

Signifikante Vermeidung von CO₂ und
Energieverlusten über den Aufzugschacht:

Anwendung smarter Schachtbelüftungssysteme in
Mehrfamilienhäusern

Ergebnisse der empirischen Untersuchung



Kurzfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurde untersucht, ob die Installation von Entrauchungsklappen an Aufzugsschächten einen positiven Einfluss auf die energetische Situation von Mehrfamilienhäusern hat. Durchgeführt wurde die wissenschaftliche Untersuchung am Ben-Gurion-Ring in Frankfurt am Main, an Gebäuden der GWH.

Um die Wirkung des so genannten Kamineffekts zu untersuchen, wurden Messinstrumente in einem Lüftungskanal angebracht, welcher einen Aufzugsschacht mit der Außenluft verbindet und im Brandfall der Entrauchung dient. Bei dem Vergleich von Gebäuden, welche diese Entrauchungsklappe installiert bzw. noch nicht installiert haben, hat sich herausgestellt, dass signifikante Einsparungen durch diese Technik möglich sind.

Die genaue Menge der Einsparung kann stark variieren und hängt von vielen Faktoren ab, wie zum Beispiel dem Wetter, der Größe des Gebäudes und der Innentemperatur. Grundsätzlich lässt sich aber klar feststellen, dass der Effekt bei geringen Außentemperaturen und hohen Innentemperaturen am größten ist.

Im Zeitraum von zwei Wochen konnten Einsparungen von ca. 680 kWh in einem Mehrfamilienhaus erreicht werden, in welchem der Aufzugsschacht über 10 Haltestellen, mit jeweils einem Zugang verfügt. Die durchschnittliche Außentemperatur lag zu dieser Zeit bei ca. 4 °C. Diese Ergebnisse entsprechen den Erwartungen und sind durch andere Untersuchungen bestätigt. Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass die Ergebnisse stark variieren können. In diesem Projekt wurde ein ähnliches Gebäude untersucht, welches kürzlich saniert wurde und daher ein geringeres Einsparpotential aufweist, obwohl es von der Größe, der Nutzung und des Aufzugsschachtes her identisch ist.

Zusätzlich wurde eine Extrapolation für die Heizperiode 2022/23 durchgeführt. Diese zeigt, dass Einsparungen von 7943 kWh Nutzenergie pro Jahr und 1,3 t CO₂ – Emissionen pro Jahr möglich sind.¹ Diese Studie lässt den Schluss zu, dass der Kamineffekt in Gebäuden deutlich messbar auftritt und einen deutlichen CO₂ Ausstoß provoziert. Der Einbau von Entrauchungsklappen wird daher in den betrachteten Häusern als sinnvoll erachtet. Es empfiehlt sich weiterhin vorhandene Aufzugsschächte in Bestandsgebäuden auf Einsparungspotential zu prüfen. Vor allem in ähnlichen Gebäudeklassen können deutliche Energieeinsparungen erreicht werden.

¹ Bezogen auf den Energieträger der betrachteten Gebäude (165 gCO₂/kWh_{th}). Nähere Erläuterungen in 4.4.

Inhalt

Kurzfassung.....	1
Inhalt	2
Abbildungsverzeichnis	3
1 Hintergrund und Zielsetzung des Projekts	4
2 Grundlagen und Methodik	5
2.1 Grundlagen zum Kamineffekt.....	5
2.2 Stand der Technik und verordnungsrechtlicher Hintergrund	6
2.3 Versuchsumgebung	7
2.4 In diesem Projekt verwendete Formeln	9
3 Versuchsaufbau und Versuchsablauf.....	10
3.1 Verwendete Messgeräte	10
3.2 Versuchsbeschreibung	11
3.2.1 Messungen im Technikraum und Lüftungskanal.....	11
3.2.2 Messungen im Treppenhaus.....	13
4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	14
4.1 Messungen im Technikraum und Lüftungskanal	14
4.2 Messungen im Treppenhaus und Aufzugsschacht	17
4.2.1 Aufnahmen Wärmebildkamera	18
4.2.2 Untersuchung der Luftbewegung mittels Smoke- Pen.....	19
4.3 Bestimmung von Abhängigkeiten	20
4.3.1 Prüfung einer Abhängigkeit der thermischen Leistung zur Temperaturdifferenz 20	
4.3.2 Prüfung einer Abhängigkeit der thermischen Leistung zur Aufzugsnutzung	21
4.3.3 Untersuchung von Tag und Nachteffekten auf die thermische Leistung	22
4.4 Extrapolation auf eine gesamte Heizperiode zur Bestimmung von Energieverlusten und CO ₂ - Emissionen.....	23
4.5 Vergleich der Messergebnisse mit einem Rechentool zur Verlustbestimmung	25
4.6 Referenzprojekt.....	29
5 Fazit	30
6 Anhang	31
7 Literatur.....	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links eigene Darstellung. Rechts: Darstellung des Kamineffekts der pädagogischen Hochschule Steiermark.....	5
Abbildung 2: Entrauchungsklappe im Gebäude BGR 6.....	6
Abbildung 3: Eigene schematische Darstellung eines Versuchsgebäudes (links) / Foto des untersuchten Gebäudes BGR 4 (rechts).....	7
Abbildung 4: Ausgang des Lüftungskanals von außen.....	8
Abbildung 5: Lüftungsgitter im Technikraum von Gebäude BGR 06.....	8
Abbildung 6: Aufzugsseile Gebäude BGR 06.....	8
Abbildung 7: Versuchsaufbau am Lüftungskanal (Skizze).....	12
Abbildung 8: Versuchsaufbau am Lüftungskanal.....	12
Abbildung 9: Darstellung der thermischen Leistung über den gesamten Messzeitraum.....	14
Abbildung 10: Darstellung der thermischen Verlustleistung am 24.2.2023.....	15
Abbildung 11: Messergebnisse der Luftgeschwindigkeit [m/s] und Temperatur [°C] am Lüftungsgitter im Technikraum.....	16
Abbildung 12: Darstellung Temperatur- Datenlogger.....	16
Abbildung 13: Darstellung der Aufzugsnutzung.....	17
Abbildung 14: Darstellung der Temperaturen im Aufzugsschacht.....	18
Abbildung 15: Aufnahme Wärmebildkamera Gebäude 04.....	19
Abbildung 16: Luftströmung an Aufzugstüren. Links Gebäude BGR 6 (keine Klappe vorhanden) u. rechts Gebäude BGR 4 (Klappe geschlossen).....	19
Abbildung 17: Thermische Verlustleistung in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz.....	20
Abbildung 18: Volumenstrom und Luftkanaltemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur.....	21
Abbildung 19: Boxplot Darstellung der thermischen Leistung in Abhängigkeit zur Außentemperatur.....	22
Abbildung 20: Darstellung der thermischen Leistung tagsüber.....	22
Abbildung 21: Darstellung der thermischen Leistung bei Nacht.....	23
Abbildung 22: Ergebnisse Extrapolation für BGR 6 und BGR 26.....	24
Abbildung 23: Ergebnisse Extrapolation für BGR 4 und BGR 26 (Klappe im Normalbetrieb) ..	24
Abbildung 24: Rechentool zur Bestimmung von thermischer Verlustleistung.....	26
Abbildung 25: Vergleich des Rechentools mit den Messergebnissen in Gebäude BGR 4.....	27
Abbildung 26: Messung der Energieverluste durch die Rauchabzugsöffnung (Dipl. Ing. Gerhard Nickel).....	29
Abbildung 27: Ausgang Lüftungskanal Gebäude BGR 6.....	31
Abbildung 28: Heizungsrohre BGR 4.....	31
Abbildung 29: Abbildung eines Fensters in BGR 4.....	31

1 Hintergrund und Zielsetzung des Projekts

Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten, der neu eingeführten CO₂ – Abgabe und des Klimawandels ist es nötig, dass vorhandene Potentiale zur CO₂ – Einsparung im Gebäudesektor analysiert und wenn möglich genutzt werden. Aus diesem Grund wurde die EBZ – Business School (Projektleitung Prof. Dr. Grinewitschus, Professur für Energiefragen der Immobilienwirtschaft) beauftragt, eine Untersuchung in Gebäuden der GWH Immobilien Holding GmbH durchzuführen.

Das Ziel dieses Projekts ist es, den Effekt einer Entrauchungsklappe auf den Energiebedarf und die CO₂- Emissionen eines Mehrfamilienhauses zu bestimmen. In 6 Gebäuden der GWH wurden bereits gemeinsam mit der Firma Simplifa IoT-Geräte zur 24/7 Überwachung des Aufzugbetriebs installiert und Entrauchungsklappen des Herstellers B.A.S.E. Solution im Aufzugschacht eingebaut. Die Entrauchungsklappen werden über eine Steuerung mit verbauten Rauchmeldern sowie einem Feuchtigkeits- und Temperatursensor verbunden. Zusätzlich wird die Entrauchungsklappe alle 12 Stunden für eine hygienische Lüftung angesteuert. Das Öffnen im Lüftungsmodus erfolgt geräuschlos, so dass die Bewohner keiner zusätzlichen Geräuschemission ausgesetzt werden.

Nähere Informationen zur Funktionsweise der Entrauchungsklappe und dem aktuellen Stand der Technik werden ebenfalls erörtert. Es soll ein Vergleich zwischen drei typischen Mehrfamilienhäusern durchgeführt werden, zwei Gebäude, welche eine derartige Vorrichtung bereits haben und einem, welches diese Vorrichtung noch nicht hat. Dafür werden Messungen innerhalb des Gebäudes durchgeführt. Diese dienen dazu die thermische Situation des Gebäudes und den Kamineffekt, der die Energieverluste maßgeblich beeinflusst, innerhalb des Aufzugschachtes zu verstehen. Zu den Messungen innerhalb des Gebäudes werden Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Analyse herangezogen.

Diese Erkenntnisse sollen genutzt werden, um zu bestimmen, wie sich die Installation von Entrauchungsklappen auf die Energieverluste des Gebäudes auswirkt. Zum Vergleich wird eine Methode zur Bestimmung der Verlustleistung über Entrauchungsklappen verwendet.

2 Grundlagen und Methodik

2.1 Grundlagen zum Kamineffekt

Der Effekt, welcher im Rahmen dieses Projekts genauer untersucht wird, ist der so genannte Kamineffekt. Dieser sorgt dafür, dass Luft innerhalb des Aufzugsschachtes aufsteigt und entweicht. Eine Entrauchungsklappe soll diesen Effekt minimieren. Der Kamineffekt soll in diesem Absatz kurz erläutert werden.

Der Kamineffekt basiert auf der natürlichen Konvektion. Konvektion ist eine Art der Wärmeübertragung und sorgt dafür, dass erwärmte Luft auf natürliche Weise aufsteigt, ohne dass diese Luftbewegung erzwungen werden muss (bspw.: durch einen Ventilator). Wenn diese natürliche Konvektion in einem offenen, vertikalen Schacht stattfindet, dann wird dieser Effekt durch den so genannten Kamineffekt verstärkt. Wenn die warme Luft innerhalb des Aufzugsschachtes aufsteigt (Konvektion), entsteht ein Sog, welcher warme Luft aus dem Treppenhaus in den Aufzugsschacht bewegt. Diese Luft steigt wiederum auf und verstärkt die Luftströmung im Schacht. Es entsteht also ein sich selbst erhaltender Effekt, welcher durch die Temperaturunterschiede zwischen Treppenhaus und Aufzugsschacht zur Außentemperatur verstärkt wird. [1]

Dieser Effekt ist gewünscht, da er im Brandfall dafür sorgt, dass Rauch durch den Aufzugsschacht nach oben abgeleitet wird. Allerdings führt er auch zu den in diesem Projekt untersuchten Wärmeverlusten. In den folgenden Abbildungen ist der Kamineffekt dargestellt:

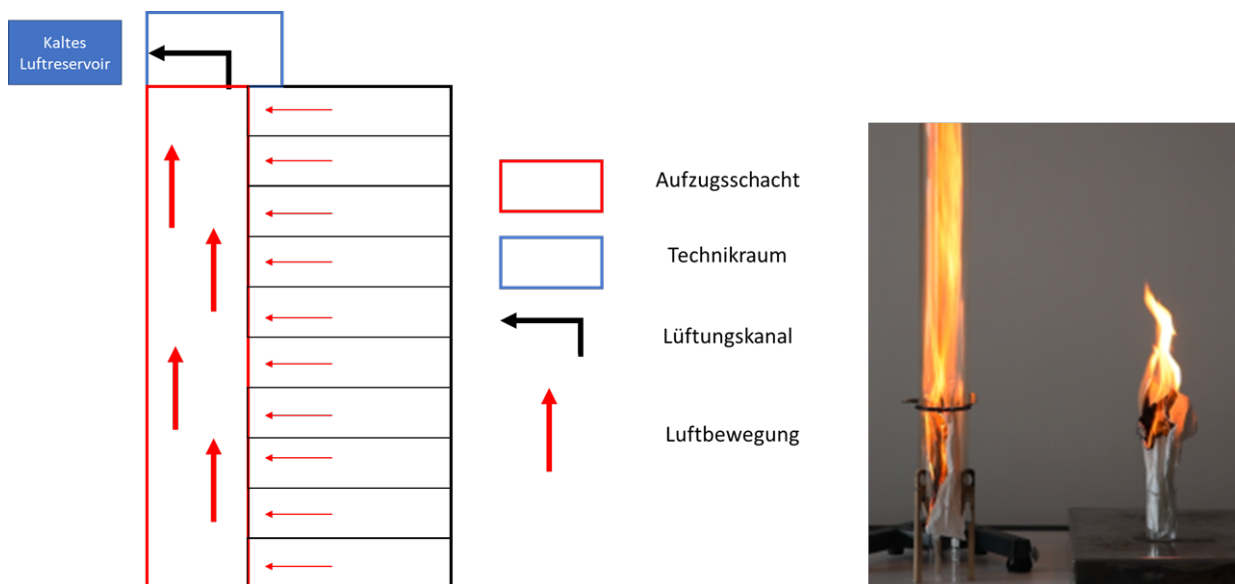


Abbildung 1: Links eigene Darstellung. Rechts: Darstellung des Kamineffekts der pädagogischen Hochschule Steiermark

Aus Abbildung 1 wird auch ersichtlich, dass die Fahrbewegung des Aufzugs nicht benötigt wird, um eine Luftbewegung aus dem Aufzugsschacht heraus zu generieren. Die Nutzung des Aufzugs hat also voraussichtlich keinen primären Effekt auf die durch den Lüftungskanal abgegebene thermische Leistung.

2.2 Stand der Technik und verordnungsrechtlicher Hintergrund

Aus Gründen des Brandschutzes müssen Aufzüge und insbesondere Aufzugsschächte gewisse Standards erfüllen. Diese können sich je nach Landesbauordnung (LBO) unterscheiden.

Gemäß Musterbauordnung (§ 39 Abs. 3, Satz1 MBO) aus dem Jahr 2019 müssen:

„Fahrschächte zu lüften sein und eine Öffnung zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von mindestens 2,5 von Hundert der Fahrschachtgrundfläche, mindestens jedoch 0,10 m² haben“ [2]

Dieser Standard ist in den Gebäuden der GWH erfüllt. Allerdings führt die hier beschriebene Methode zur Entrauchung dazu, dass es zu einem Wärmeverlust durch den Kamineffekt innerhalb des Aufzugsschachtes kommen kann. Die Musterbauordnung sieht daher in (§ 39 Abs. 3, Satz2 MBO) vor, dass diese Öffnung im normalen Betrieb, also immer, wenn kein Brandfall vorliegt, geschlossen werden darf:

„Diese Öffnung darf einen Abschluss haben, der im Brandfall selbsttätig öffnet [...]“ [2]

Diese technische Lösung wurde nun bei einigen Gebäuden der GWH umgesetzt. Die Steuerung sieht vor, dass sich die Entrauchungsklappe im Brandfall, sowie alle 12 Stunden öffnet, um eine kontrollierte Lüftung zu erreichen. In Abbildung 2 ist eine solche Entrauchungsklappe dargestellt.



Abbildung 2: Entrauchungsklappe im Gebäude BGR 6

2.3 Versuchsumgebung

Die Versuche, welche im Rahmen, dieses Projekts durchgeführt wurden, fanden in typischen Mehrfamilienhäusern der GWH am Ben-Gurion-Ring in Frankfurt am Main statt. Insgesamt wurden drei Gebäude mit verschiedenen Messgeräten ausgestattet.

Die drei Gebäude wurden aufgrund ihrer Vergleichbarkeit ausgewählt. Alle Gebäude verfügen über einen Aufzug mit insgesamt 10 Haltestellen und jeweils einem Zugang (Keller, EG und 8-OG's). Außerdem haben sie die gleiche Anzahl an Wohnungen und werden auf die gleiche Art mit Wärme versorgt. Eine Lüftungsanlage ist nicht vorhanden. Die Gebäude sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

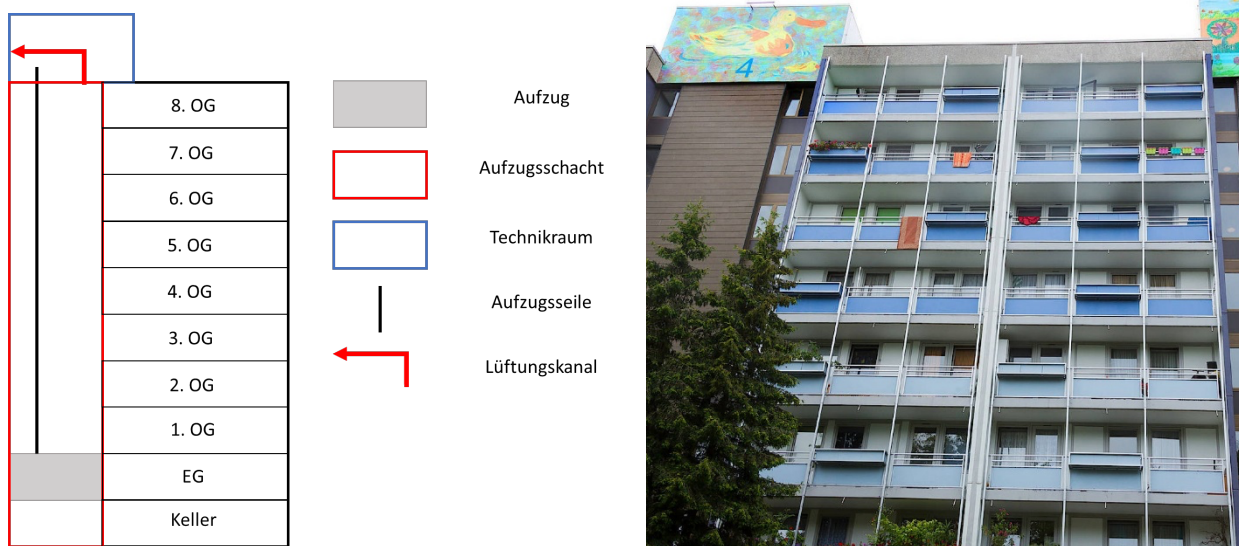


Abbildung 3: Eigene schematische Darstellung eines Versuchsgebäudes (links) / Foto des untersuchten Gebäudes BGR 4 (rechts)

Abgesehen von den Aufzugstüren auf den einzelnen Etagen gibt es zwei Wege, auf denen Luft den Aufzugsschacht verlassen kann:

1. Die Öffnung zur Entrauchung an der Decke des Aufzugsschachtes. Diese ist in Abbildung 3 nicht explizit eingezeichnet, sie befindet sich am Übergang zwischen Aufzugsschacht und Lüftungskanal. Von dieser Öffnung aus gelangt die Luft durch den dargestellten Lüftungskanal nach außen. Auf diesem Weg erfolgt keine Kontamination mit der Luft innerhalb des Technikraums. In Abbildung 4 ist die Außenwand des Technikraums zu sehen und die vor Wettereinflüssen abgeschirmte Öffnung des Technikraums. In Abbildung 2 ist die Entrauchungsklappe dargestellt, welche diesen Weg verschließt.



Abbildung 4: Ausgang des Lüftungskanals von außen

2. Damit der Aufzug gehoben und gesenkt werden kann, werden Stahlseile vom Technikraum aus nach unten geführt. Durch die dafür benötigten Öffnungen in der Schachtdecke kann Luft aus dem Aufzugsschacht in den Technikraum entweichen. Diese Öffnungen werden von der Entrauchungsklappe nicht erfasst und sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Luft, welche sich im Technikraum befindet, kann durch ein Lüftungsgitter nach außen gelangen. Dieses ist 25 cm x 35cm groß und durch Lamellen abgedeckt. Bei der Begehung vor Ort wurde festgestellt, dass tatsächlich Luft durch dieses Lüftungsgitter entweicht. Das Lüftungsgitter ist in Abbildung 5 dargestellt. Auf dem Bild ist außerdem ein Messgerät zu sehen, welches im Rahmen dieser Versuche verwendet wurde.



Abbildung 6: Aufzugsseile Gebäude BGR 06



Abbildung 5: Lüftungsgitter im Technikraum von Gebäude BGR 06

Die hier dargestellten Wege müssen im Versuchsaufbau berücksichtigt werden.

2.4 In diesem Projekt verwendete Formeln

Aus den gemessenen Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten wird die thermische Leistung bestimmt, welche aus dem Gebäude entweicht. Die dafür verwendeten Formeln sind im Folgenden dargestellt:

$$V'(t) = v(t) * h * b$$

$$m'(t) = V'(t) * \rho_{Luft}$$

$$P_{thermisch}(t) = c_{Luft} * m'(t) * (T(t) - T_{aussen}(t))$$

$V'(t)$ = Volumenstrom durch den betrachteten Schacht [m^3/s]

$v(t)$ = Im Lüftungskanal gemessene Luftgeschwindigkeit [m/s]

h, b = Höhe und Breite des Schachtes [m]

$m'(t)$ = Massenstrom der Luft im betrachteten Schacht [kg/s]

ρ = Dichte von Luft (konstant angenommen): $1,2 \text{ kg}/m^3$ [3]

$P_{thermisch}(t)$ = gemessene thermische Leistung, welche durch den Schacht entweicht [W]

c_{Luft} = spezifische Wärmekapazität von Luft (konstant angenommen): $1020 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$

$T(t)$ = Lufttemperatur im betrachteten Schacht [$^{\circ}C$]

$T_{aussen}(t)$ = Durch den DWD erfasste Außentemperatur [$^{\circ}C$]

3 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

In diesem Versuch werden die Mehrfamilienhäuser im Ben-Gurion-Ring (BGR) 4, BGR 6 und BGR 26 in Frankfurt am Main betrachtet. Alle diese Gebäude verfügen über 9 bewohnte Etagen, die gleiche Anzahl an Wohnungen und einen baugleichen Aufzug. Zusätzlich wurde das Gebäude BGR 26 nachträglich modernisiert. Die Modernisierung wurde im Jahr 2021 durchgeführt und umfasste folgende Maßnahmen:

- Wärmedämmverbundsystemarbeiten mit einer Dämmstärke von 16 cm.
- Dämmung der Dachfläche mit einer Dämmstärke von i.M. 26,5 cm. Bei diesen Arbeiten sind die Aufzugsüberfahrten ebenfalls gedämmt worden.
- Erneuerung der Fenster mit einer 3- fach Verglasung.
- Erneuerung der Hauseingangstür.
- Erneuerung der Treppenhausfenster mit einer 2- fach Verglasung.
- Durchführung eines hydraulischen Abgleichs.

Die Gebäude BGR 4 und BGR 26 verfügen über eine Entrauchungsklappe, Gebäude BGR 6 besitzt keine. Vor diesem Hintergrund wurde folgender Versuchsablauf ausgewählt:

Tabelle 1: Übersicht Ben-Gurion-Ring 4,6 und 26 in Frankfurt am Main

Status der Klappen während des Testzeitraums (23.2. – 9.3.2023)	
Gebäude BGR 4	Klappe im Normalbetrieb (Öffnung alle 12 h)
Gebäude BGR 6	Keine Klappe vorhanden
Gebäude BGR 26	1. Woche: Normalbetrieb 2. Woche: geschlossen

Es soll der Unterschied zwischen einem Gebäude mit Entrauchungsklappe und einem Gebäude ohne Entrauchungsklappe bei identischen Wetterbedingungen dargestellt werden. Um auch Effekte zu erkennen, welche gebäudeabhängig sind, wird zusätzlich das Gebäude BGR 26 mit einbezogen.

3.1 Verwendete Messgeräte

In diesem Kapitel werden die verwendeten Messgeräte dargestellt.

Anemometer:

Zur Messung der Luftströmung im Lüftungskanal und an Lüftungsgittern, wurden thermische Anemometer der Firma „ELK – Gesellschaft für Erstellung, Layout und Konzeption

elektronischer Systeme mbH“ verwendet. Diese haben einen Messbereich von 0,01 m/s bis 5 m/s bei einer Toleranz von 0,01 m/s. Die Messgeräte verfügen über einen Stab, welcher 8 cm lang ist.

Die Messgeräte werden mit einem Datenlogger des Typs „Bappu evo“ verbunden, welcher von der gleichen Firma entwickelt wurde. Das Messintervall wird im Datenlogger eingestellt und beträgt 180 Sekunden. Gespeichert wird jeweils der Mittelwert über diesen Zeitraum, sowie maximale und minimale Werte. [4]

Thermometer:

Für die Messungen wurden zwei verschiedene Thermometer verwendet. Zur Messung der Temperatur im Lüftungskanal und an Lüftungsgittern wurden Thermometer verwendet, welche an dem oben genannten Datenlogger „Bappu evo“ integriert sind. Die Thermometer können ebenfalls 8 cm tief im Lüftungskanal platziert werden. Der Messbereich beträgt -20 °C bis 50 °C bei einer Toleranz von +/- 0,5 °C. Das Messintervall beträgt ebenfalls 180 Sekunden. [4]

Zur Messung von Temperaturen in den Treppenhäusern wurden Temperatur- Datenlogger vom Typ „PKDL A1“ der Firma Parkside verwendet. Diese messen die Temperatur mit einer Genauigkeit von +/- 0,5 °C in einem Messbereich von -30 bis 70 °C. Das eingestellte Messintervall beträgt 60 Sekunden.

Wärmebildkamera:

Es wurde eine Wärmebildkamera vom Typ „TG267“ des Unternehmens FLIR verwendet. Diese hat einen Temperaturmessbereich von -25°C – 380 °C und einer Messgenauigkeit von +/- 1 °C. Mit der Wärmebildkamera können thermisch signifikante Stellen erkannt und fotografiert werden. Die Fotos liegen für diesen Bericht vor. [5]

Smoke Pen

Bei dem Smoke Pen handelt es sich um einen brennbaren Stoff, welcher in einem Gehäuse, ähnlich dem eines Stifts, eingebaut ist. Durch Anzünden des Stoffes ist es möglich eine geringe Menge Rauch zu erzeugen, welche laminar aufsteigt. Auf diese Weise lassen sich geringe Luftströmungen sichtbar machen.

3.2 Versuchsbeschreibung

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau beschrieben. Es wurden sowohl Messungen im Technikraum des Gebäudes als auch im Treppenhaus durchgeführt.

3.2.1 Messungen im Technikraum und Lüftungskanal

Der Luftstrom, welcher durch den Lüftungskanal entweicht, wird mit einem thermischen Anemometer gemessen. Die Temperatur mit einem Thermometer der Firma ELK. Beide Geräte werden jeweils durch eine Bohrung mittig auf dem Lüftungskanal ca. 8 cm tief in den Luftstrom eingeführt. Die Daten werden von dem Datenlogger der Firma ELK gespeichert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 skizziert. Außerdem ist in Abbildung 8 ein Bild des Versuchsaufbaus dargestellt.

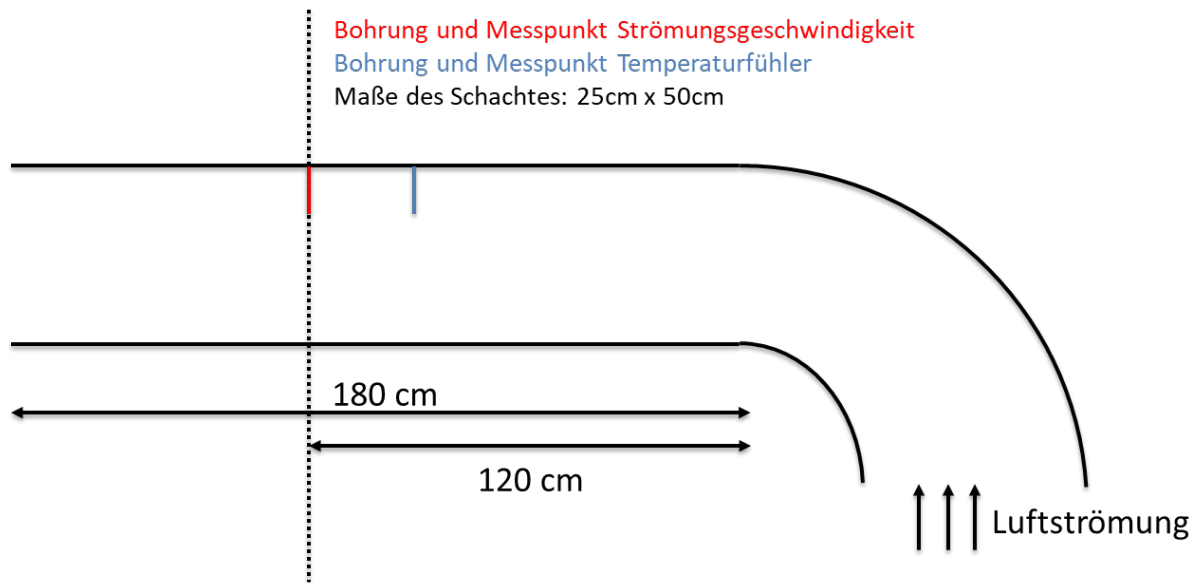


Abbildung 7: Versuchsaufbau am Lüftungskanal (Skizze)



Abbildung 8: Versuchsaufbau am Lüftungskanal

Zusätzlich zu dem Luftstrom im Lüftungskanal wird der Luftstrom erfasst, welcher wie in 2.3 beschrieben, durch das Lüftungsgitter aus dem Technikraum entweicht. Diese Messungen werden ebenfalls mit einem Anemometer und einem Thermometer erfasst, welche über einen Datenlogger verbunden sind. Bei dieser Messung wird kein homogen verteilter Luftstrom gemessen. Es ist nicht davon auszugehen, dass die am Anemometer anliegende Luftgeschwindigkeit für die gesamte Fläche der Öffnung gilt. Am Ort der Messung gab es keine Möglichkeit der Stromversorgung. Daher war es nicht möglich die Messung über eine gesamte Woche durchzuführen. Die Geräte arbeiteten in den verschiedenen Gebäuden zwischen einem und vier Tagen.

Des Weiteren werden in den Technikräumen der Gebäude BGR 4 und BGR 6 Temperaturdatenlogger ausgelegt, welche die Temperatur und die Luftfeuchte mit einem Intervall von 60 Sekunden aufzeichnen. Diese sollen zeigen, ob ein Temperaturunterschied

zwischen den Technikräumen erkennbar ist, welcher sich auf die Stellung der Entrauchungsklappe zurückführen lässt.

3.2.2 Messungen im Treppenhaus

Auf den Kabinendecken der Aufzüge sind standardmäßig Messinstrumente verbaut, welche u.a. die Temperatur im Aufzugsschacht in einem 15 Minuten Intervall bestimmen. Diese Daten stehen auch historisch zu Verfügung. Die Sensorik der Aufzüge erfasst außerdem den Betrieb der Aufzüge, also wann sie in Betrieb sind, und welche Höhenänderung erfolgt ist. Die Höhenänderungen weisen einige fehlerhafte Messwerte auf, weil der Aufzug teilweise höher fährt, als das Gebäude (unter Berücksichtigung des Kellers) hoch ist.

Des Weiteren wurden Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera gemacht. Da die Temperaturen im Treppenhaus deutlich über den Außentemperaturen liegen, muss Wärme ins Treppenhaus geleitet werden. Mit den Aufnahmen soll ermittelt werden, auf welchem Weg das Treppenhaus aufgeheizt wird. Beispielsweise können mit der Wärmebildkamera Heizungsrohre sichtbar gemacht werden, obwohl sie hinter einer Wand verlaufen.

Um die Luftströmung innerhalb des Treppenhauses sichtbar zu machen, wurde ein Smoke-Pen verwendet.

Zusätzlich zu den Messungen in den Technikräumen wurden in den Gebäuden BGR 4 und BGR 6 Temperaturdatenlogger in den Treppenhäusern verteilt. Diese wurden in den Etagen EG, 4. OG und 8. OG jeweils in der Nähe des Aufzuges montiert. Bei diesen Sensoren kam es jedoch zu Problemen. Daher liegen lediglich die Daten der Temperaturdatenlogger in den Technikräumen und in der 8. Etage von Gebäude BGR 4 vor. Da jedoch die Aufnahmen der Wärmebildkamera, sowie die Temperaturdaten des Aufzugsschachtes vorliegen können die fehlenden Daten substituiert werden.

4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

4.1 Messungen im Technikraum und Lüftungskanal

In Abbildung 9 sind zunächst die Messungen im Lüftungskanal dargestellt. Gemessen wurden die Temperatur und die Luftgeschwindigkeit. Außerdem sind die Maße des Lüftungskanals bekannt. Die thermische Leistung wurde nach den Formeln aus Kapitel 2.4 berechnet.

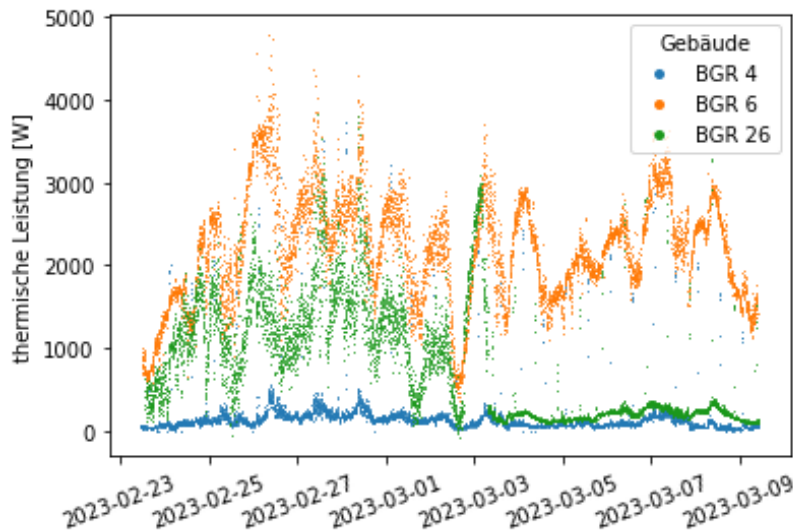


Abbildung 9: Darstellung der thermischen Leistung über den gesamten Messzeitraum

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Messungen in den Luftschächten der Gebäude BGR 4 (blau, mit Klappe), BGR 6 (orange, ohne Klappe) und BGR 26 (grün, Wechselbetrieb). Dargestellt wird der thermische Verlust durch den Kamineffekt über den Versuchszeitraum. Anhand der grünen Messungen kann der Effekt der Entrauchungsklappe deutlich gemacht werden. In der ersten Woche, in der die Entrauchungsklappe geöffnet war, kam es zu vergleichbaren Energieverlusten, wie in Gebäude BGR 6, welches keine Entrauchungsklappe besitzt. Sobald die Entrauchungsklappe in den Normalbetrieb geschaltet wurde, näherten sich die Verluste denen von Gebäude BGR 4 mit der Entrauchungsklappe im Normalbetrieb an. So konnte die Wirksamkeit von Entrauchungsklappen sowie die Plausibilität der Daten bestätigt werden.

Die wichtigsten Ergebnisse der gesammelten Daten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 2: Darstellung der thermischen Daten der einzelnen Gebäude am Ben-Gurion-Ring in Frankfurt am Main

Gebäude	Σ thermische Verluste im Messzeitraum [kWh]	\varnothing Thermische Verlustleistung [kW]	Durchschnittliche Temperatur im Aufzugsschacht [°C]
BGR 6 (keine Klappe)	730	2,2	19,0
BGR 4 (Normalbetrieb mit Öffnung im 12h Intervall)	55	0,16	20,8
BGR 26 (Normalbetrieb mit Öffnung im 12 h Intervall)	50 (verkürzter Zeitraum)	0,34	18,7
BGR 26 (geöffnete Klappe)	242 (verkürzter Zeitraum)	1,3	18,5

Während des Messzeitraums wurde eine durchschnittliche Außentemperatur von 4 °C gemessen.

Zu erkennen ist, dass die Entrauchungsklappe einen Effekt auf die thermischen Verluste hat, aber auch ein Zusammenhang zur Temperatur im Aufzugsschacht liegt nahe. Dies kann aus dem Vergleich der Zeilen „BGR 6 (keine Klappe)“ und „BGR 26 (Normalbetrieb)“ geschlossen werden.

Um die Prozesse detailliert betrachten zu können, zeigt Abbildung 10 die thermische Leistung über einen Tag. Darin ist die regelmäßige Lüftung zu erkennen, welche auch bei einer Entrauchungsklappe stattfindet. Zu erkennen ist dies an den blauen Punkten, die gegen 2 Uhr und 14 Uhr eine thermische Leistung von ca. 1700 W anzeigen

Außerdem ist zu erkennen, dass die thermische Leistung in Gebäude BGR 26 geringer ist als in Gebäude BGR 6, obwohl die Entrauchungsklappe an diesem Tag geöffnet ist.

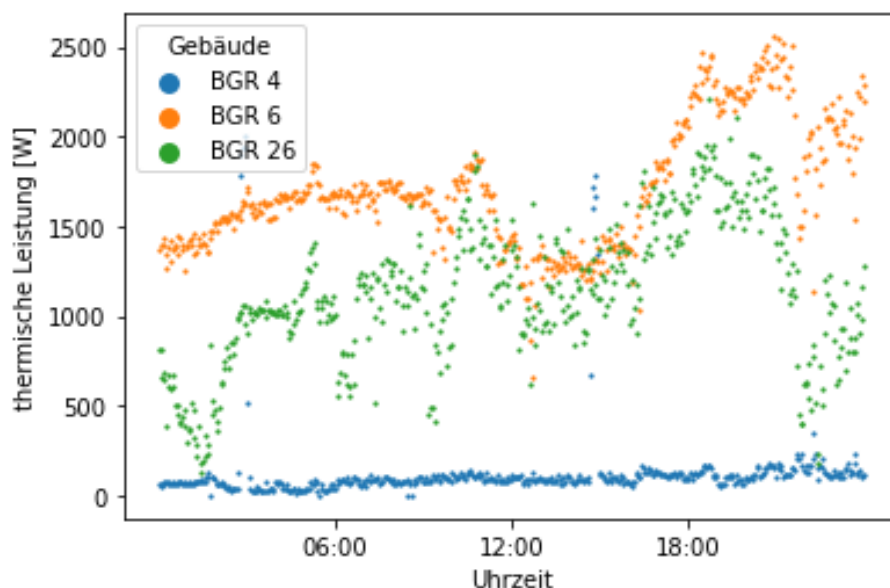


Abbildung 10: Darstellung der thermischen Verlustleistung am 24.2.2023

Im Folgenden ist eine weitere Messung im Technikum dargestellt. Um abzuschätzen ob die Wärmeverluste durch das Lüftungsgitter im Technikum von dem Vorhandensein einer Entrauchungsklappe abhängig sind, wurde die Luftgeschwindigkeit und Temperatur an dieser Stelle gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei Gebäude BGR 6, also dem Gebäude ohne Entrauchungsklappe die Luftgeschwindigkeiten an diesem Lüftungsgitter deutlich geringer sind als bei Gebäude BGR 4. Beim Temperaturverlauf sind nur geringe Unterschiede erkennbar.

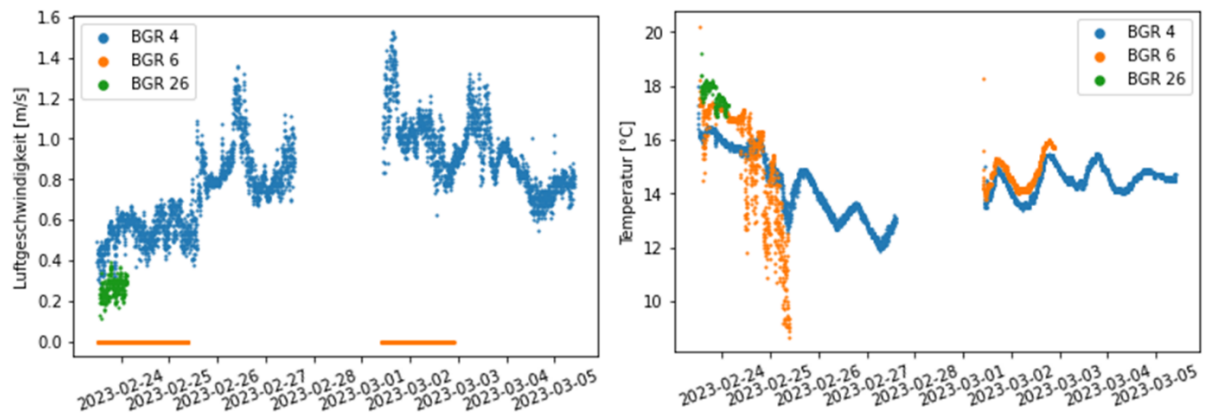


Abbildung 11: Messergebnisse der Luftgeschwindigkeit [m/s] und Temperatur [°C] am Lüftungsgitter im Technikum

Zusätzlich zu den dargestellten Messungen wurden auch Temperaturverläufe mithilfe von Datenloggern aufgezeichnet. Diese sind in Abbildung 12 dargestellt und bestätigen die bisher dargestellten Temperaturen aus den Technikräumen:

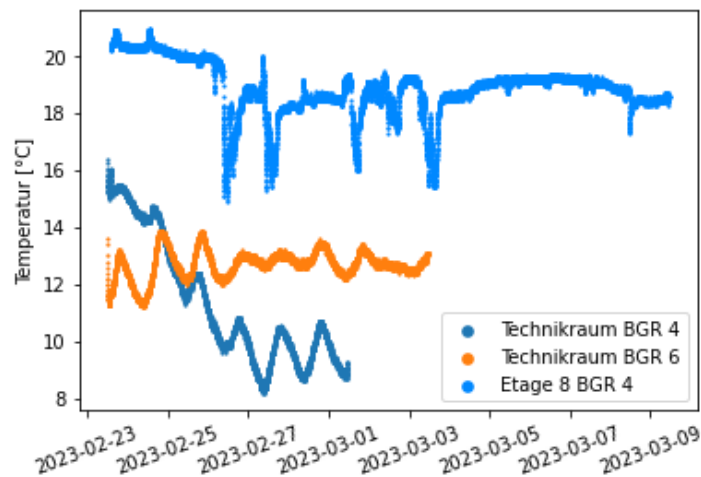


Abbildung 12: Darstellung Temperatur-Datenlogger

Die Ergebnisse bekräftigen die These, dass die durch den Kamineffekt aufsteigende Luft an der Entrauchungsklappe aufgehalten wird und der Wärmeverlust über sekundäre Austrittspunkte steigt. In diesem Fall ist der sekundäre Austrittspunkt das Lüftungsgitter. Eine exakte Bestimmung der hier auftretenden Verlustleistung ist nicht belastbar möglich.

Das Lüftungsgitter ist kleiner als der betrachtete Lüftungskanal. Die Maße betragen 0,25 m x 0,35 m. Direkt hinter dem Messpunkt wird der Luftstrom durch einen Wetterschutz in drei einzelne Luftströmungen aufgespalten. Dies hat zur Folge, dass der Luftstrom

ungleichmäßig verteilt durch das Lüftungsgitter austritt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der Messpunkt an einem Punkt liegt, an dem die Luftgeschwindigkeit deutlich von dem Durchschnitt über die gesamte Fläche abweicht. Punktuelle Messungen, welche mit einem Anemometer vor Ort durchgeführt wurden, deuten darauf hin. Zusätzlich wird die gemessene Luft vorher nicht kanalisiert, wie es bei der Messung innerhalb des Lüftungskanals der Fall ist.

Eines der betreffenden Lüftungsgitter ist in Abbildung 5 zu sehen.

4.2 Messungen im Treppenhaus und Aufzugsschacht

In Abbildung 13 ist dargestellt, wie oft der Aufzug zu welchen Uhrzeiten genutzt wurde.

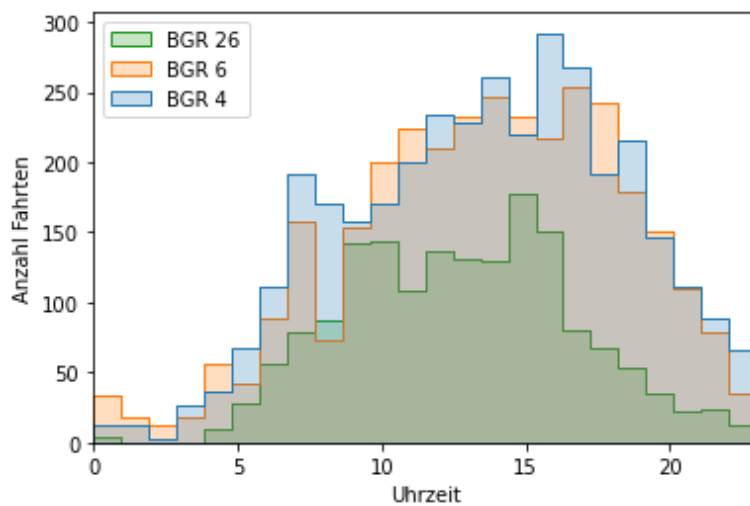


Abbildung 13: Darstellung der Aufzugsnutzung

Die Aufzüge in den Gebäuden BGR 4 und BGR 6 wurden sehr ähnlich betrieben, was auf eine gleichartige Nutzung des Gebäudes hinweist. Am häufigsten werden alle Aufzüge im Zeitraum von 14-16 Uhr benutzt. Der Aufzug in Gebäude BGR 26 wurde etwas seltener benutzt. Dies liegt höchstwahrscheinlich daran, dass dieser Aufzug zeitweise wegen technischer Probleme außer Betrieb war. Die Messung der Temperatur auf dem Aufzug in BGR 26 wurde dadurch nicht beeinträchtigt.

In Abbildung 15 sind die Temperaturverläufe im Aufzugsschacht dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Aufzugsschacht in Gebäude BGR 4 wärmer ist als der in Gebäude BGR 6. Die Temperaturen in Gebäude BGR 26 schwanken stärker, sind aber ebenfalls auch durchgehend niedriger als in Gebäude BGR 4.

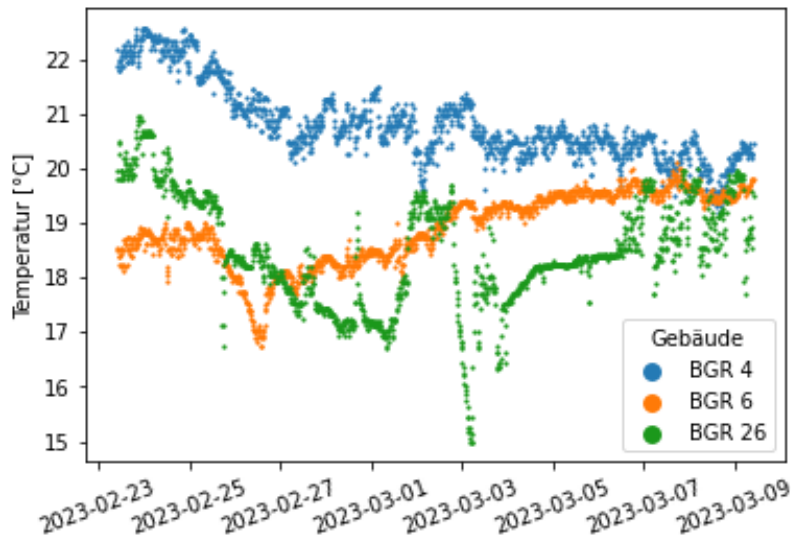


Abbildung 14: Darstellung der Temperaturen im Aufzugsschacht

Dies könnte zum Teil daran liegen, dass in Gebäude BGR 4 eine Entrauchungsklappe im Normalbetrieb vorhanden ist, wodurch die Wärmeverluste geringer sind und so die Innentemperatur des Gebäudes höher gehalten werden kann. Allerdings nähern sich die Temperaturen der Gebäude BGR 4 und BGR 6, zum Ende des Versuchszeitraums deutlich aneinander an. Dies kann nicht durch eine Änderung an den Entrauchungsklappen erklärt werden, da es eine solche Änderung nicht gab.

Daher ist davon auszugehen, dass es eher daran liegt, dass sich bei Gebäude BGR 4 im Laufe des Versuchszeitraums die Temperatur innerhalb des Treppenhauses verändert hat und sich somit auch die Temperatur im Aufzugsschacht verändert. Dies wird durch den Datenlogger in Gebäude BGR 4 in der 8. Etage unterstützt (siehe: Abbildung 12).

Die These, dass die Temperatur im Aufzugsschacht eher von der Temperatur im Treppenhaus, als von der geöffneten Entrauchungsklappe abhängt wird dadurch unterstützt, dass es keinen deutlichen Temperaturunterschied in Gebäude BGR 26 gibt. Hier wurde die Entrauchungsklappe am 3.3.2023 um 08:10 in den Normalbetrieb geschaltet und war vorher durchgehend geöffnet. Eine signifikante Temperaturveränderung ist nicht zu erkennen. Es ist lediglich eine erhöhte Streuung der Temperaturdaten zum Zeitpunkt der Wartung zu erkennen, was eine Folge der Reparaturarbeiten sein kann.

4.2.1 Aufnahmen Wärmebildkamera

Die Treppenhäuser aller betrachteten Gebäude werden nicht aktiv beheizt. Dennoch liegt die Innentemperatur deutlich über der Außentemperatur. Es ist daher davon auszugehen, dass thermische Leistung in das Gebäude gelangt. Am deutlichsten war dies in Gebäude BGR 4 zu beobachten. Die Herkunft dessen wurde mittels einer Wärmebildkamera untersucht. Eines dieser Bilder ist im Folgenden dargestellt. Weitere Abbildungen sind im Anhang beigefügt.



Abbildung 15: Aufnahme Wärmebildkamera Gebäude 04

Einige der Innenwände waren wärmer als die Lufttemperatur im Innenraum. Dies zeigt, dass Wärme von dem Wohnraum per Transmission in das Treppenhaus und somit auch in den Aufzugsschacht gelangt. Eine Quantifizierung der Effekte ist mit den gegebenen Informationen nicht möglich.

4.2.2 Untersuchung der Luftbewegung mittels Smoke- Pen

Um zu bestimmen, ob die Entrauchungsklappe einen Einfluss auf die Luftströmung innerhalb des Gebäudes hat, wurde an einigen Aufzugstüren, sowie Wohnungstüren der Luftstrom mit einem Smoke- Pen sichtbar gemacht. Vorher wurden alle Fenster im Treppenhaus so weit wie möglich geschlossen, um möglichst gleiche Bedingungen zu schaffen.

Zwei Momentaufnahmen dieses Experiments sind in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16: Luftströmung an Aufzugstüren. Links Gebäude BGR 6 (keine Klappe vorhanden) u. rechts Gebäude BGR 4 (Klappe geschlossen)

Es ist zu erkennen, dass die Luft in Gebäude BGR 6 stärker in den Aufzugsschacht hineinzieht. Dies könnte eine sichtbare Wirkung des Kamineffekts sein.

An den Wohnungstüren waren keine derartigen Effekte zu sehen. Es ließ sich nicht klar feststellen, ob sich die Luft eher in die Wohnung hinein oder heraus bewegt.

4.3 Bestimmung von Abhängigkeiten

Im Folgenden wird untersucht welche Parameter einen Einfluss auf die thermische Leistung haben, welche aus dem Gebäude entweicht.

4.3.1 Prüfung einer Abhängigkeit der thermischen Leistung zur Temperaturdifferenz

Abbildung 17 fußt auf der These, dass eine große Abhängigkeit zwischen der thermischen Leistung und der Temperaturdifferenz zwischen dem Lüftungskanal und der Außenluft besteht, welche den Kamineffekt verstärkt. Daher wird die thermische Leistung in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz dargestellt. Die Temperaturdifferenz wird in diesem Fall aus der im Lüftungskanal gemessenen Temperatur und der Außentemperatur gebildet. Die jeweiligen Durchschnittswerte für das Gebäude und die entsprechende Temperaturdifferenz sind dick dargestellt.

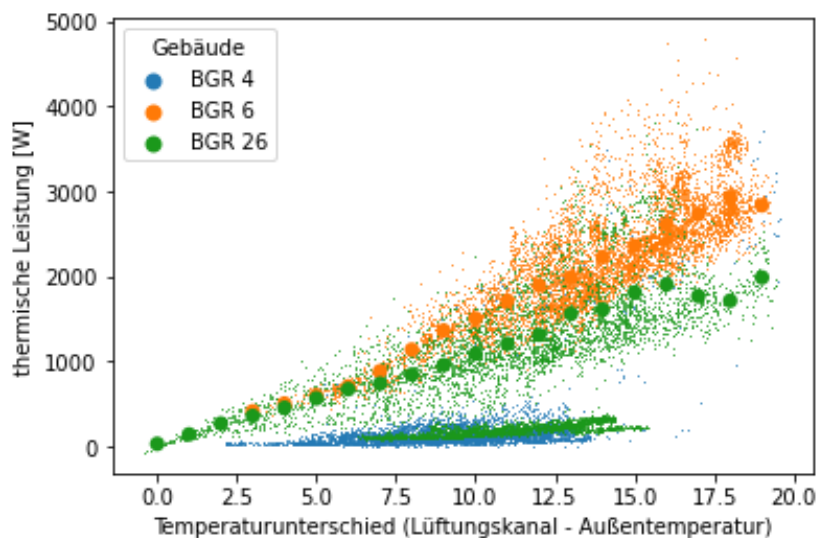


Abbildung 17: Thermische Verlustleistung in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz

Erwartungsgemäß ist zu erkennen, dass die Werte für Gebäude BGR 26 zweigeteilt sind und sowohl Eigenschaften von Gebäude BGR 4 als auch von Gebäude BGR 6 aufweisen. Dies liegt an der zeitweiligen Öffnung der Entrauchungsklappe. Bei Gebäude BGR 26 gibt es 2 weitere Auffälligkeiten:

- Es gibt wesentlich mehr Messpunkte mit geringem Temperaturunterschied, bei Gebäude BGR 26, als bei Gebäude BGR 6. Dies ist durch die geringere Temperatur im Aufzugsschacht zu erklären. Siehe dazu Tabelle 2.
- Auch bei gleichem Temperaturunterschied entweicht weniger thermische Leistung aus Gebäude BGR 26, als aus Gebäude BGR 6. Dieser Unterschied ist über die Messwerte

nicht zu erklären. Daher ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass der initiale Strömungswiderstand des Aufzugschachtes bzw. des Gebäudes nicht bekannt ist und es hier durchaus Unterschiede geben kann. Diese Unterschiede können auch mit den bereits erwähnten Modernisierungsmaßnahmen im Jahr 2021 zusammenhängen.

Beide Effekte tragen dazu bei, dass das Gebäude BGR 26 weniger thermische Leistung über den Lüftungskanal abgibt als das Gebäude BGR 6.

Die Werte für BGR 4 sind erwartungsgemäß sehr gering, was bedeutet, dass auch bei geringer Außentemperatur nur wenig thermische Leistung über den Lüftungskanal abgegeben wird.

In Abbildung 18 ist dargestellt, wie sich die Temperatur im Lüftungskanal und der Volumenstrom im Lüftungskanal in Abhängigkeit von der Außentemperatur verhalten. Diese beiden Größen sind maßgeblich für die resultierende thermische Leistung.

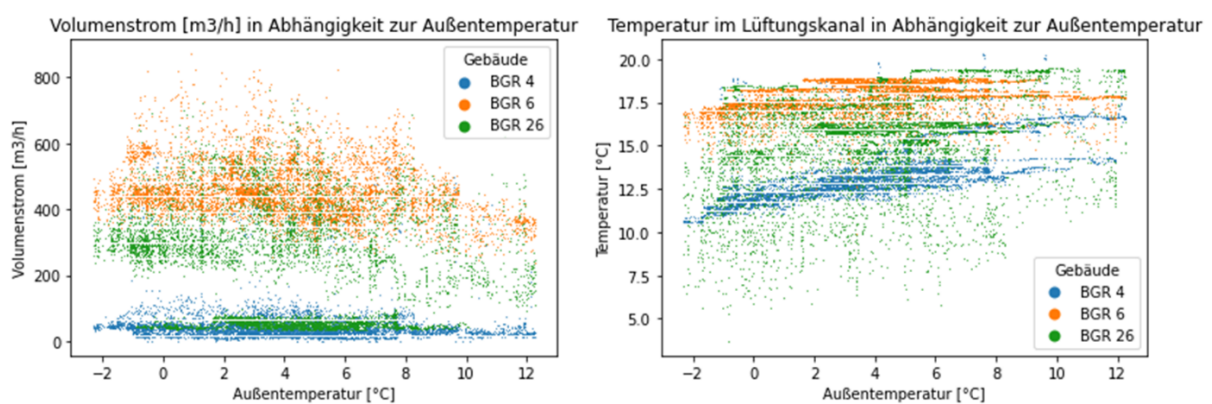


Abbildung 18: Volumenstrom und Luftkanaltemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Es ist erkennbar, dass sich sowohl der Volumenstrom als auch die Temperatur im Lüftungskanal nicht maßgeblich mit der Außentemperatur ändern. Die Änderung der thermischen Leistung resultiert daher aus dem Temperaturunterschied zwischen der Temperatur im Lüftungskanal und der Außentemperatur.

4.3.2 Prüfung einer Abhängigkeit der thermischen Leistung zur Aufzugsnutzung

Neben der Außentemperatur ist auch zu prüfen, ob es einen Zusammenhang zwischen der Nutzung des Aufzugs und der thermischen Leistung gibt. In Abbildung 13 ist dargestellt, wann der Aufzug genutzt wird. Die Graphen in Abbildung 19 stellen den Zusammenhang zwischen thermischer Leistung, Uhrzeit und Außentemperatur dar.

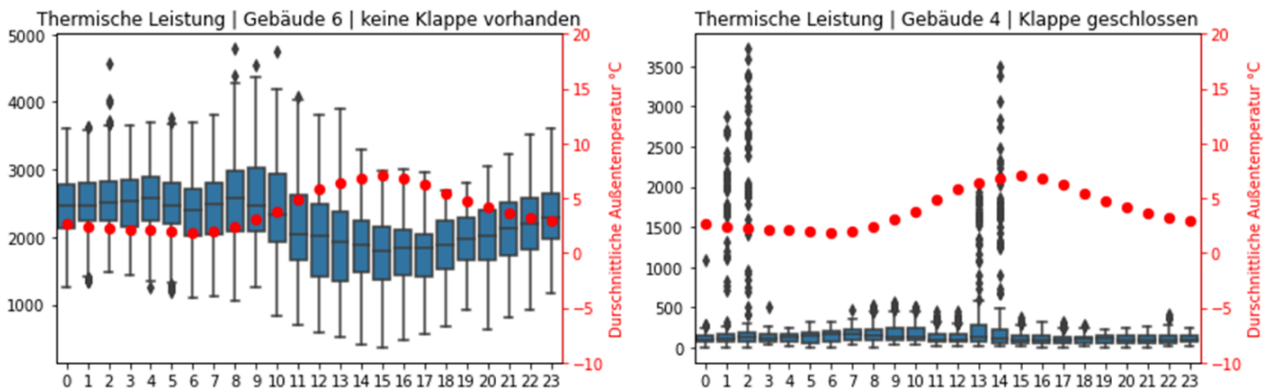


Abbildung 19: Boxplot Darstellung der thermischen Leistung in Abhängigkeit zur Außentemperatur

Ein Zusammenhang zwischen thermischer Leistung und Uhrzeit ist erkennbar, allerdings ist dies dadurch zu erklären, dass die Außentemperatur abhängig von der Uhrzeit ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die Nutzung des Aufzugs keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die thermische Leistung hat, welche aus dem Gebäude entweicht.

Auf dem rechten Diagramm in Abbildung 19 ist außerdem deutlich zu sehen, dass alle 12 h die Entrauchungsklappe geöffnet wird, was zu einem kurzzeitigen Anstieg der thermischen Leistung führt.

4.3.3 Untersuchung von Tag und Nachteffekten auf die thermische Leistung

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits festgestellt, dass die Uhrzeit keinen signifikanten Einfluss auf die durchschnittliche Leistung zu haben scheint. Dennoch wurde untersucht, wie sich mögliche Tag/Nacht Effekte auswirken.

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist der Tag/Nacht Unterschied für alle Gebäude dargestellt.

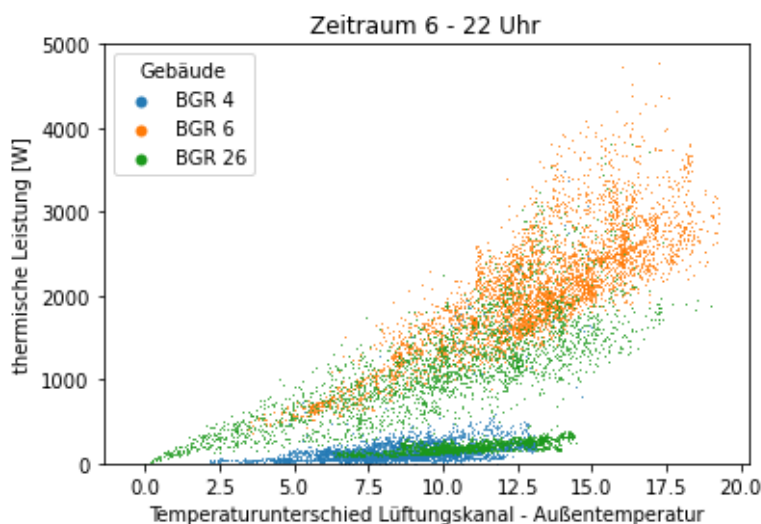


Abbildung 20: Darstellung der thermischen Leistung tagsüber

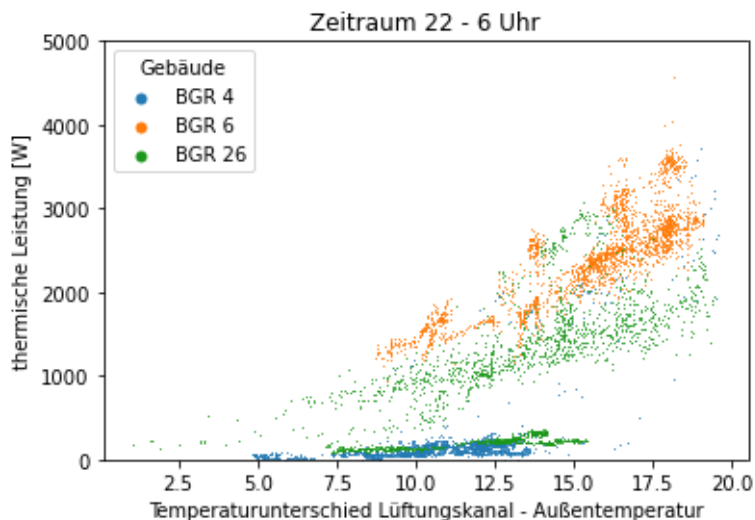


Abbildung 21: Darstellung der thermischen Leistung bei Nacht

Wie bereits vorher erläutert, ist kein deutlicher Unterschied zwischen den durchschnittlichen thermischen Leistungen, bei gleichen Temperaturverhältnissen zu erkennen. Allerdings scheint es den Effekt zu geben, dass bei Nacht die Streuung der Werte verändert ist. Dies könnte daraufhin deuten, dass die tagsüber stattfindende Nutzung des Treppenhauses, also das Öffnen von Haustüren, Wohnungstüren und Fenstern zu einer verstärkten Streuung der Ergebnisse führt.

In Abbildung 21, also der Nachtdarstellung, sind einzelne ausreißende Gruppen zu erkennen. Beispielsweise Gebäude 6 bei einer thermischen Leistung von 3600 W. Diese könnten ein Hinweis darauf sein, dass hier in der Nacht ein Verhalten stattgefunden hat, welches tagsüber häufiger stattfindet und so zu der dargestellten Streuung führt.

4.4 Extrapolation auf eine gesamte Heizperiode zur Bestimmung von Energieverlusten und CO₂- Emissionen

Um die Wirkung der hier dargestellten Entrauchungsklappe vergleichbar darzustellen, wurde eine Extrapolation durchgeführt. Dazu wurden Daten des DWD, so wie Temperaturdaten aus dem Aufzugsschacht von Gebäude BGR 6 und Gebäude BGR 26 (Zeitraum mit offener Klappe) verwendet. Betrachtet wird der Zeitraum vom 01.10.2022 bis einschließlich 30.04.2023, also die von der GWH standardmäßig gesetzte Heizperiode.

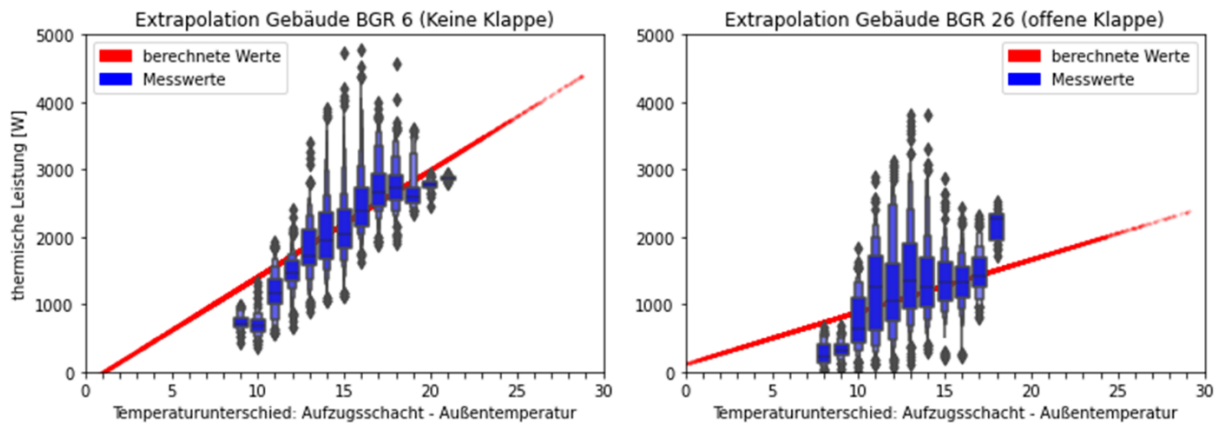


Abbildung 22: Ergebnisse Extrapolation für BGR 6 und BGR 26

Für den betrachteten Zeitraum ergibt sich eine Energiemenge von ca. 8636 kWh für Gebäude BGR 6 und für Gebäude BGR 26 ca. 5280 kWh. Diese Energiemenge ist näherungsweise durch die Lüftungskanäle entwichen. Die Temperaturen innerhalb der Aufzugsschächte betragen durchschnittlich 19,3 °C in BGR 6 und 19,1 in BGR 26. Eine Entrauchungsklappe würde diese Verluste größtenteils, aber nicht vollständig verhindern. Es muss beachtet werden, dass die Klappen im Normalbetrieb regelmäßige Lüftungen durchführen. Daher sind im Folgenden auch die Ergebnisse für Gebäude BGR 4 und BGR 26 (Klappe im Normalbetrieb) dargestellt.

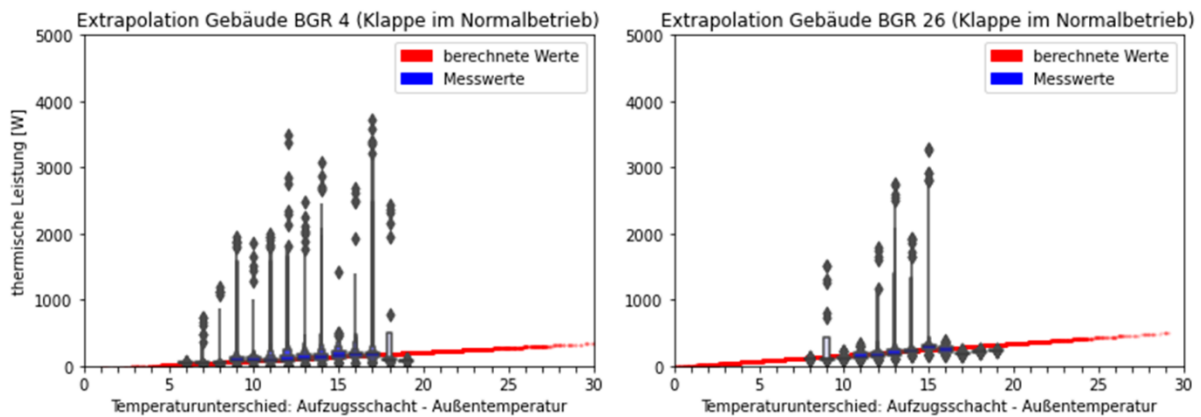


Abbildung 23: Ergebnisse Extrapolation für BGR 4 und BGR 26 (Klappe im Normalbetrieb)

Für Gebäude BGR 26 ergeben sich trotz der Entrauchungsklappe Verluste in Höhe von ca. 976 kWh_{th} und im Falle von Gebäude BGR 4 ergeben sich Verluste in Höhe von ca. 693 kWh_{th}.

Um die Güte der Extrapolation zu bestimmen, wurde die diese angewendet um den Energieverlust in Gebäude 6, während des Versuchszeitraums, zu bestimmen. Mit den Messgeräten vor Ort wurde ein Energieverlust von 730 kWh_{th} bestimmt. Die Extrapolation errechnet einen Wert von 731,8 kWh_{th}. Diese geringe Differenz deutet daraufhin, dass die Extrapolation auch über die gesamte Heizperiode valide Werte berechnet.

Aus diesen Daten ergeben sich die folgenden Potentiale zur CO₂-Einsparung. Die betrachteten Häuser am Ben-Gurion-Ring werden alle über die gleiche Fernwärmequelle versorgt. Dabei handelt es sich um eine Biogas Anlage der Firma Systemo, welche je nach Bedarf zusätzlich

noch Erdgas bezieht. Die Firma Systemo gibt im Mittel eine CO₂ Bilanz von 165 gCO₂ / kWh_{th} an. Darauf basierend würden sich folgende CO₂ Einsparungen ergeben.

Tabella 3: Darstellung der erwarteten Ersparnis

Gebäude	Verluste Entrauchungsklappe [kWh]	Einsparungen [kWh]	Erwartete Ersparnis [kgCO ₂]
BGR 6	8636	7943 (zu Gebäude 4)	1310
BGR 26 (Klappe vorhanden)	5280	4306 (zu Gebäude 26)	710

Da die Versorgung mittels einer Biogasanlage die CO₂ – Emissionen gegenüber anderen Energieträgern bereits deutlich reduziert, wird im Folgenden ein Beispiel gerechnet, bei dem die Gebäude über eine zentrale Erdgas- Brennwertheizung betrieben werden. Der Wirkungsgrad wird mit 90 % angenommen und die CO₂ – Emissionen mit 200,8 gCO₂ / kWh [6].

Tabella 4: Darstellung der erwarteten Ersparnis (fiktiver Brennwertkessel)

Gebäude	Verluste Entrauchungsklappe [kWh]	Einsparungen [kWh]	Erwartete Ersparnis [kgCO ₂]
BGR 6	8636	7943 (zu Gebäude 4)	1595
BGR 26 (Klappe vorhanden)	5280	4306 (zu Gebäude 26)	865

4.5 Vergleich der Messergebnisse mit einem Rechentool zur Verlustbestimmung

Aktuell wird zur Bestimmung der Verlustleistung und den damit verbundenen Einsparungen eine Methode verwendet, welche von einem Ingenieurbüro im Jahr 2005 entwickelt wurde. Dieses wird im Folgenden dargestellt. Nähere Informationen zum Ursprung sind nicht bekannt.

Das Interface des Modells, sowie die benötigten Daten sind in Abbildung 24 dargestellt:

Schachtbreite	m	1,70
Schachttiefe	m	2,50
Schachthöhe	m	30,00
Tragfähigkeit	Kg	1000
Anzahl der Zugangsstellen	St	9
Mittlere Jahrestemperatur in K (273 + 10°C)	K	283,00
Innenraum-Temperatur eingeben	19°C °C	292
Temperaturdifferenz	K	9
Anzahl senkrechter Türspalten je Haltestelle	St	3
Anzahl der Türspalten gesamt	St	27
Türbreite gesamt	mm	1000
Türhöhe	mm	2000
Spaltmaß	3 mm	
Tür-Luftverlust-Öffnungsfläche gesamt	m ²	0,648
Entrauchungsöffnung	m ²	0,11
Luftgeschwindigkeit	m/s	1,96
Luftvolumenstrom	m ³ /s	0,208
Wärmeverlust pro Jahr	kWh	19.662
Wärmeverlust pro Jahr	kJ/kg*grd	1,0
Wärmeverlust pro Jahr	kg / m ³	1,2
Wärmeverlust pro Jahr	kW	2,2
Wärmeverlust pro Jahr	h	8760
Kosten je kWh (Durchschnittwert)	0,180 € / kWh	
Energiekosten Wärmeverlustes pro Jahr	€ / a	3.539
Anzahl Anlagen nach Typ		1
Energiekosten Wärmeverlustes je Typ	€ / a	3.539
Energiekosten Wärmeverlustes Summe	€ / a	3.539

Abbildung 24: Rechentool zur Bestimmung von thermischer Verlustleistung

Die Vorgehensweise ist, dass zunächst alle Flächen der Öffnungen aufsummiert werden, welche in den Aufzugsschacht führen (ausgenommen der Entrauchungsklappe). In der Abbildung benannt als „Tür-Luftverlust-Öffnungsfläche gesamt“. Daraufhin wird die Luftgeschwindigkeit berechnet, mit der die Luft den Aufzugsschacht durch die Entrauchungsöffnung verlässt. Die Formel dafür ist im Folgenden dargestellt

$$v = \frac{\sqrt{\frac{g * h * \frac{\Delta T}{T_{Innen}}}{1 + \frac{A_e^2}{A_s^2}}} + \sqrt{\frac{g * 3 * \frac{\Delta T}{T_{Innen}}}{1 + \frac{A_e^2}{A_s^2}}}}{2}$$

v = Luftgeschwindigkeit aus dem Schacht [m/s]

g = Erdbeschleunigung 9,81 [m/s²]

h = Schachthöhe [m]

A_e = Entrauchungsöffnung [m²]

A_s = Tür-Luftverlust-Öffnungsfläche gesamt [m²]

ΔT = Temperaturdifferenz aus Innentemperatur und mittlerer Außentemperatur im Betrachtungszeitraum [K]

T_{Innen} = Innentemperatur [K]

Durch die berechnete Luftgeschwindigkeit kann der Volumenstrom an der Entrauchungsöffnung bestimmt werden. Unter den Annahmen (Dichte von Luft = $1,2 \text{ kg/m}^3$ und spez. Wärmekapazität = $1,0 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) wird die durchschnittliche thermische Leistung bestimmt, welche aus dem Gebäude entweicht. Diese Berechnung folgt dem gleichen Verfahren, welches in 2.4 beschrieben wird.

Die verwendete Formel zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit kann nicht geprüft werden, da keine weitere Dokumentation vorliegt. Allerdings kann festgestellt werden, dass eine starke Abhängigkeit zur Außentemperatur besteht, was sich mit den Messungen deckt.

In Abbildung 25 ist ein Vergleich zwischen den gemessenen Werten der thermischen Leistung von Gebäude BGR 6 in Abhängigkeit zur Außentemperatur dargestellt. Für das Modell wurde eine Innentemperatur von 19°C angenommen.

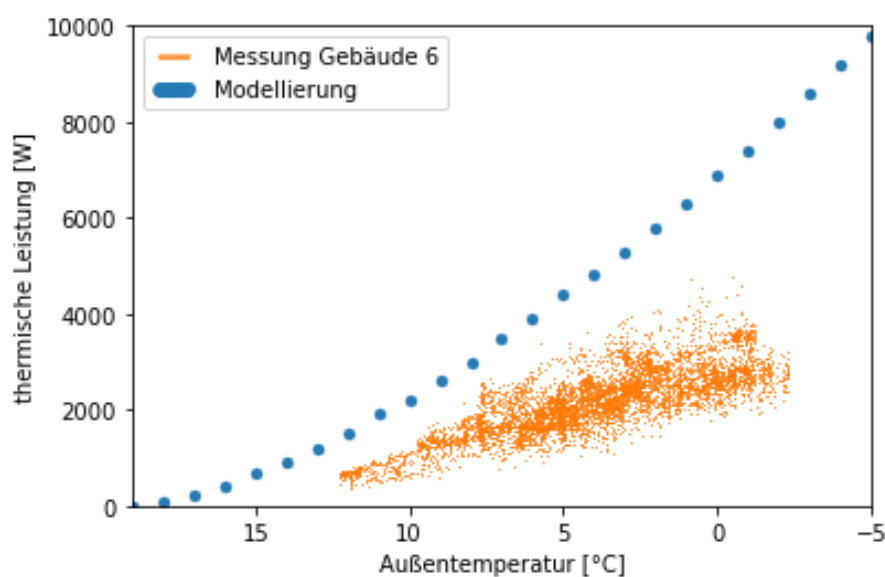


Abbildung 25: Vergleich des Rechentools mit den Messergebnissen in Gebäude BGR 4

Die beiden Ansätze liegen im Ergebnis auseinander. Der exakte Grund dafür ist nicht ersichtlich. Allerdings wird im Folgenden ein Aspekt beschrieben, welcher zu dem Unterschied beitragen könnte:

Im Falle des Rechentools wird die thermische Verlustleistung auf Grundlage der Temperaturdifferenz von Innentemperatur zu Außentemperatur bestimmt. Bei den in diesem Projekt durchgeführten Messungen wurde die Temperatur der austretenden Luft kurz vor Austritt aus dem Gebäude bestimmt. Die mittlere Temperatur des Aufzugsschachtes von Gebäude BGR 6 (keine Klappe vorhanden) beträgt im Versuchszeitraum $19,3^\circ\text{C}$, während die Temperatur im Lüftungskanal von Gebäude BGR 6 $17,8^\circ\text{C}$ beträgt.

Dies deutet darauf hin, dass dem Aufzugsschacht Wärme entzogen wird. Möglicherweise durch die Gebäudehülle. Diese entzogene Wärme wird in den Messungen nicht abgebildet, während dies bei dem Rechentool nicht der Fall ist. Ein Nachweis dieser Theorie ist jedoch mit den vorhandenen Daten nicht möglich.

Unabhängig der hier benannten Unterschiede kommen beide Berechnungen zu dem Ergebnis, dass eine signifikante Menge an thermischer Leistung mittels einer Entrauchungsklappe eingespart werden kann.

4.6 Referenzprojekt

Die Entrauchung von Aufzugsschächten und die daraus resultierenden Energieeinsparungen wurden bereits in einem Gebäude der Lufthansa Technik in Hamburg untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden kurz vorgestellt.

In dem Versuch wurde ein Bürogebäude mit einem beheizten Treppenhaus betrachtet (mittlere Innentemperatur 22 °C). Im Vergleich zu den Gebäuden in diesem Projekt, ist es eine andere Nutzungsart und eine erhöhte Innentemperatur, dennoch lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, welche ungefähren thermischen Leistungen durch eine Entrauchungsöffnung entweichen.

Die Messungen wurden im Monat April durchgeführt, also bei höheren Außentemperaturen als in diesem Projekt. Daher wurde vom Autor eine Korrektur der Temperaturdaten durchgeführt. Die Korrektur hat ergeben, dass eine Verlustleistung von 3,67 kW_{thermisch} bei einer mittleren Temperatur von 9,85 °C anfällt [7]. Die Daten wurden vom 14.04.-18.04.2011 erhoben und sind in der Abbildung 26 dargestellt:

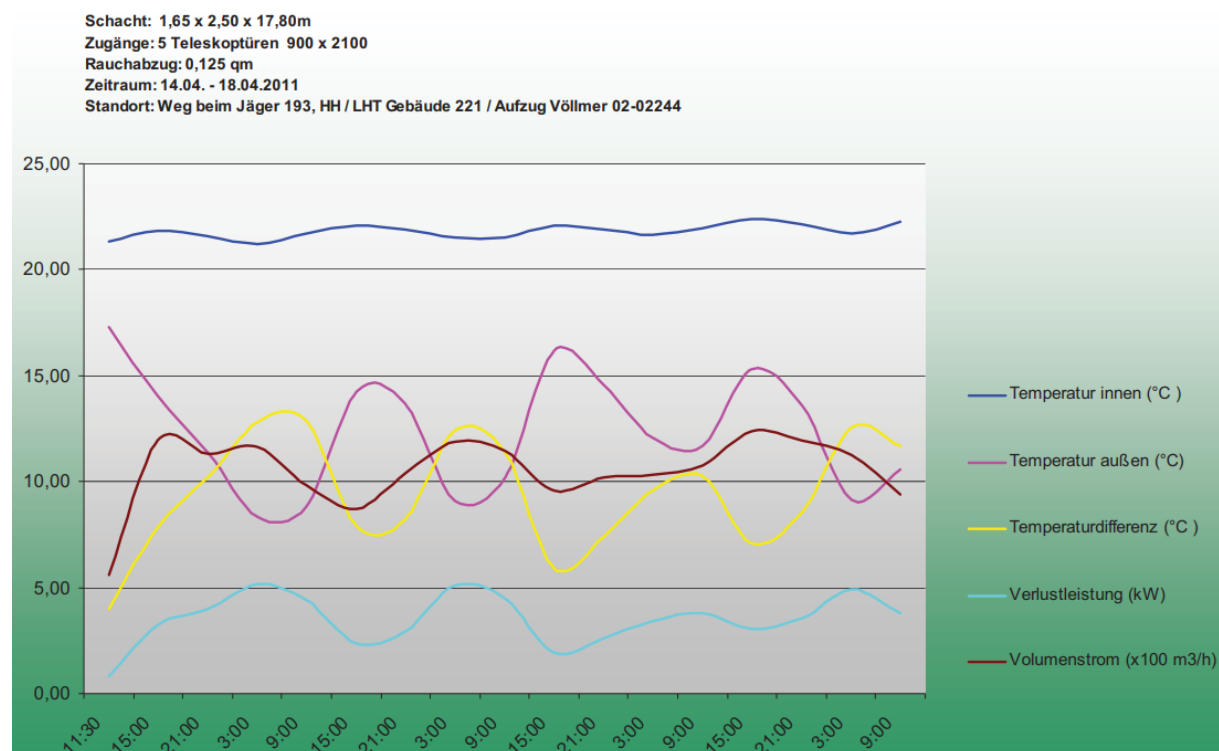


Abbildung 26: Messung der Energieverluste durch die Rauchabzugsöffnung (Dipl. Ing. Gerhard Nickel)

In der Graphik ist zu erkennen, dass die Verlustleistung nicht konstant ist, sondern Schwankungen unterliegt. Diese Schwankungen korrelieren mit der Temperaturdifferenz aus Innentemperatur und Außentemperatur. Die Schwankungsbreite reicht von ca. 1 kW_{thermisch} bis 5 kW_{thermisch}. Es ist also davon auszugehen, dass die thermische Verlustleistung mit sinkender Außentemperatur ansteigt, vorausgesetzt die Innentemperatur wird nicht ebenfalls abgesenkt.

5 Fazit

Ziel des Projekts war einerseits die Quantifizierung von Energieverlusten, die sich durch Wärmeströme in Aufzugsschächten einstellen, sowie andererseits die Untersuchung von Möglichkeiten der Senkung der Verluste durch installierte Entrauchungsklappen. Hierzu wurden exemplarisch Messungen in repräsentativen Mehrfamilienhäusern durchgeführt, anschließend wurden die Messdaten hinsichtlich ihrer energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen bewertet. Die Messungen hatte eine Laufzeit von 2 Wochen umfassten die Aufnahme von weitreichenden Parametern, bspw. Luftgeschwindigkeiten und Temperaturdaten. Ebenfalls wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich des Brandschutzes beachtet sowie die Validierung gegenüber einem Referenzprojekt durchgeführt.

Abschließend lässt sich feststellen, dass sowohl die Messungen, als auch weitere Quellen daraufhin deuten, dass eine signifikante Menge thermischer Energie und somit auch CO₂ – Emissionen eingespart werden können, durch den Einsatz von Entrauchungsklappen. Bei den hier betrachteten Gebäuden liegt die Ersparnis bei ca. 680 kWh thermischer Nutzenergie über den betrachteten Zeitraum von 2 Wochen (siehe Tabelle 2). Außerdem konnte dargelegt werden, wie sich verschiedene Parameter, wie beispielsweise die Außentemperatur auf diesen Verbrauch auswirken. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass die genannten Einsparungen keinen negativen Komforteffekt auf den Wohnraum des Gebäudes haben. Mittels einer Extrapolation konnte berechnet werden, dass in Gebäude BGR 6 Einsparungen in Höhe von ca. 8000 kWh thermischer Nutzenergie pro Jahr bzw. Heizperiode realisierbar sind. Die Einsparungen in Form von Endenergie und Primärenergie sind abhängig vom verwendeten Heizungssystem. Es ist jedoch zu beachten, dass die möglichen Ersparnisse in Gebäude BGR 26 geringer ausfallen. Mögliche Ursachen dafür sind die bereits durchgeführten Sanierungsmaßnahmen in diesem Gebäude sowie die bereits installierte (für den Versuch geöffnete) Entrauchungsklappe. Die daraus resultierende Ersparnis an CO₂ – Emissionen liegt bei ca. 1,3 t pro Jahr im Falle von Gebäude BGR 6.

Grundsätzlich sollte bei allen Sanierungsarbeiten stets die gesamte energetische Situation des Gebäudes beachtet werden, um weitere Einsparpotentiale nicht außer Acht zu lassen und Rebound Effekte durch die durchgeführte Sanierung zu vermeiden. Ein negatives Beispiel für große Wärmeverluste sind gekippte und längerfristig offenstehende Fenster. Beides wurde in den Treppenhäusern der untersuchten Gebäude immer wieder beobachtet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Einbau von Entrauchungsklappen in beheizten Gebäuden eine sinnvolle Maßnahme zur Energieeinsparung ist und zur Vermeidung von unnötigen CO₂ – Emissionen beiträgt.

6 Anhang

Weitere Aufnahmen, der Wärmebildkamera aus den Gebäuden BGR 4 und BGR 6.

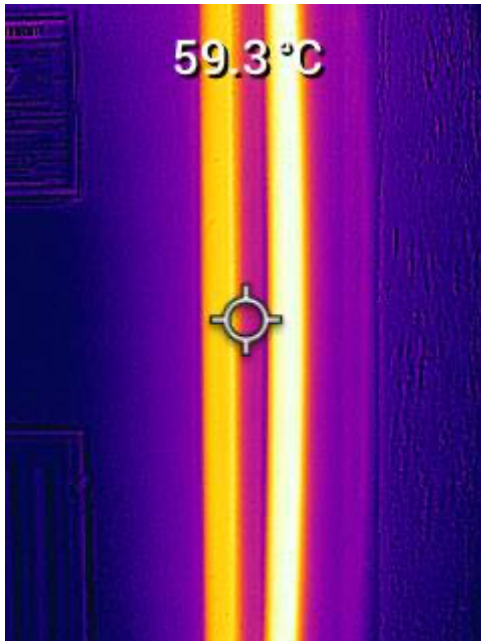


Abbildung 28: Heizungsrohre BGR 4

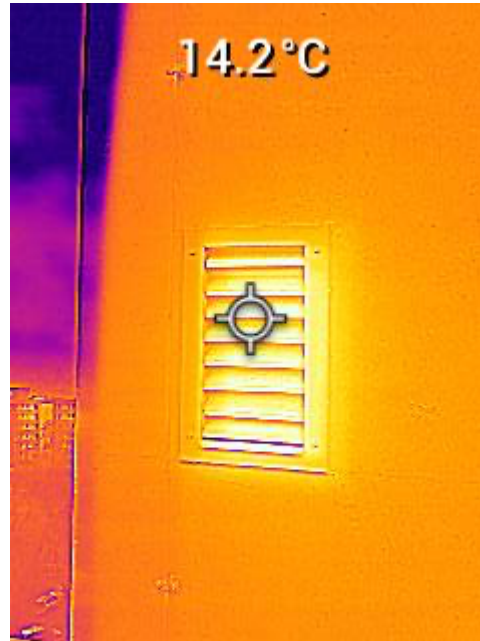


Abbildung 27: Ausgang Lüftungskanal Gebäude BGR 6

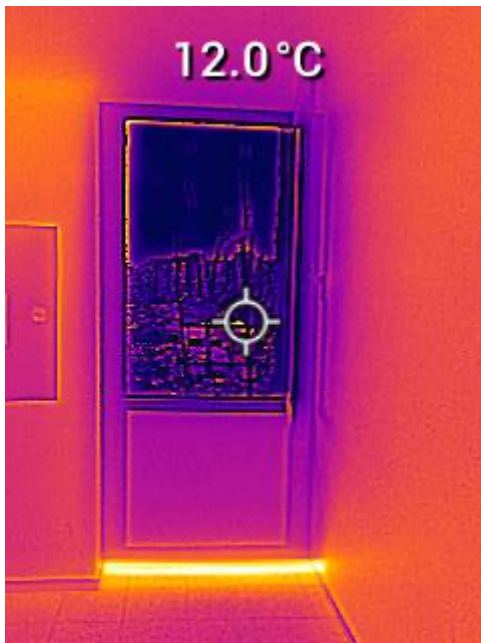


Abbildung 29: Abbildung eines Fensters in BGR 4

7 Literatur

- [1] Verena Jannack, Sabine Seeberg, Jens-Peter Knemeyer, Nicole Marmé. „Windhösel Kraftwerke - ein Projekt zu regenerativen Energien unter Nutzung der virtuellen Lernumgebung Lucycity.“ https://www.researchgate.net/profile/Nicole-Marme/publication/316241585_Windhosel_Kraftwerke_-_ein_Unterrichtsprojekt_zum_Thema_Regenerative_Energien/links/592713b2a6fdcc444350757c/Windhoesel-Kraftwerke-ein-Unterrichtsprojekt-zum-Thema-Regenerative-Energien.pdf
- [2] Bauministerkonferenz, *Musterbauordnung: MBO*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO_2019.pdf
- [3] lumitos. „Spezifische Wärmekapazität.“ https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html (Zugriff am: 24. März 2023).
- [4] ELK - Gesellschaft für Erstellung, Layout und Konzeption elektronischer Systeme mbH. „Technische Daten Bappu evo.“ <https://www.bappu.de/de/komponenten/technische-daten-bappu-evo> (Zugriff am: 28. März 2023).
- [5] Teledyne FLIR LLC. „Wärmebildkamera FLIR TG267.“ <https://www.flir.de/products/tg267/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>
- [6] Umweltbundesamt. „Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen.“ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/co2_ef_liste_2022_brennstoffe_und_industrie_final.xlsx (Zugriff am: 25. April 2023).
- [7] Gerhard Nickel. „Gutachten Schachtentrauchung Lufthansa Technik: Ermittlung des tatsächlichen Verlustes von Wärmeenergie an Rauchabzugsöffnungen von Aufzugsanlagen durch Messung.“ Messung an der Aufzugsanlage 221-02 auf dem Gelände der Lufthansa Technik AG, Weg beim Jäger 193, Hamburg (Durchführung: 14.04.-18.04.11).