilator der zentralen Abluftanlage wird in die Kategorie SFP 2 eingestuft.

6.2.7 Lüftungsgeräte, WRG

Beim Kriterium Lüftungsgerät, WRG wurde der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung (WRG) angeschaut. Lüftungsanlagen mit Aussen- und Fortluft sind mit einer Wärmerückgewinnung auszurüsten (EnDK, 2018). Der Wirkungsgrad der WRG hat Einfluss auf den Heizenergiebedarf des Lufterhitzers und den Kälteenergiebedarf des Luftkühlers.

dezentrale Lüftungsanlage
Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurde der Wirkungsgrad der WRG der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte separat betrachtet. Die Wirkungsgrade liegen gemäss Hersteller beim Brüstungslüftungsgerät bei 60 % und beim Deckenlüftungsgerät bei 54 %.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage
Da bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage die Zuluft dezentral im Raum zugeführt und die Abluft zentral abgeführt wird, lässt sich keine direkte Wärmerückgewinnung von der Abluft zur Aussenluft realisieren. Das Abluftgerät wird deshalb zur Wärmerückgewinnung mit einem Wärmetauscher ausgestattet. Im Winter kann der Wärmetauscher der Abluft als Wärmequelle für eine Wärmepumpe und im Sommer als Rückkühler für eine Kältemaschine genutzt werden. Für die Wärmerückgewinnung der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurde ein Wirkungsgrad von 70 % angenommen.

6.2.8 Akustik, Schallemissionen

Unter dem Kriterium Akustik, Schallemissionen wurden die Schallleistungspegel der Lüftungsanlagen im Raum bei Auslegungszustand betrachtet. Es wurde ein Raum mit einem dezentralen Lüftungsgerät resp. mit drei dezentralen Zuluftgeräten und einem Lufteinlass betrachtet. Bei mehr als einer Schallquelle im Raum wurden die Schallleistungspegel anhand der Formel 13 gemäss dem Skript Grundlagen Akustik (Odermatt, 2020) berechnet. Der Anforderungswert an Dauergeräusche im Raum beträgt 33 dB.

dezentrale Lüftungsanlage
Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurde der Schallleistungspegel der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte separat betrachtet. Anhand der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte wurde anschliessend ein durchschnittlicher Schallleistungspegel ermittelt. Dieser beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 37 dB.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage
Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage musste zuerst der gemeinsame Schallleistungspegel der drei dezentralen Zuluftgeräte gemäss der Formel 13 berechnet werden. Anschliessend wurde mit der gleichen Formel der Schallleistungspegel der Lüftungsanlage im Raum ermittelt, welcher sich durch die Überlagerung des gesamten Schallleistungspegel der drei Zuluftgeräte und dem Schallleistungspegel des Lufteinlasses ergab. Daraus resultierte ein gesamter Schallleistungspegel von 38 dB für die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage.

6.3 Aspekt Zeit

Beim Aspekt Zeit wurde die Dauer für die Erstellung der Lüftungsanlagen sowie die Lieferfristen der Komponenten der Lüftungsanlagen angeschaut.

6.3.1 Dauer für Erstellung

Unter dem Kriterium Dauer für Erstellung wurde die Installationsdauer der Lüftungsanlagen betrachtet. Für die Beurteilung des Kriteriums wurde die Installationsdauer am Ende in Arbeitswochen à 42 h/Woche umgerechnet.

dezentrale Lüftungsanlage
Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurde die Installationsdauer der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte separat untersucht. Die Installationsdauer wurde anhand der Installationsdauer je Lüftungsgerät und der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte ermittelt. Aus der Installationsdauer der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte wurde anschliessend eine gesamte Installationsdauer der dezentralen Lüftungsanlage von 1.6 Wochen berechnet.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage
Die Installationsdauer der dezentralen Zuluftanlage wurde anhand der Installationsdauer je Zuluftgerät und der Anzahl Zuluftgeräte berechnet. Bei der zentralen Abluftanlage wurde die Installationsdauer anhand der Komponenten und deren Montagezeit ermittelt. Es wurde die Installation des Abluftgerätes, des Regenhutes, der Lufteinlässe und der Lüftungskanäle berücksichtigt. Zusätzlich wurde mit einem Zuschlag die Installation der Formstücke der Lüftungskanäle einkalkuliert. Aus der Installationsdauer der dezentralen Zuluft- und der zentralen Abluftanlage wurde danach eine gesamte Installationsdauer von 8 Wochen berechnet.

6.3.2 Lieferfristen

Beim Kriterium Lieferfristen wurden die Lieferfristen der Komponenten der Lüftungsanlagen angeschaut. Die Lieferfristen wurden in Arbeitswochen angegeben.

dezentrale Lüftungsanlage
Bei der dezentralen Lüftungsanlage wurden die Lieferfristen der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte separat betrachtet. Anhand der Anzahl Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte wurde danach eine durchschnittliche Lieferfrist berechnet. Die durchschnittliche Lieferfrist liegt bei der dezentralen Lüftungsanlage bei 26 Wochen.

dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage
Bei der dezentralen Zuluftanlage wurde die Lieferfrist der Zuluftgeräte vom Lieferanten angegeben. Die durchschnittliche Lieferfrist der Abluftanlage wurde anhand des Mittelwerts der Lieferfristen des Abluftgerätes, der Lüftungskanäle, der Armaturen, der Regel- und Sicherheitsorgane sowie der Elektrosteuerschränke abgeschätzt. Aus der Lieferfrist der dezentralen Zuluftanlage und der durchschnittlichen Lieferfrist der Abluftanlage wurde eine durchschnittliche Lieferfrist der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage von 24.7 Wochen berechnet.

7 BEWERTUNGSRASTER

Zur Bewertung der Kriterien wurde ein Bewertungsraster mit 0 – 10 Punkten (0 Punkte am schlechtesten, 10 Punkte am besten) festgelegt. Beim Bewertungsraster handelt es sich um ein dynamisches Bewertungsraster. Sowohl die untere als auch die obere Grenze des Bewertungsrasters ist von den Resultaten des jeweiligen Kriteriums abhängig. Das Bewertungsraster wird dadurch automatisch in Abhängigkeit der Resultate der Kriterien angepasst. Für die untere und obere Grenze können zusätzlich statische Werte berücksichtigt werden. Damit lassen sich spezifische Werte von anderen Systemen in das Bewertungsraster miteinbeziehen. Für die untere und obere Grenze des Bewertungsraster werden die Resultate aus der Berechnung des Kriteriums und der statische Wert der unteren resp. oberen Grenze verglichen. Bei der unteren Grenze wird der kleinste Wert und bei der oberen Grenze der grösste Wert für das Bewertungsraster als Grenze festgelegt. Wenn keine statischen Grenzen vermerkt sind, wird für die Grenzen der kleinste resp. der grösste Wert aus der Berechnung des Kriteriums gewählt. Um die Nachvollziehbarkeit der Punktevergabe zu gewährleisten, wurden die Punkteschritte für die Bewertung in Punkten sowie in der Einheit des jeweiligen Kriteriums im Vergleichstool festgehalten.

Im Folgenden wird auf die Bewertungsraster der Kriterien eingegangen. Diese werden in der gleichen Reihenfolge wie die Kriterien erläutert und sind auch in die drei Aspekte Kosten, Qualität und Zeit eingeteilt. Dabei werden die unteren und oberen Grenzen sowie die statischen Grenzen aufgezeigt. Weiter wird auf die Punkte der Lüftungssysteme eingegangen. Als Grundlage für die Bewertungsraster dienten die Resultate der Kriterien (vgl. Kapitel 6). Die statischen Werte wurden von Normen übernommen oder abgeschätzt.

7.1 Aspekt Kosten

Unter dem Aspekt Kosten wird das Bewertungsraster der Kapitalkosten für die Erstellung, den Raumbedarf und für den Schallschutz gegen Anlagegeräusche der Lüftungsanlagen aufgezeigt. Weiter wird das Bewertungsraster der Betriebskosten sowie der Wartungs- und Unterhaltskosten der Lüftungsanlagen erläutert.

7.1.1 Erstellung

Die jährlichen Kapitalkosten der Erstellung betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 23.90 Fr./a*m^2_{EBF} und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 23.40 Fr./a*m^2_{EBF}. Bei der unteren statischen Grenze wurden die jährlichen Kapitalkosten einer einfachen Zu- und Abluftanlage mit 8.10 Fr./a*m^2_{EBF} berücksichtigt. Für die obere statische Grenze wurden mit 12.70 Fr./a*m^2_{EBF} die jährlichen Kapitalkosten einer Vollklimaanlage berücksichtigt. Beide statischen Grenzen wurden anhand einer Luftmenge von 8500 m^3/h und einer Energiebezugsfläche von 1'173 m^2 ermittelt (vgl. Anhang). Mit diesen Werten konnte anschliessend die untere und obere Grenze definiert werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 8.10 Fr./a*m^2_{EBF} (10 Punkte) und die obere Grenze auf 23.90 Fr./a*m^2_{EBF} (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 0 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 0.3 Punkte.

7.1.2 Raumbedarf

Die jährlichen Kapitalkosten für den Raumbedarf betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 0.20 Fr./a*m²$_{EBF}$ und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 1.60 Fr./a*m²$_{EBF}$. Bei der unteren statischen Grenze wurde eine Fensterlüftung berücksichtigt. Da bei diesem Lüftungssystem kein zusätzlicher Raumbedarf entsteht, wurden die jährlichen Kapitalkosten der Fensterlüftung auf 0 Fr./a*m²$_{EBF}$ geschätzt. Für die obere statische Grenze wurden mit 3.00 Fr./a*m²$_{EBF}$ die jährlichen Kapitalkosten einer einfachen Zu- und Abluftanlage berücksichtigt. Der spezifische Wert der oberen statischen Grenze wurde mit einer Luftmenge von 8500 m³/h und einer Energiebezugsfläche von 1'173 m² berechnet (vgl. Anhang). Anschliessend konnte anhand der Werte die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 0 Fr./a*m²$_{EBF}$ (10 Punkte) und die obere Grenze auf 3.00 Fr./a*m²$_{EBF}$ (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 9.3 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 4.7 Punkte.

7.1.3 Betrieb

Die jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 0.70 Fr./a*m²$_{EBF}$ und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 0.90 Fr./a*m²$_{EBF}$. Bei der unteren statischen Grenze wurde eine Fensterlüftung mit jährlichen durchschnittlichen Betriebskosten von 0 Fr./a*m²$_{EBF}$ berücksichtigt. Dabei wurde der Mehraufwand an Heiz- und Kälteenergie durch die Lüftungsverluste vernachlässigt. Bei der oberen Grenze wurde keine statische Grenze definiert. Anhand der Werte konnte danach die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 0 Fr./a*m²$_{EBF}$ (10 Punkte) und die obere Grenze auf 0.90 Fr./a*m²$_{EBF}$ (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 2.2 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 0 Punkte.

7.1.4 Wartung und Unterhalt

Die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 8.60 Fr./a*m²$_{EBF}$ und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 6.70 Fr./a*m²$_{EBF}$. Bei der unteren statischen Grenze wurden die jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten einer einfachen Zu- und Abluftanlage mit 1.20 Fr./a*m²$_{EBF}$ berücksichtigt. Dieser Wert wurde anhand der jährlichen durchschnittlichen Wartungs- und Unterhaltskosten der zentralen Abluftanlage abgeschätzt (vgl. Anhang). Als Grundlage wurde eine Luftmenge von 8500 m³/h und eine Energiebezugsfläche von 1'173 m² verwendet. Bei der oberen Grenze wurde keine statische Grenze definiert. Mit diesen Werten konnte anschliessend die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 1.20 Fr./a*m²$_{EBF}$ (10 Punkte) und die obere Grenze auf 8.60 Fr./a*m²$_{EBF}$ (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 0 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 2.6 Punkte.

7.1.5 Akustik, Schallschutz

Die jährlichen Kapitalkosten der Schallschutzmassnahmen betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 0 Fr./a*m²$_{EBF}$ und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 2.90 Fr./a*m²$_{EBF}$. Es wurden keine statischen Grenzen für die untere und obere Grenze definiert. Das Bewertungsraster ergab sich dementsprechend aus den Resultaten des Kriteriums. Die untere Grenze wurde auf 0 Fr./a*m²$_{EBF}$ (10 Punkte) und die obere Grenze auf 2.90 Fr./a*m²$_{EBF}$ (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 10 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 0 Punkte.

7.2 Aspekt Qualität

Unter dem Aspekt Qualität wird das Bewertungsraster der Ökologie in der Erstellung und im Betrieb, des Flächen- und Raumbedarfs, der Flexibilität der Raumeinteilung, des Eingriffs in die Bausubstanz, der Ventilatoren und Wärmerückgewinnung sowie der Schallemissionen der Lüftungsanlagen erläutert.

7.2.1 Ökologie, Erstellung

Die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen der Erstellung betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 0.65 kg/a*m²$_{EBF}$ und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 0.62 kg/a*m²$_{EBF}$. Bei der unteren statischen Grenze wurde eine Fensterlüftung mit 0 kg/a*m²$_{EBF}$ an Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Die obere statische Grenze wurde anhand der Rechenhilfe SIA 2040 Effizienzpfad (SIA, 2021) definiert. Diese weist für die Erstellung einer Lüftungsanlage mit WRG 0.61 kg/a*m²$_{EBF}$ an Treibhausgasemissionen aus. Anschliessend konnte anhand der Werte die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 0 kg/a*m²$_{EBF}$ (10 Punkte) und die obere Grenze auf 0.65 Fr./a*m²$_{EBF}$ (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 0 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 0.5 Punkte.

7.2.2 Ökologie, Betrieb

Die gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen im Betrieb betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 0.29 kg/a*m²$_{EBF}$ und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 0.39 kg/a*m²$_{EBF}$. Bei der unteren statischen Grenze wurde eine Fensterlüftung mit 0 kg/a*m²$_{EBF}$ an Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Dabei wurde der Mehraufwand an Heiz- und Kälteenergie durch die Lüftungsverluste vernachlässigt. Die obere statische Grenze wurde anhand der Rechenhilfe SIA 2040 Effizienzpfad (SIA, 2021) definiert. Diese weist für den Betrieb einer Lüftungsanlage mit WRG 0.55 kg/a*m²$_{EBF}$ an Treibhausgasemissionen aus. Anhand der Werte konnte danach die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 0 kg/a*m²$_{EBF}$ (10 Punkte) und die obere Grenze auf 0.55 Fr./a*m²$_{EBF}$ (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 4.7 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 2.9 Punkte.

7.2.3 Flächen- und Raumbedarf

Der Flächen- und Raumbedarf wurde einzeln bewertet. Für die Nutzwertanalyse wurde anschliessend der Mittelwert zwischen den beiden Punktzahlen gebildet. Auf die Unterteilung des Flächen- und Raumbedarfs in zwei separate Kriterien wurde verzichtet, weil sie eine hohe Affinität aufweisen und in der Präferenzmatrix ähnlich in Bezug auf die anderen Kriterien gewertet werden. Nachfolgend wird das Bewertungsraster des Flächen- und des Raumbedarfs separat aufgezeigt.

Flächenbedarf

Der gesamte Flächenbedarf beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 0.007 m^2/m^2_{EBF} und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 0.039 m^2/m^2_{EBF}. Bei der unteren statischen Grenze wurde eine Fensterlüftung mit 0 m^2/m^2_{EBF} berücksichtigt. Für die obere statische Grenze wurde mit 0.077 m^2/m^2_{EBF} der Flächenbedarf einer einfachen Zu- und Abluftanlage berücksichtigt. Der spezifische Wert der oberen statischen Grenze wurde mit einer Luftmenge von 8500 m^3/h und einer Energiebezugsfläche von 1'173 m^2 berechnet (vgl. Anhang). Mit diesen Werten konnte anschliessend die untere und obere Grenze definiert werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 0 m^2/m^2_{EBF} (10 Punkte) und die obere Grenze auf 0.077 m^2/m^2_{EBF} (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 9.1 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 5 Punkte.

Raumbedarf

Der gesamte Raumbedarf beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 0.019 m^3/m^2_{EBF} und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 0.145 m^3/m^2_{EBF}. Bei der unteren statischen Grenze wurde eine Fensterlüftung mit 0 m^3/m^2_{EBF} berücksichtigt. Für die obere statische Grenze wurde mit 0.27 m^3/m^2_{EBF} der Raumbedarf einer einfachen Zu- und Abluftanlage berücksichtigt. Der spezifische Wert der oberen statischen Grenze wurde mit einer Luftmenge von 8500 m^3/h und einer Energiebezugsfläche von 1'173 m^2 berechnet (vgl. Anhang). Anschliessend konnte anhand der Werte die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 0 m^3/m^2_{EBF} (10 Punkte) und die obere Grenze auf 0.27 m^3/m^2_{EBF} (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 9.3 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 4.6 Punkte.

Aus der Punktzahl des Flächen- sowie des Raumbedarfs wurde schlussendlich eine durchschnittliche Punktzahl des Flächen- und des Raumbedarfs ermittelt. Die Punktzahl beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 9.2 Punkte und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 4.8 Punkte.

7.2.4 Flexibilität Raumeinteilung

Die durchschnittlich kleinste maximal flexible Raumfläche beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 24.1 m^2. Die kleinste maximal flexible Raumfläche der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage liegt bei 30.1 m^2. Bei der unteren statischen Grenze wurde eine Fensterlüftung mit der kleinsten maximal flexible Raumflächen von 5 m^2 berücksichtigt. Bei der oberen Grenze wurde keine statische Grenze definiert. Anhand der Werte konnte danach die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 5 m^2 (10 Punkte) und die obere Grenze auf 30.1 m^2 (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 2.4 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 0 Punkte.

7.2.5 Eingriff in Bausubstanz

Die Anzahl Durchdringungen der Aussenhülle betragen bei der dezentralen Lüftungsanlage 88 Stück und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 133 Stück. Bei der unteren statischen Grenze wurden die Anzahl Durchdringungen der Aussenhülle anhand einer einfachen Zu- und Abluftanlage geschätzt. Es wurden zwei Durchdringungen angenommen. Bei der oberen Grenze wurde keine statische Grenze definiert. Mit diesen Werten konnte anschliessend die untere und obere Grenze definiert werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 2 Stück (10 Punkte) und die obere Grenze auf

133 Stück (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 3.4 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 0 Punkte.

7.2.6 Lüftungsgeräte, Ventilator

Die Ventilatoren der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte der dezentralen Lüftungsanlage fallen in die Kategorie SFP 1. Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage werden die Ventilatoren der Zuluftgeräte in die Kategorie SFP 1 und der Ventilator der zentralen Abluftanlage in die Kategorie SFP 2 eingestuft. Das Bewertungsraster wurde anhand der Kategorien gemäss der Tabelle 4 festgelegt. Ventilatoren müssen in der Schweiz mindestens der Kategorie SFP 4 entsprechen. Die maximal mögliche Kategorie ist SFP 1+. Deshalb wurde für das Bewertungsraster die untere Grenze auf SFP 4 (0 Punkte) und die obere Grenze auf SFP 1+ (10 Punkte) festgelegt. Für die Bewertung der Kategorien zwischen SFP 4 und SFP 1+ wurde ein Punkteschritte von 2.5 Punkten definiert. Die Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte erhielten beide 7.5 Punkte. Die dezentralen Zuluftgeräte erhielten 7.5 Punkte und die zentrale Abluftanlage 5 Punkte. Damit liegt die durchschnittliche Punktzahl bei der dezentralen Lüftungsanlage bei 7.5 Punkten und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage bei 6.3 Punkte.

Tabelle 4: Klassierung der spezifischen Ventilatorleistung gemäss SIA 382/1 (SIA, 2014)

Kategorie	P_{SFP} W pro m^3/s	P_{SFP} W pro m^3/h
SFP 1+ *	≤ 300	≤ 0,083
SFP 1	> 300 bis 500	> 0,083 bis 0,14
SFP 2	> 500 bis 750	> 0,14 bis 0,21
SFP 3	> 750 bis 1250	> 0,21 bis 0,35
SFP 4	> 1250 bis 2000	> 0,35 bis 0,56
SFP 5 **	> 2000 bis 3000	> 0,56 bis 0,83
SFP 6 **	> 3000 bis 4500	> 0,83 bis 1,25
SFP 7 **	> 4500	> 1,25

7.2.7 Lüftungsgeräte, WRG

Der Wirkungsgrad der WRG beträgt bei den Brüstungslüftungsgeräten 60 % und bei den Deckenlüftungsgeräten 54 %. Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage liegt der Wirkungsgrad der WRG bei 70 %. Als untere statische Grenze wurde ein Wirkungsgrad von 50 % definiert. Für die obere statische Grenze wurde ein theoretisch maximal möglicher Wirkungsgrad von 100 % angenommen. Anhand der Werte konnte danach die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 50 % (0 Punkte) und die obere Grenze auf 100 % (10 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 1.1 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 4 Punkte.

7.2.8 Akustik, Schallemissionen

Der durchschnittliche Schallleistungspegel beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 37 dB. Der Schallleistungspegel der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage liegt bei 38 dB. Der Anforderungswert an Dauergeräusche im Raum beträgt 33 dB. Es wurden keine statischen Grenzen für die untere und obere Grenze definiert. Das Bewertungsraster ergab sich dementsprechend aus den Resultaten des Kriteriums und dem Anforderungswert an Dauergeräusche im Raum. Die untere Grenze wurde auf 33 dB (10 Punkte) und die obere Grenze auf 38 dB (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 2 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 0 Punkte.

7.3 Aspekt Zeit

Beim Aspekt Zeit wird das Bewertungsraster der Dauer für die Erstellung der Lüftungsanlagen sowie der Lieferfristen der Komponenten der Lüftungsanlagen aufgezeigt.

7.3.1 Dauer für Erstellung

Die gesamte Installationsdauer beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 1.6 Wochen und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 8 Wochen. Als untere statische Grenze wurde die Installationsdauer der Fenster (Fensterlüftung) mit 1 Woche berücksichtigt. Für die obere statische Grenze wurde mit 13.2 Wochen die Installationsdauer einer einfachen Zu- und Abluftanlage berücksichtigt. Der spezifische Wert der oberen statischen Grenze wurde mit einer Luftmenge von 8500 m³/h und einer Energiebezugsfläche von 1'173 m² berechnet (vgl. Anhang). Anschliessend konnte anhand der Werte die untere und obere Grenze ermittelt werden. Für das Bewertungsraster wurde die untere Grenze auf 1 Woche (10 Punkte) und die obere Grenze auf 13.2 Wochen (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 9.5 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 4.3 Punkte.

7.3.2 Lieferfristen

Die durchschnittliche Lieferfrist beträgt bei der dezentralen Lüftungsanlage 26 Wochen und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 24.7 Wochen. Als untere statische Grenze wurde die Lieferfrist eines Fensters (Fensterlüftung) mit 10 Wochen berücksichtigt. Bei der oberen Grenze wurde keine statische Grenze definiert. Neben den Resultaten aus der Berechnung des Kriteriums wurden die einzelnen Lieferfristen der Komponenten der Lüftungsanlagen miteinbezogen. Somit wurde die untere Grenze des Bewertungsrasters auf 1 Woche (10 Punkte) und die obere Grenze auf 43 Wochen (0 Punkte) festgelegt. Dadurch erhielt die dezentrale Lüftungsanlage 4 Punkte und die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 4.4 Punkte.

8 PRÄFERENZMATRIX

Für die Nutzwertanalyse wurden die Kriterien untereinander in einer Präferenzmatrix verglichen und die Gewichtungsfaktoren je Kriterium ermittelt. Dadurch konnten die Kriterien anschliessend anhand ihrer Relevanz in der Nutzwertanalyse berücksichtigt werden. Bei diesem Vorgang wurde jedes Kriterium mit den anderen paarweise verglichen. Wenn die Kriterien gleich wichtig waren, wurde jeweils ein Punkt vergeben. Wenn ein Kriterium wichtiger als das andere war, wurde das wichtigere Kriterium mit 2 Punkten und das weniger wichtige Kriterium mit 0 Punkten bewertet. Aus den Punkten wurde in einem nächsten Schritt die gesamte Punktzahl je Kriterium gebildet. Danach konnte der Gewichtungsfaktor je Kriterium anhand der Punktzahl des jeweiligen Kriteriums und der gesamten Punktzahl aller Kriterien ermittelt werden. Die Kriterien wurden anschliessend in Abhängigkeit der Gewichtungsfaktoren in eine Rangliste eingeteilt. Je höher der Rang des Kriteriums liegt, desto grösser ist die Relevanz des Kriteriums. Da teilweise mehrere Kriterien den gleichen Gewichtungsfaktor aufweisen, wurden einzelne Ränge mehrfach und andere gar nicht besetzt. Die Rangliste der Kriterien ist in der folgenden Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Rangliste der Kriterien gemäss Präferenzmatrix

Rang	Aspekt	Kriterium	Gewichtungsfaktor
1.1	Kosten	Betrieb	9.5%
1.2	Qualität	Lüftungsgeräte, Ventilator	9.5%
1.3	Qualität	Lüftungsgeräte, WRG	9.5%
1.4	Qualität	Akustik, Schallemissionen	9.5%
2			
3			
4			
5	Kosten	Erstellung	9.0%
6	Qualität	Flexibilität Raumeinteilung	7.6%
7.1	Qualität	Ökologie, Betrieb	7.1%
7.2	Qualität	Flächen- und Raumbedarf	7.1%
8			
9.1	Kosten	Wartung und Unterhalt	6.7%
9.2	Qualität	Ökologie, Erstellung	6.7%
10			
11	Kosten	Akustik, Schallschutz	5.2%
12	Kosten	Raumbedarf	4.8%
13	Zeit	Dauer für Erstellung	4.3%
14	Zeit	Lieferfristen	2.4%
15	Qualität	Eingriff in Bausubstanz	1.0%
			100%

9 NUTZWERTANALYSE

Bei der Nutzwertanalyse wurden die mit dem Bewertungsraster ermittelten Punktzahlen je Lüftungssystem und je Kriterium als Bewertung aufgeführt. Zusätzlich wurde der Gewichtungsfaktor aus der Präferenzmatrix bei jedem Kriterium angegeben. Anhand der ermittelten Punktzahl und dem Gewichtungsfaktor wurde anschliessend die gewichtete Punktzahl je Lüftungssystem und Kriterium berechnet. Anschliessend wurde aus den gewichteten Punktzahlen die Gesamtpunktzahl der Lüftungssysteme gebildet. Das Lüftungssystem mit der höheren Gesamtpunktzahl ist dem anderen Lüftungssystem vorzuziehen und wird als Empfehlung angegeben. Die Nutzwertanalyse wurde so modifiziert, dass wenn beide Lüftungssysteme die gleiche Gesamtpunktzahl aufweisen, die gewichteten Punktzahlen der vier relevantesten Kriterien je Lüftungssystem addiert und verglichen werden. So kann sichergestellt werden, dass auch bei einer gleich hohen Gesamtpunktzahl eine Empfehlung für ein Lüftungssystem abgegeben werden kann.
Für das Bachelor+-Projekt beträgt die Gesamtpunkzahl der dezentralen Lüftungsanlage 3.8 Punkte und die Gesamtpunkzahl der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 2.2 Punkte. Somit empfiehlt sich im Bachelor+-Projekt der Einsatz der dezentralen Lüftungsanlage als Lüftungssystem. In der Tabelle 6 ist die Nutzwertanalyse mit den Bewertungen und den gewichteten Punkten der Lüftungssysteme je Kriterium dargestellt.

Tabelle 6: Nutzwertanalyse

Aspekt	Kriterium	Unterkriterium	Gewichtungsfaktor (gemäss Präferenzmatrix)	Dezentrale Lüftungsanlage		Dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage	
				Bewertung	Punkte	Bewertung	Punkte
Kosten	Erstellung		9.0%	0.0	0.0	0.3	0.0
Kosten	Raumbedarf		4.8%	9.3	0.4	4.7	0.2
Kosten	Betrieb		9.5%	2.2	0.2	0.0	0.0
Kosten	Wartung und Unterhalt		6.7%	0.0	0.0	2.6	0.2
Kosten	Akustik, Schallschutz		5.2%	10.0	0.5	0.0	0.0
Qualität	Ökologie	Erstellung	6.7%	0.0	0.0	0.5	0.0
		Betrieb	7.1%	4.7	0.3	2.9	0.2
Qualität	Flächen- und Raumbedarf		7.1%	9.2	0.7	4.8	0.3
Qualität	Flexibilität Raumeinteilung		7.6%	2.4	0.2	0.0	0.0
Qualität	Eingriff in Bausubstanz		1.0%	3.4	0.0	0.0	0.0
Qualität	Lüftungsgeräte	Ventilator	9.5%	7.5	0.7	6.3	0.6
		WRG	9.5%	1.1	0.1	4.0	0.4
Qualität	Akustik, Schallemissionen		9.5%	2.0	0.2	0.0	0.0
Zeit	Dauer für Erstellung		4.3%	9.5	0.4	4.3	0.2
Zeit	Lieferfristen		2.4%	4.0	0.1	4.4	0.1
			100%		**3.8**		**2.2**

10 SENSITIVITÄTSANALYSE

Um die Empfindlichkeit der Nutzwertanalyse in Bezug auf die ökonomischen Berechnungen zu beurteilen, wurde für den Kapitalzins, die Energiepreissteigerung und die allgemeine Preissteigerung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese drei Werte wurden angenommen und können mit der Zeit variieren, weshalb eine Sensitivitätsanalyse sinnvoll ist. Sowohl der Kapitalzins als auch die Energiepreissteigerung und die allgemeine Preissteigerung wurden zwischen 0 % und 3 % variiert. Zur Vereinfachung wurden die Energiepreissteigerung und die allgemeine Preissteigerung gemeinsam geändert. Die Gesamtpunktzahl der dezentralen Lüftungsanlage variierte kaum. Sie betrug nahezu immer 3.8 Punkte und stieg einmal auf 3.9 Punkte an, als der Kapitalzins bei 0 % und die Energiepreissteigerung sowie die allgemeine Preissteigerung bei 3 % lagen. Die Gesamtpunktzahl der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage sank hingegen mit zunehmendem Kapitalzins von 2.3 Punkten auf 2.1 Punkte ab. Diese 2.1 Punkte wurden bereits ab einem Kapitalzins von 2 % erreicht und sanken auch beim Erhöhen des Kapitalzinses auf 3 % nicht weiter ab. Die dezentrale Lüftungsanlage ist folglich kaum empfindlich hinsichtlich des Kapitalzinses, der Energiepreissteigerung und der allgemeinen Preissteigerung. Bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage wurde bezüglich der genannten Grössen eine grössere Sensitivität beobachtet, jedoch ist auch bei diesem Lüftungssystem die Empfindlichkeit eher gering. In der Abbildung 4 sind die Gesamtpunktzahlen der Lüftungssysteme in Abhängigkeit des Kapitalzinses, der Energiepreissteigerung und der allgemeinen Preissteigerung dargestellt.

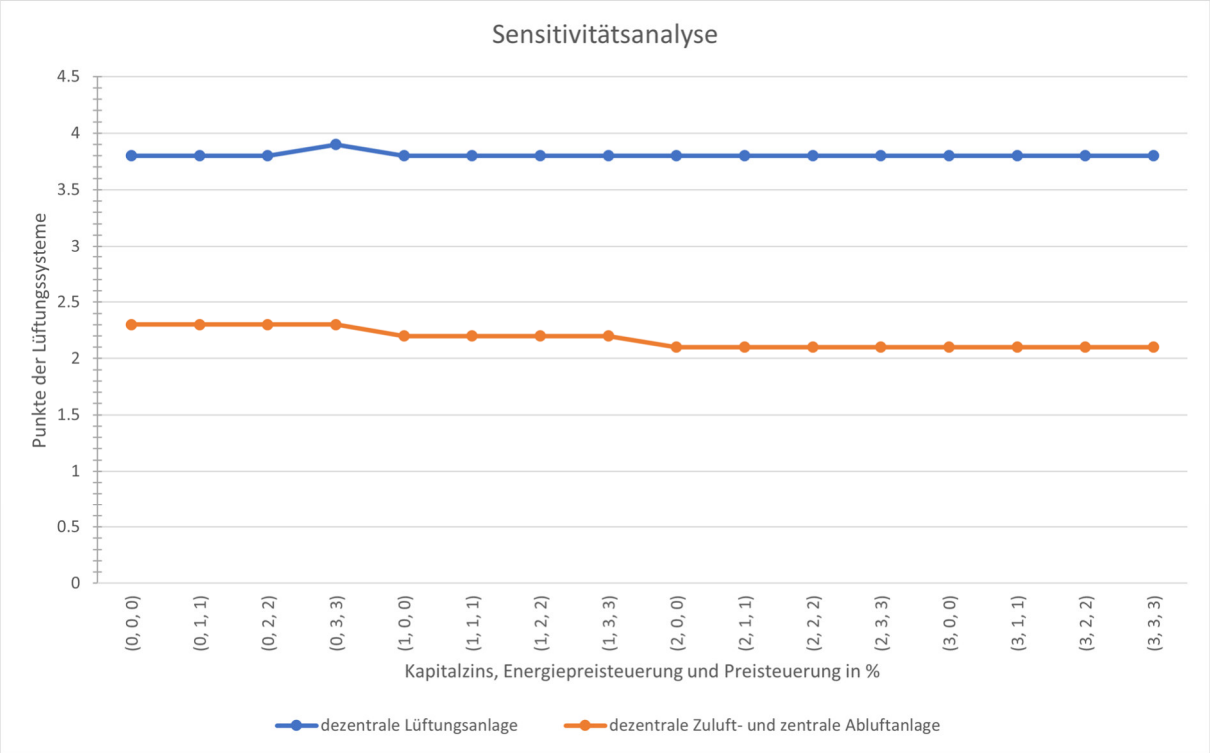


Abbildung 4: Sensitivitätsanalyse des Kapitalzinses, der Energiepreissteigerung und der allgemeinen Preissteigerung

11 DISKUSSION

Die durchgeführte Nutzwertanalyse hat ergeben, dass die dezentrale Lüftungsanlage für das Bachelor+-Projekt der Gruppe B besser geeignet ist als die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage. Somit ist der Einsatz der dezentralen Lüftungsanlage zu empfehlen. Das empfohlene und das geplante Lüftungssystem sind identisch. Dementsprechend wurde im Bachelor+-Projekt der Gruppe B das richtige Lüftungssystem gewählt und geplant.

Beim Vergleich hat sich herausgestellt, dass die Erstellungskosten der dezentralen Lüftungsanlage sowie der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage massiv höher ausfallen als bei einer Vollklimaanlage. Dies ist hauptsächlich auf die grosse Anzahl der dezentralen Lüftungs- und Zuluftgeräte resp. deren Preis zurückzuführen.

Die Annahme, dass der Flächen- und Raumbedarf bei der dezentralen Lüftungsanlage geringer ist als bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage, hat sich bestätigt. Der Hauptgrund liegt hier bei der Lüftungszentrale, dem Steigschacht und den Lüftungskanälen, welche für die zentrale Abluftanlage notwendig sind. Auch die grössere Installationsdauer der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage ist auf das Kanalsystem der zentralen Abluftanlage zurückzuführen. Mit den kompakten Lüftungsgeräten konnte die Installationsdauer der dezentralen Lüftungsanlage tief gehalten werden.

Die Lieferfristen der Lüftungsanlagen sind sehr ähnlich. Die hohen Lieferfristen bei den dezentralen Lüftungs- und Zuluftgeräten sind auf eine hohe Nachfrage in Deutschland zurückzuführen.

Entgegen der Erwartung, dass die dezentrale Lüftungsanlage mehr Durchdringungen der Aussenhülle aufweisen wird, hat sich gezeigt, dass die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage eine grössere Anzahl an Durchdringungen generiert. Dies ist auf die dreimal kleinere Luftmenge pro Zuluftgerät zurückzuführen. Dadurch mussten pro dezentralem Lüftungsgerät drei Zuluftgeräte installiert werden.

Obwohl bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage mehr Lüftungsgeräte eingesetzt wurden, sind die Wartungs- und Unterhaltskosten bei der dezentralen Lüftungsanlage höher. Der Grund liegt bei den höheren Filterkosten der Lüftungsgeräte.

Bei den Betriebskosten und der Ökologie im Betrieb wurde die Beobachtung gemacht, dass diese erheblich von der Wärme- und Kälteerzeugung abhängig sind. Im Bachelor+-Projekt der Gruppe B wird die Abwärme der Server zum Heizen und das Grundwasser zum Kühlen eingesetzt. Wenn für die Heizungsanlage jedoch eine Grundwasser-Wärmepumpe (Annahme: Heizenergiekosten 0.06 Fr./kWh, Treibhausgas-Emissionsfaktor 0.049 kg/kWh gemäss KBOB) und bei der Kälteanlage eine Kältemaschine mit Rückkühler (Annahme: Kälteenergiekosten ca. 0.08 Fr./kWh, Treibhausgas-Emissionsfaktor 0.063 kg/kWh gemäss KBOB) eingesetzt würde, so würde die Gesamtpunktzahl der dezentralen Lüftungsanlage auf 3.3 Punkte absinken und die Gesamtpunktzahl der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage auf 2.4 Punkte ansteigen. Die dezentrale Lüftungsanlage läge zwar immer noch vor der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage, der Vorsprung hätte sich jedoch um 0.7 Punkte auf 0.9 Punkte reduziert. Damit zeigt sich sehr gut, dass das Resultat vom Projekt abhängig ist und die Grundlagen einen starken Einfluss haben können. Die Grundlagen sind deshalb sorgfältig und mit Bedacht festzulegen. Dies ist besonders dann herausfordernd, wenn keine Grundlagen vorhanden sind und

Annahmen oder Abschätzungen getroffen werden müssen. Das war bei der Ökologie der Lüftungsanlagen der Fall. Die graue Energie und die Treibhausgasemissionen für die Erstellung der zentralen Abluftanlage konnten anhand der Rechenhilfe SIA 2040 Effizienzpfad (SIA, 2021) festgelegt werden. Bei den dezentralen Lüftungsgeräten mussten hingegen Abschätzungen anhand des Materials und deren Gewichtsanteil vorgenommen werden, da die Hersteller / Lieferanten keine Angaben zu den ökologischen Werten machen konnten. Damit besteht beim Kriterium Ökologie Erstellung eine gewisse Unsicherheit aufgrund der Grundlagen. Da die Resultate beider Lüftungssysteme eng beieinander liegen und nahezu gleich beurteilt wurden, ist die Unsicherheit jedoch vernachlässigbar.

Eine andere Problematik hat sich bei der Ermittlung der Flexibilität der Raumeinteilung ergeben. Die eingesetzte Formel führt nur zu einem korrekten Resultat, wenn die Raumdämpfung genügend gross ist, um den Schallleistungspegel der Schallquelle auf den Anforderungswert an Dauergeräusche zu dämpfen. Sobald die Differenz der beiden zu gross ist und in der Formel 12 der Wert von $10\text{^}((L_P - L_W)/10)$ kleiner ist als $Q/4 * \pi * d^2$, gibt die Formel einen falschen Wert aus. Dies war im vorliegenden Projekt der Fall. Deshalb musste der Anforderungswert von 30 dB auf 33 dB angehoben werden.

Um den Anforderungswert an Dauergeräusche zu erreichen, mussten bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage zusätzlich Schallschutzsets bei den Zuluftgeräten und Schalldämpfer bei der Abluftanlage eingesetzt werden. Die dezentrale Lüftungsanlage hingegen erreichte den Anforderungswert ohne weitere Schallschutzmassnahmen. Folglich fielen die Kosten für den Schallschutz bei der dezentralen Lüftungsanlage tiefer aus als bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage.

Die Schallemissionen der Lüftungsanlage im Raum wird normalerweise anhand dem Anforderungswert an Dauergeräusche sowie dem Schalldruckpegel der Lüftungsanlage beurteilt. Da sich der Schalldruckpegel aus dem Schallleistungspegel der Lüftungsanlage sowie der Raumdämpfung ergibt und die Raumdämpfung bei beiden Lüftungssystemen gleich gross ist, wurde zur Vereinfachung der Schallleistungspegel verwendet.

Für die Wärmerückgewinnung der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage ist ein Kreislaufverbundsystem (KVS) mit einer reversiblen (umkehrbaren) Wärmepumpe vorgesehen. Als Wirkungsgrad der WRG wurde der Wirkungsgrad einer durchschnittlichen Kreislaufverbundsystem-Wärmerückgewinnung angenommen. Die Wirkungsgrade der WRG der Brüstungs- und Deckenlüftungsgeräte wurden anhand des Produktdatenblatt des Hersteller (TROX HESCO, 2021) definiert. Die dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage weist einen höheren Wirkungsgrad auf als die Lüftungsgeräte der dezentralen Lüftungsanlage.

Die Ventilatoren der Lüftungsanlagen weisen sehr gute Werte auf. Die dezentralen Lüftungs- und Zuluftgeräte sind in der Kategorie SFP 1. Dies ist auf den geringen Druckverlust der Geräte zurückzuführen. Der Ventilator der zentralen Abluftanlage fällt in die Kategorie SFP 2. Der Grund liegt hier im grösseren Druckverlust der Lüftungsanlage. Der Druckverlust wurde anhand der SIA 382/1 (SIA, 2014) abgeschätzt und könnte in einem weiteren Schritt noch detaillierter berechnet werden.

Auch beim Bewertungsraster konnte eine starke Abhängigkeit beobachtet werden. Da ein dynamisches Bewertungsraster eingesetzt wird, ist das Bewertungsraster neben den statischen Grenzen von den Resultaten der Kriterien abhängig. Dadurch beeinflussen die Grundlagen neben der Berechnung der Kriterien auch das Bewertungsraster. Mit den statischen Grenzen kann dem Bewertungsraster eine gewisse

Stabilität ermöglicht werden. Wenn beispielsweise zwei Resultate in einem Kriterium nahe beieinander liegen und keine statischen Grenzen festgelegt sind, erhält ein Lüftungssystem 0 Punkte und das andere Lüftungssystem 10 Punkte, obwohl die Resultate der Kriterien ähnlich sind. Dies hat zur Folge, dass ein Lüftungssystem massiv unterbewertet wird, während das andere Lüftungssystem massiv überbewertet wird. Das Resultat der Nutzwertanalyse wird dadurch verfälscht. Werden hingegen zusätzlich statische Grenzen definiert, können weitere Teilpunkte vergeben werden. Damit lassen sich Über- sowie Unterbewertungen verhindern.

Bei der Erarbeitung der Präferenzmatrix hat sich gezeigt, dass bezüglich der Wichtigkeit der Kriterien eine gewisse Vorstellung seitens der wertenden Person notwendig ist. Um eine höhere Objektivität zu erreichen, ist es empfehlenswert, die Präferenzmatrix von mehreren Personen unabhängig voneinander ausfüllen zu lassen. Die Rangliste der Kriterien aus der Präferenzmatrix kann als Kontrollinstrument genutzt werden. Falls unwichtige Kriterien zu hoch resp. wichtige Kriterien zu tief eingestuft werden, muss die Präferenzmatrix noch einmal überarbeitet werden.

12 FAZIT

Das Ziel der Bachelorthesis war der Vergleich der dezentralen Lüftungsanlage und der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage für das Bachelor+-Projekt der Gruppe B. Hierzu sollte ein Vergleichstool erarbeitet und anhand des Resultats eine Empfehlung für ein Lüftungssystem abgegeben werden. Danach sollte die Empfehlung und das eingesetzte Lüftungssystem im Bachelor+-Projekt verglichen werden. Für den Vergleich wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt.

Der Vergleich der beiden Lüftungssysteme in der Nutzwertanalyse hat ergeben, dass die Gesamtpunktzahl bei der dezentralen Lüftungsanlage 3.8 Punkte und bei der dezentralen Zuluft- und zentralen Abluftanlage 2.2 Punkte beträgt. Als Lüftungssystem ist somit für das Bachelor+-Projekt die dezentrale Lüftungsanlage zu empfehlen.

Da im Bachelor+-Projekt der Gruppe B eine dezentrale Lüftungsanlage vorgesehen ist, stimmt das empfohlene und das geplante Lüftungssystem überein. Bei der Entscheidung für das Lüftungssystem wurde also die richtige Wahl getroffen. Das geplante Lüftungssystem kann somit wie vorgesehen eingesetzt werden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Visualisierung des Bachelor+-Projekts (Agugliaro et al., 2022)..... 8
Abbildung 2: Dezentrale Lüftungsanlage..... 9
Abbildung 3: Dezentrale Zuluft- und zentrale Abluftanlage 10
Abbildung 4: Sensitivitätsanalyse des Kapitalzinses, der Energiepreissteigerung und der allgemeinen Preissteigerung..... 36

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Spezifische Kosten, technische Lebensdauer und Lieferfristen der Komponenten der zentralen Abluftanlage 7
Tabelle 2: Montagezeiten der Komponenten der zentralen Abluftanlage 7
Tabelle 3: Merkmale Lufterneuerung von zentralen und dezentralen Lüftungsanlagen 11
Tabelle 4: Klassierung der spezifischen Ventilatorleistung gemäss SIA 382/1 (SIA, 2014) 32
Tabelle 5: Rangliste der Kriterien gemäss Präferenzmatrix 34
Tabelle 6: Nutzwertanalyse 35

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1 - Annuitätsfaktor 14
Formel 2 - Mittelwertfaktor wenn i ≠ e 15
Formel 3 - Mittelwertfaktor wenn i = e 15
Formel 4 - Kapitalkosten 15
Formel 5 - Betriebs-, Wartungs- und Unterhaltskosten 15
Formel 6 - Nettogeschossfläche Lüftungszentrale 21
Formel 7 - Lichte Raumhöhe Lüftungszentrale 21
Formel 8 - Schachtquerschnitt des Steigschachts wenn $\dot{V} < 4000$ m³/h 22
Formel 9 - Schachtquerschnitt des Steigschachts wenn $\dot{V} > 4000$ m³/h 22
Formel 10 - Sabinesche Formel 23
Formel 11 - Schalldruckpegel im Raum 23
Formel 12 - Kleinste maximal flexible Raumfläche 23
Formel 13 - Schallpegeladdition 24
Formel 14 - Spezifische Ventilatorleistung (SFP-Wert) 25

LITERATURVERZEICHNIS

Agugliaro, C., Durrer, I., Jauch, T., Schindler, L., & Schnieper, R. (2022). *Projekthandbuch Werk-Atelier—Bachelor+ Gruppe B*. Hochschule Luzern - Technik & Architektur.

EnDK. (2018). *Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn)*. Konferenz Kantonaler Energiedirektoren.

KBOB. (2016). *Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1*. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren.

Odermatt, A. (2020). *Skript Modul TA.HLS2—Grundlagen Akustik*. Hochschule Luzern - Technik & Architektur.

Odermatt, A. (2021). *Skript Modul TA.HLS4—Akustik*. Hochschule Luzern - Technik & Architektur.

Prof. Rieder, U., & Felder, P. (2012). *Skript Modul TA.IP - Wirtschaftlichkeitsberechnungen*. Hochschule Luzern - Technik & Architektur.

SIA. (2014). *SIA 382/1 Lüftungs- und Klimaanlagen—Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SIA. (2017). *SIA 2040 SIA-Effizienzpfad Energie*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SIA. (2020). *SIA 181 Schallschutz im Hochbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SIA. (2021). *Rechenhilfe SIA 2040-Effizienzpfad Energie*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

SWKI. (2019). *SWKI VA104-01 Raumlufttechnik—Luftqualität—Teil 1: Hygieneanforderungen an raumlufttechnische Anlagen und Geräte*. Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren.

Topmotors. (2021). *Merkblatt Nr. 24—Luftförderung*. https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_24_Luftfoerderung.pdf

TROX HESCO. (2020). *Produktdatenblatt Brüstungslüftungsgeräte SCHOOLAIR-B*. https://www.troxhesco.ch/downloads/e920b8a2b2139a23/SA-B_PD_2020_04_22_DE_de.pdf?type=product_info

TROX HESCO. (2021). *Produktdatenblatt Deckenlüftungsgeräte SCHOOLAIR-D*. https://www.troxhesco.ch/downloads/860df6e444f6aa92/SA-D_PD_2021_09_14_DE_de.pdf?type=product_info

VKF. (2017). *Brandschutzrichtlinie 14-15 Verwendung von Baustoffen*. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen.

WESCO. (2014). *Broschüre AIRBOX und INSTABOX*. https://my.wesco.ch/api/media/celum_6902

ANHANG

- Anhang zu Kapitel 3.3 Allgemeine Grundlagen
- Anhang zu Kapitel 7.1.1 Erstellung
- Anhang zu Kapitel 7.1.2 Raumbedarf
- Anhang zu Kapitel 7.1.4 Wartung und Unterhalt
- Anhang zu Kapitel 7.2.3 Flächen- und Raumbedarf
- Anhang zu Kapitel 7.3.1 Dauer für Erstellung