

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Simulation eines Kundenzentrums zur Entwicklung eines energiesparenden  
Lüftungskonzepts mit besonderer Berücksichtigung des Raumklimas

Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

**Friederike Braun**



Hamburg

am 25. Juli 2019

- |                 |                        |                    |
|-----------------|------------------------|--------------------|
| 1. Gutachter:   | Prof. Dr. Heiner Kühle | (HAW Hamburg)      |
| 2. Gutachterin: | B.Sc. Franziska Langer | (Freie Ingenieure) |

## Zusammenfassung

Klimaveränderungen und verbesserte Gebäudedämmung haben zu einem allgemeinen Temperaturanstieg in vielen Gebäudeneubauten geführt. Hinzukommend, wird im Rahmen der Energieeinsparung auf eine Reduzierung der Gebäudeluftdurchlässigkeit über Fugen, Fassadeneinbauten und Leitungsschächte geachtet. Dadurch kann ein großer Teil an Heizkosten eingespart werden. Es ergibt sich jedoch auch ein geringerer Luftaustausch zwischen dem Gebäudeinneren und der Außenluft, sodass häufig nicht mehr genug Feuchtigkeit und andere Schadstoffe, wie Kohlenstoffdioxid, abgeführt werden können. Dies ist wichtig, um eine gute Raumluftqualität zu erhalten. Beide Faktoren erhöhen somit den Bedarf einer Gebäudelüftung, um ein für die Raumnutzer behagliches Raumklima zu schaffen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein energiesparendes Lüftungskonzept zum Erhalt eines angenehmen Raumklimas für ein reales Bauprojekt erarbeitet. Die Besonderheit des zu betrachtenden Gebäudes liegt hierbei in der Gebäudenutzung. Das Kundenzentrum eines Telekommunikationsanbieters in Hamburg soll abgebrochen und durch ein deutlich größeres Gebäude ersetzt werden. Als besonders zu betrachten, gelten hierbei die hohen internen Lasten. Dazu gehören zum einen die verwendeten elektronischen Geräte und zum anderen die sich stark verändernde Personenanzahl im Raum, mit einem hohen Besucheraufkommen zu Stoßzeiten.

Zur Entwicklung des Lüftungskonzepts wird eine thermische Gebäudesimulation unter Verwendung des Simulationsprogramms TRNSYS erstellt. Für die Umsetzung wird vorrangig mit dem Simulationsmodul des Multizonengebäudes und dem Model einer natürlichen Belüftung gearbeitet. Diese werden miteinander sowohl verknüpft, als auch über zusätzliche Komponenten und äußere Parameter, wie zum Beispiel das Wetter, beeinflusst. Die Ergebnisse der Gebäudesimulation werden in Form von Grafen und Zahlenwerten ausgegeben und ausgewertet.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein technisch einfaches Lüftungskonzept mit geringem Energieeinsatz erstellt. Die Belüftung erfolgt ausschließlich über mechanisch gesteuerte Fensteröffnungen. Mit den Parametern der Kohlenstoffdioxidkonzentration und der Raumtemperatur kann eine gute Raumluftqualität, mit einer maximalen Luftwechselrate von 1,5 realisiert werden. Als Bewertungskriterium wird hierfür die Anzahl entstehender Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2:2013-02 gewählt.

## Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich für die stetige Unterstützung vor und während meiner Bachelorarbeit, sowie für die gut geführte Datenbank bei Herrn Prof. Dr. Heiner Kühle bedanken, ohne die ich nicht von dem Büro der Freien Ingenieure erfahren hätte.

Des Weiteren möchte ich ganz herzlich Franziska Langer und Sarah Schwerdtfeger dafür danken, dass sie mir die Chance gegeben haben viel Neues zu lernen, für ihre Ideen und Denkanstöße.

An dieser Stelle auch nochmal ein extra Dankeschön an Franziska, für die guten Anregungen und Hilfestellungen während meiner Bachelorarbeit.

Ich möchte dem gesamten Team der Freien Ingenieure für die schöne Zeit mit ihnen danken, sie waren einer der vielen Gründe, weshalb ich jeden Tag gerne zur Arbeit gekommen bin.

Für die geduldige Einarbeitung und ein stets offenes Ohr für Fragen möchte ich mich bei meiner Praktikumsbetreuerin Martje Peters bedanken.

Zu guter Letzt danke ich meinen Freunden und meiner Familie, die mir durch ihren Glauben an mich immer ein gutes Gefühl gegeben haben.

## Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	6
1 Einleitung .....	7
2 Grundlagen .....	9
2.1 Raumklima .....	9
2.2 Thermische Behaglichkeit .....	9
2.3 Natürliche Lüftung .....	10
2.3.1 Freie Lüftung .....	11
2.3.2 Ventilatorgestützte Lüftung .....	13
2.4 Temperatur als Indikator des Innenraumklimas.....	14
2.4.1 Innere Kühllasten in Bürogebäuden.....	15
2.5 Kohlenstoffdioxid als Indikator der Innenraumluftqualität.....	16
3 Projektvorstellung .....	19
4 Theoretische Vorüberlegungen .....	20
4.1 Lüftung auf Grundlage der Temperatur .....	20
4.2 Lüftung auf Grundlage des CO <sub>2</sub> -Gehalts .....	22
4.3 Sonnenschutz .....	23
4.4 Bewertung der Simulationsergebnisse .....	24
4.4.1 Bewertung nach Übertemperaturgradstunden .....	24
5 Thermische Gebäudesimulation mit TRNSYS .....	26
5.1 Einführung in das Programm TRNSYS .....	26
5.2 Aufbau der Simulation in TRNSYS .....	26
6 Ergebnisse und Auswertung .....	31
6.1 Sonnenschutz .....	31
6.2 Kohlenstoffdioxid .....	32
6.3 Temperatur .....	34
6.3.1 Keller.....	34
6.3.2 Eingangsbereich .....	34
6.3.3 Hauptgebäude (Kundenzentrum) .....	35
7 Diskussion .....	36
8 Fazit.....	39
Literaturverzeichnis .....	40

Anhang.....	42
Eidesstattliche Erklärung .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systeme der natürlichen Wohnungslüftung nach DIN 1946-6 (VfW, 2018).	11
Abbildung 2: Durch Thermik verursachte Strömung zur freien Lüftung über Außendurchlässe und Schächte (Bohne, 2019, S.339).....	11
Abbildung 3: Theoretischer thermisch bedingter Luftaustausch über Kippfenster bei Windstille (Bohne, 2019, S.340) .....	12
Abbildung 4: Ventilatorgestützte Abluftanlage mit zentralem Ventilator (Bohne, 2019, S.347) .....	13
Abbildung 5: Ursachenverteilung einer schlechten Raumluftqualität (Bischof, et al., 1993, S.13) .....	17
Abbildung 6: Theoretisch notwendigen Außenluftfrate in Abhängigkeit zur Personenanzahl .....	22
Abbildung 7: Personenbezogene Luftwechselrate.....	23
Abbildung 8: Sommerklimaregionen in Deutschland (DIN 4108-2:2013-02 S. 21).....	25
Abbildung 9: Modelzeichnung des Kundenzentrums in Google SketchUp, Version 8.....	27
Abbildung 10: Grafische Benutzeroberfläche in TRNSYS Simulation Studio.....	30
Abbildung 11: Ausschnitt aus dem Luftwechseldiagramm, Anhang 3.....	33
Abbildung 12: Ausschnitt der Temperaturverlaufskurve, Anhang 2 Hauptgebäude.....	36

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gesamtwärmeabgabe eines Menschen in Abhängigkeit zum Aktivitätsgrad in Watt (Bohne, 2019, S. 2).....	15
Tabelle 2: CO <sub>2</sub> -Ausstoß pro Person in L/h (VDI 4300 Bl.9) .....	18
Tabelle 3: Stromverbrauch verschiedener Büroarbeitshilfen (O.Ö. Energiesparverband, 2016; Stromverbrauchinfo, 2019) .....	21
Tabelle 4: Maximal zulässige Anzahl an Übertemperaturgradstunden pro Jahr mit Bezugswert (DIN 4108:2-2013-02 S. 28).....	25
Tabelle 5: Einfluss eines äußeren Sonnenschutzes ohne interne Lasten.....	31
Tabelle 6: Einfluss eines äußeren Sonnenschutzes mit internen Lasten .....	31
Tabelle 7: Auswirkungen hoher Besucherzahlen auf die Luftwechselrate .....	32
Tabelle 8: Raumtemperaturjahreswerte mit und ohne Lüftung.....	34

## 1 Einleitung

Das Klima auf der Erde verändert sich und extreme Wetterlagen werden immer häufiger. Die Temperatur unserer Erde steigt stetig und inzwischen auch für uns Menschen spürbar an. In den deutschen Medien wird vermehrt von neuen Temperaturrekorden berichtet. Auch in diesem Jahr konnten bereits gestiegene Temperaturwerte festgestellt werden, wie der Deutsche Wetterdienst berichtet:

„Der Juni 2019 war sowohl in Deutschland wie auch in Europa der wärmste Juni seit Beobachtungsbeginn. Das deutschlandweit hohe Temperaturmittel wurde im letzten Monatsdrittel von einer intensiven Hitzeperiode begleitet. Heiße Luftmassen aus der Sahara und eine hohe Sonneneinstrahlung führten zu vielen neuen Temperaturrekorden an DWD-Stationen“ (Imbery, et al., 2019).

Sowohl in der Freizeit, als auch im Berufsalltag begegnen uns die Auswirkungen heißer Sommer. Neben körperlichen Auswirkungen, wie Schwitzen, zeigen sich ebenfalls in der Leistung Unterschiede und diese bei Männern anders als bei Frauen. Nach einer Studie der Wissenschaftler Tom Y. Chang (University of Southern California) und Agne Kajackaite (Wissenschaftszentrum Berlin) können Frauen bei einer Raumtemperatur über 24 °C bessere Leistungen erbringen als Männer, welche bei darunter liegenden Temperaturen besser abschneiden (Czichos, 2019).

Mit 10 °C Jahresmitteltemperatur gehört Deutschland zur gemäßigten Klimazone, trotzdem lässt sich eine zunehmende Nachfrage nach aktiven Systemen zur sommerlichen Gebäudekühlung, vor allem in Bürogebäuden beobachten (Ecofys Germany GmbH, 2011). Nach Angaben des Umweltbundesamtes beträgt allein der Stromverbrauch für Gebäudekühlung mit etwa 21 TWh rund 4 % des gesamten deutschen Stromverbrauchs. Hier sei ein Einsparpotenzial um 38 % bis zum Jahr 2030 möglich (UBA, 2011).

Spätestens seit Einführung der ersten Energieeinsparungsverordnung (EnEV) in 2002 spielt der energetische Wärmeschutz eine zentrale Rolle im Gebäudeneubau und in der Gebäudesanierung. Die EnEV soll „dazu beitragen, dass die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung, insbesondere ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis zum Jahr 2050, erreicht werden“ (§1 EnEV) und legt Mindestanforderungen für Wohn- und Nichtwohngebäude fest.

Als eine der ersten Umsetzungsmaßnahmen zum Erreichen der Energieeffizienzziele stand die Gebäudedämmung im Fokus. Hierbei sollten die Transmissionswärmeverluste durch wärmeübertragende Gebäudeflächen, wie das Dach, Fassaden und die Bodenplatte so gering wie möglich gehalten werden (Bogusch & Duzia, 2012). Hieraus wird die schnelle Handlungsbereitschaft zur Einsparung von Heizenergie deutlich. Dahingegen spielte die Einsparung von Kühlenergie lange eine untergeordnete Rolle.



Einen anderen Blickwinkel auf das Thema nachhaltige Gebäudegestaltung bietet, neben der Energieeinsparung, der Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ herausgegeben durch das Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat. Demnach gehört es zur nachhaltigen Nutzung eines (Büro-) Gebäudes, auf ein angenehmes Raumklima zu achten und deren Qualität sicher zu stellen. Beeinflussende Qualitätsparameter sind hierbei thermische und hygrische Raumkonditionen (BMI, 2019).

In der vorliegenden Arbeit soll anhand einer dynamischen Gebäudesimulation ein energiesparendes Lüftungskonzept für den Neubau eines Kundenzentrums in Hamburg erstellt werden. Unter Einbezug interner Lasten und äußerer Parameter dient die Raumtemperatur hierbei als entscheidender Faktor, diese soll für die Mitarbeiter und Kunden behaglich sein. Weitere Aspekte der Behaglichkeit werden auf Grund des Umfangs dieser Arbeit außer Acht gelassen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Raumklima

Als Raumklima wird der Zustand eines Innenraumes unter Einbezug der beeinflussenden physikalischen Größen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Wärmestrahlung bezeichnet. Abhängig von der zu verrichtenden Arbeit und entsprechend getragenen Kleidung kann das herrschende Raumklima sich positiv oder auch negativ auf das Wohlbefinden und die Leistung der Raumnutzer auswirken. Das Raumklima lässt sich über das Verhalten der Raumnutzer, beispielsweise durch gezieltes Heizen und Lüften beeinflussen. Auswirkungen des Raumklimas auf die persönliche Behaglichkeit, sind auch von der Gewöhnung abhängig und können in verschiedenen Regionen unterschiedlich empfunden werden (BAuA, 2019).

### 2.2 Thermische Behaglichkeit

Als thermisch behaglich wird ein neutraler Zustand definiert in dem die Gesamtwärmebilanz des Menschen konstant bleibt, sprich die Wärmeentwicklung und Wärmeabgabe gleich groß sind sowie die raumumschließenden Oberflächentemperaturen und die Raumlufttemperatur angeglichen sind (Richter, 2007).

Das unterschiedliche Empfinden der thermischen Behaglichkeit lässt sich auf Kontext-Effekte zurückführen. Darunter fallen kulturelle Einflüsse, wie das vorwiegend herrschende Klima und die entsprechende Anpassung. Ebenso psychologische Faktoren durch Erfahrungen, Erwartungen, vorhandenes Wissen und die persönliche Einstellung zeigen einen Einfluss. Auch demografische Faktoren, wie das Alter und Geschlecht sowie die Möglichkeit zur Einflussnahme auf das Raumklima und das Umfeld fließen mit in das Behaglichkeitsempfinden ein. Es konnte festgestellt werden, dass die Arbeitszufriedenheit mit der Temperaturzufriedenheit zusammenhängt. Eine wesentliche Einflussgröße ist hierbei die Möglichkeit zur Beeinflussung der thermischen Gegebenheiten des Raumes (Recknagel, 2018).

## 2.3 Natürliche Lüftung

Zum Erreichen der Energieeffizienzziele der Bundesregierung hat sich in den letzten Jahren einiges in der Gebäudeplanung geändert. Auf Grund des gesteigerten Bewusstseins über die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Energieträger und zur Reduzierung der CO<sub>2</sub> - Emissionen, wurden drastische Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs in Gebäuden, insbesondere im Bereich der Wärmeenergie getroffen. Neben erhöhter Wärmedämmung zur Reduzierung von Transmissionswärmeverlusten, wurde in den letzten Jahren vor allem Wert auf luftundurchlässige Fenster- und Türrahmen, sowie luftdichte Leitungskanäle gelegt. Da nun kaum noch Außenluft durch Fugen oder andere Durchlässe in das Gebäude eindringen kann, entsteht ein erhöhter Bedarf an zusätzlicher Gebäudelüftung für einen besseren Luftaustausch zwischen Gebäudeinnerem und Außenluft (Heinz, 2011).

Ein Mensch hält sich in der Regel den größten Teil des Tages in geschlossenen Räumen auf. Neben Nahrung und Wasser benötigt er auch Luft zum Leben. Obwohl es im Freien keinen Mangel an frischer Luft gibt, lässt die Luftqualität in Innenräumen bei einer gewissen Nutzungsintensität schnell nach. Dabei ist in der Regel nicht der Sauerstoff- bzw. Kohlenstoffdioxidgehalt das Problem, sondern die entstehende Feuchtigkeit im Raum, sowie vorhandene Schad- und Geruchsstoffe (Heinz, 2011). Um diesen entgegen zu wirken muss der Raum ausreichend belüftet werden. Dementsprechend dient die Lüftung neben der Reduzierung des Kohlenstoffdioxidgehalts dazu, Feuchtigkeit aus dem Gebäude abzutransportieren, Schad- und Geruchsstoffe zu mindern und gegebenenfalls die Raumtemperatur zu senken. Die Notwendigkeit der Lüftung kann in zwei Bereiche unterschieden werden: Die Nennlüftung, zum Schutz vor Bauschäden, und die Bedarfslüftung, welche den Fokus auf die Raumlufthygiene legt (Bohne, 2019).

Vorwiegend in Wohngebäuden konnte lange Zeit eine gute Raumlufthqualität schon durch eine einfache Fensterlüftung in Kombination mit der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle erreicht werden. Mit der heutigen Dichtigkeit von Neubauten ist diese Art der Lüftung jedoch meist nicht mehr ausreichend. Besonders in vielgenutzten Räumen, wie in Bürogebäuden, in denen sich mehrere Personen über einige Stunden gleichzeitig aufhalten wird die Raumlufth schnell als „stickig“ empfunden. In diesen Fällen bietet sich ein auf die Bedürfnisse angepasstes Lüftungskonzept an.

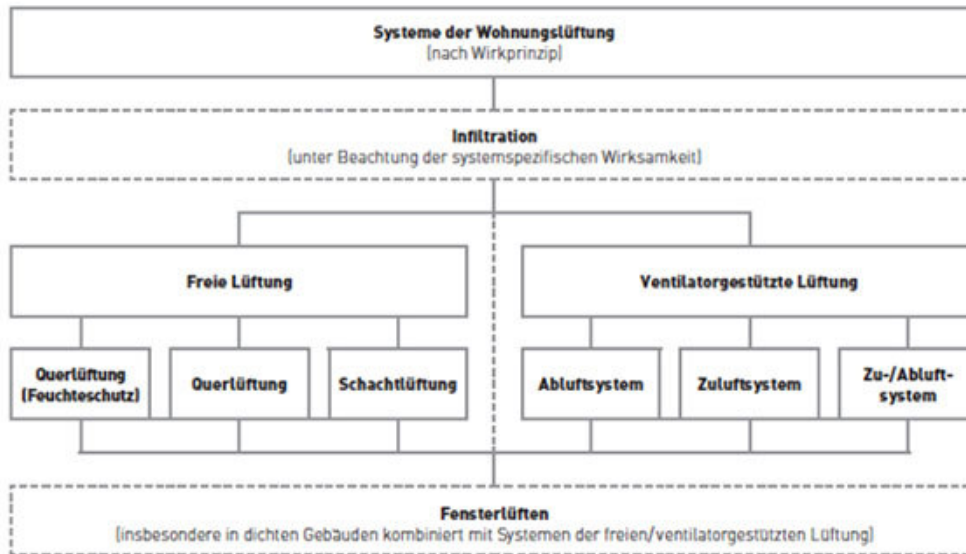


Abbildung 1: Systeme der natürlichen Wohnungslüftung nach DIN 1946-6 (VfW, 2018)

In der Lüftungstechnik gliedert man zwischen der freien Lüftung und der ventilatorgestützten Lüftung. Grundsätzlich unterscheiden sich diese beiden Lüftungssysteme in ihren Antriebskräften, natürlich oder mechanisch, und der genutzten Hilfsmittel.

### 2.3.1 Freie Lüftung

Unter freier Lüftung versteht man den Luftaustausch zwischen dem Gebäudeinneren und der Außenluft, sowie den Luftaustausch innerhalb eines Gebäudes ohne mechanische Lüftungsanlage. Die Luftzufuhr wird über Außenluftdurchlässe als Folge von Druckdifferenzen, mittels Winddruck und Thermik, in das Gebäude geleitet und verteilt. Zu den technischen Hilfsmitteln der freien Lüftung zählen regulierbare und selbstregelnde Außenluftdurchlässe, Lüftungsschächte mit raumseitigen Durchlässen und steuerbare Fenster, die wiederum als eigenständige Außenluftdurchlässe fungieren.

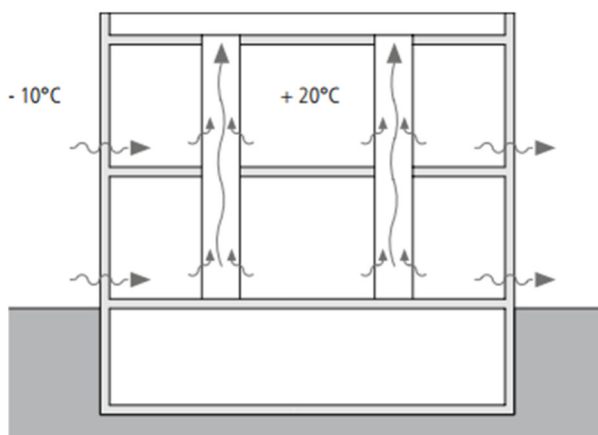


Abbildung 2: Durch Thermik verursachte Strömung zur freien Lüftung über Außendurchlässe und Schächte (Bohne, 2019, S.339)

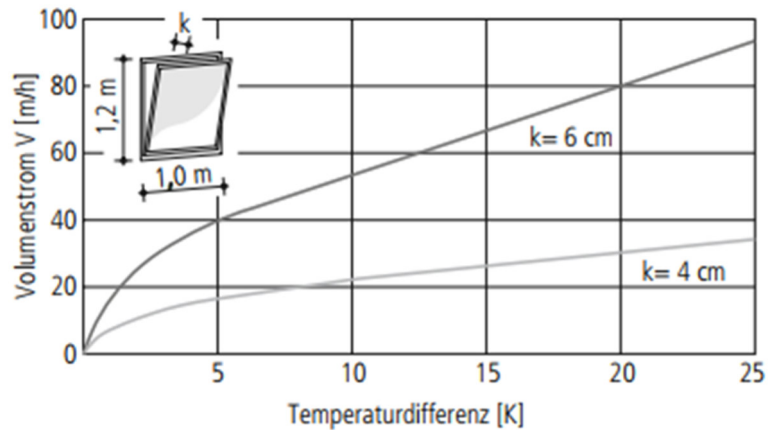


Abbildung 3: Theoretischer thermisch bedingter Luftaustausch über Kippfenster bei Windstille (Bohne, 2019, S.340)

Die freie Lüftung unterliegt natürlichen Grenzen. Äußere Einflüsse, wie der Gebäudestandort und die Windrichtung können sich sowohl positiv als auch negativ auf die Wirksamkeit der Lüftung auswirken. Im städtebaulichen Kontext können unter anderem Schallemissionen und unterschiedliche Windgeschwindigkeiten eine Rolle spielen. Auch bestehen andere thermische Bedingungen zwischen engen Häuserschluchten als bei freistehenden Gebäuden. Für einen guten Luftaustausch innerhalb eines Gebäudes ist zusätzlich die Gebäudestruktur zu beachten.

Des Weiteren unterliegt die freie Lüftung witterungsbedingten Einflüssen. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, unterscheiden sich die zu erreichenden Luftvolumenströme im Sommer zu denen im Winter. Höhere Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenräumen ermöglichen eine größere thermische Strömung.

Im Gegensatz zu den regulierbaren Öffnungen der Gebäudehülle, sind manuelle Eingriffe durch den Nutzer und Luftströmungen durch Undichtigkeiten nicht kalkulierbar und sollten deshalb bei der Planung von Lüftungssystemen nicht berücksichtigt werden (Heinz, 2011; Bohne, 2019).

### 2.3.2 Ventilatorgestützte Lüftung

Die ventilatorgestützte Lüftung kann sowohl als Zu- und Abluftanlage, als auch ausschließlich als reine Zuluftanlage bzw. Abluftanlage verwendet werden. Gegenüber freier Lüftung, bietet sich bei dem Lüftungssystem einer Zu- und Abluftanlage die Möglichkeit der Abluftwärmenutzung zur Wärmerückgewinnung, dieser Aspekt wird jedoch auf Grund des Umfangs dieser Arbeit nicht näher erläutert. Dem Prinzip einer freien Lüftung ist die Nutzung einer ventilatorgestützten Lüftung als reine Abluftanlage ähnlich.

Bei einer ventilatorgestützten Abluftanlage wird ein Differenzdruck als Antriebskraft durch einen oder mehrere Ventilatoren erzeugt. Mit Hilfe von Außenluftdurchlässen kann so ein kontrollierter Luftaustausch zwischen der Innen- und Außenluft stattfinden. Die entstehende Abluft kann über das Dach abgeführt werden. Zusätzlich werden Luftleitungen bzw. Lüftungsschächte, Luftdurchlässe im Gebäude und in der Gebäudehülle, Luftfilter, Schalldämpfer und Steuerungselemente als technische Hilfsmittel verwendet. Im Gegensatz zu den stark schwankenden Luftwechseln der freien Lüftung können bei der ventilatorgestützten Lüftung Luftvolumenströme in annähernd konstanter Höhe eingestellt werden. Abweichungen von den geplanten Luftvolumenströmen können durch eventuelle Stördrücke auftreten. Sie sind die Folge von Änderungen der Druckverhältnisse im gesamten Luftleitungssystem durch Wind und thermischen Auftrieb (Heinz, 2011).

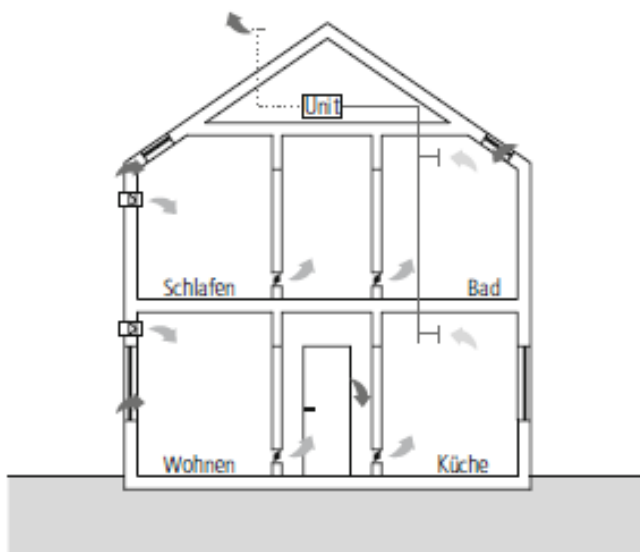


Abbildung 4: Ventilatorgestützte Abluftanlage mit zentralem Ventilator (Bohne, 2019, S.347)

## 2.4 Temperatur als Indikator des Innenraumklimas

Das Bedürfnis von Raumnutzern zur Lüftung wird häufig durch eine erhöhte Raumtemperatur hervorgerufen. Überschreitet diese einen gewissen Temperaturbereich, wird die Raumtemperatur als unbehaglich empfunden und körperliche Auswirkungen, wie Schwitzen und eine sinkende Konzentrationsfähigkeit können sich bemerkbar machen. Beeinflusst wird die Raumtemperatur durch äußere und innere Lasten (häufig auch als Wärmegewinne bezeichnet), wobei die äußeren Lasten wiederum von Tages- und Jahreszeiten abhängig sind. Eine wichtige Quelle für äußere Lasten (äußere Kühllasten) ist unter anderem die Sonnenstrahlung. Sie teilt sich auf in direkte und diffuse Strahlung und kann durch transparente Außenbauteile, wie Fenster, die Raumluft direkt erwärmen oder auch indirekte Wärmegewinne bewirken, indem sie den Raum umgebende Bauteiloberflächen erwärmt. Wie viel Wärme von den Bauteiloberflächen aufgenommen wird und wie viel durch sie hindurch gelangen kann, hängt beispielsweise von ihrer spezifischen Wärmekapazität und dem Wärmedurchgangskoeffizienten ab. Nur ein geringer Teil der Sonnenstrahlung wird über die Fenster und äußere Gebäudeoberflächen reflektiert (Kern, 2014).

Zunehmend erhöhte Wärmedämmung und gezielter Sonnenschutz verhindern Wärmeverluste und verringern den äußeren Wärmeeintrag, wodurch die Bedeutung interner Lasten für die Raumtemperatur steigt. Vorwiegend in Bürogebäuden tragen die internen Lasten einen großen Teil zur Erwärmung der Raumluft bei. Sie werden auch als innere Kühllasten bezeichnet und beziehen sich vorrangig auf die Wärmestrahlung ausgehend von elektronischen Geräten, Beleuchtung und im Raum befindlicher Personen.

Nach einer Versuchsstudie, im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, im Jahr 2012 konnte festgestellt werden, dass die thermische Behaglichkeit der Raumnutzer, bei einer Überschreitung der durch die Arbeitsstättenregel ASR A3.5 vorgegebenen Raumlufttemperatur von +26 °C, negativ belastet wird. Die Probanden fühlten sich durch die erhöhte Raumtemperatur weniger leistungsfähig, angestregter, schläfriger und weniger ausgeglichen. Hinzukommend konnten eine gestiegene Herzfrequenz und erhöhte Hauttemperatur gemessen werden. Trotz der empfundenen Unbehaglichkeit konnte bei diesem Versuch, entgegen den Erwartungen, keine signifikante Leistungsabnahme festgestellt werden. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass die Raumtemperatur keinen direkten Einfluss auf die mentale Leistungsfähigkeit des Menschen hat, sich aber stark auf das psychische und physische Empfinden auswirkt. Bei einer genauen Betrachtung der Ergebnisse ist auch die Versuchsdauer zu berücksichtigen, diese betrug 4,5 Stunden mit ausreichendem Pausenanteil (Hellwig, et al., 2012). Demnach lassen sich die Ergebnisse nicht vollständig auf einen ganzen Arbeitstag von durchschnittlich acht Stunden übertragen, es wird jedoch deutlich, dass erhöhte Raumtemperaturen zu vermeiden sind.

### 2.4.1 Innere Kühllasten in Bürogebäuden

Als eine wichtige Kenngröße der thermischen Behaglichkeit gilt die Temperatur. Der Mensch empfindet die Rauminnentemperatur in der Regel dann als behaglich, wenn die eigene Wärmeabgabe und die Wärmeaufnahme gleich groß sind. Dabei beeinflusst unter anderem der menschliche Körper selbst die ihn umgebende Raumtemperatur, denn er befindet sich im ständigen Wärmeaustausch mit seiner Umgebung. Der menschliche Körper gibt ca. 63 % seiner gesamten Wärmeabgabe über Konvektion und Strahlung ab, zusätzliche 37 % werden über die Atmung und allgemeine Verdunstung abgegeben (Bohne, 2019). Die Höhe der Gesamtwärmeabgabe hängt von dem Aktivitätsgrad der Person ab, je mehr sie sich bewegt desto mehr Wärme wird vom Körper produziert und abgegeben.

Tabelle 1: Gesamtwärmeabgabe eines Menschen in Abhängigkeit zum Aktivitätsgrad in Watt (Bohne, 2019, S. 2)

Raumtemperatur (operativ)	20 °C	26 °C
Körperlich nicht tätig bis leichte Arbeit im Stehen (W/Pers.)	120	115
Mäßig schwere körperliche Tätigkeit (W/Pers.)	190	190
Schwere körperliche Tätigkeit (W/Pers.)	270	270

Nach den Angaben der Tabelle 1 kann für eine Person in vorwiegend sitzender Bürotätigkeit, und bei 20 °C operativer Durchschnittstemperatur eine Gesamtwärmeabgabe von 120 W angenommen werden.

Weitere wichtige Quellen für die Rauminnentemperatur bilden sogenannte „Arbeitshilfen“ in Büroräumen, dazu gehören Computer, Monitore, Drucker, Kopiergeräte und Scanner (VDI 2078:2015). Abhängig von ihrer Leistung geben diese Arbeitshilfen während des Betriebs Wärmeenergie fast ausschließlich in Form von Strahlung und Konvektion ab (Bohne, 2019).

Bei einer ganzheitlichen Betrachtung zur thermischen Behaglichkeit darf der Einfluss von Gebäudedämmung nicht außer Acht gelassen werden. Hier kann durch unterschiedliche Oberflächentemperaturen eine Strahlungsasymmetrie entstehen, welche als unangenehm empfunden werden kann. Es wird unterschieden zwischen Raumlufttemperatur und operativer Raumtemperatur. Während die Raumlufttemperatur über Thermometer leicht zu messen ist, muss bei der operativen Raumtemperatur die für den Menschen spürbare Wärmestrahlung von Wänden und anderen Oberflächen mit erfasst werden.

Somit entspricht die vom Menschen empfundene Temperatur der operativen Raumtemperatur, sie wird deshalb auch häufig als „Empfindungstemperatur“ bezeichnet



(Bohne, 2019). Nach DIN EN 15251:2012-12 beziehen sich die Werte der operativen Raumtemperatur „auf die ausgewiesene Aufenthaltszone eines Raums. Tritt in einem Raum eine Temperaturschichtung auf, wird der Wert für die operative Temperatur in einer Höhe von 60 cm ermittelt.“

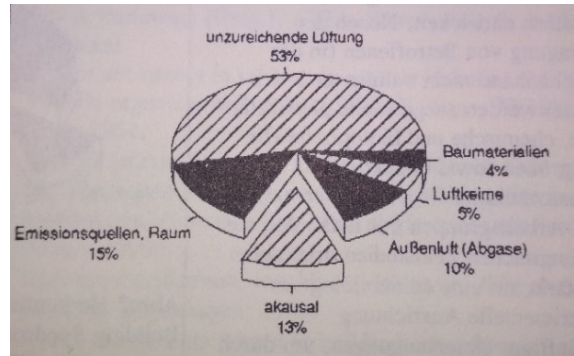
Da die operative Raumtemperatur keine objektive Größe ist, gibt es lediglich Richtwerte für verschiedene Raumtypen. Auch fließt der Faktor der persönlichen Bekleidung in das Behaglichkeitsempfinden mit ein. Die subjektive Beurteilung der Raumnutzer wird als Durchschnittswert über den PMV-Wert (Predicted Mean Vote) angegeben. Da man davon ausgehen kann, dass nie alle Raumnutzer zu gleichen Teilen mit dem Raumklima zufrieden sein werden, wird die prozentuale Abweichung an Unzufriedenen als PPD-Wert (Predicted Percentage of Dissatisfied) mit mind. 5 % angegeben (Bohne, 2019).

## 2.5 Kohlenstoffdioxid als Indikator der Innenraumluftqualität

Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) kommt als natürlicher Bestandteil der Luft, in einer für Großstädte üblichen Konzentration von 400 ppm, das entspricht 1,83 g CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, bei 1013 mbar und 20 °C in der Umwelt vor (Lahrz, et al., 2008). Als Produkt der menschlichen Atmung kann sich dieser CO<sub>2</sub>-Gehalt innerhalb eines Innenraumes in Abhängigkeit zur Nutzungsintensität erhöhen. Insbesondere in kleinen Räumen, in denen sich viele Menschen gleichzeitig aufhalten, wie Klassenzimmer, Versammlungsräume und Großraumbüros, kann dieser Wert schnell ansteigen. Das vom Menschen ausgestoßene CO<sub>2</sub> korreliert mit der Ausdünstung organischer Verbindungen, die zumindest anteilig als Ausscheider von Körpergeruch angesehen werden können. Hierbei spielen die Stoffe Aceton, Buttersäure, Ethanol und Methanol eine vorrangige Rolle (Boos, et al., 2018). Als weiterer Effekt einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen konnten kurzzeitige Auswirkungen auf die Gesundheit der Raumnutzer und ihre Leistungsfähigkeit festgestellt werden. In DIN 15251:2012-12 wird angegeben, dass sich die Qualität des Innenraumklimas auf die Produktivität und Behaglichkeit der Nutzer auswirkt und dabei die Kosten zur Behebung der resultierenden Probleme, wie zum Beispiel vermehrte Krankmeldungen, als höher eingeschätzt werden können als die eigentlichen Energiekosten des Gebäudes. Um das sie umgebende Raumklima zu verbessern neigen Raumnutzer dazu Abhilfemaßnahmen zu treffen, welche sich wiederum negativ auf den Energieverbrauch auswirken können (DIN EN 15251:2012-12).

Dabei ist CO<sub>2</sub> kein alleiniger Auslöser für Beschwerden, vielmehr spielt die Gesamtbelastung der Innenraumluftqualität eine Rolle. Um diese zu bestimmen bietet sich CO<sub>2</sub>, auf Grund seiner einfachen Indikation, als Parameter an.

Hauptursache für gesundheitliche Beschwerden als Folge verschlechterter Luftqualität ist mit über 50 % eine unzureichende Lüftung. Zu häufigen Symptomen gehören Müdigkeit, Kopfschmerzen, Übelkeit und Konzentrationsprobleme (Bischof, et al., 1993).



Es wird also deutlich, dass eine verbesserte Raumluftqualität zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration sowohl die Zufriedenheit der Raumnutzer steigern kann, als auch positive Auswirkungen auf den Energieverbrauch hat.

Abbildung 5: Ursachenverteilung einer schlechten Raumluftqualität (Bischof, et al., 1993, S.13)

Schon 1858 wurde durch Max von Pettenkofer ein Richtwert für die Raumluftqualität anhand des CO<sub>2</sub>-Gehalts und damit einhergehende Geruchsbelastungen auf 1.000 ppm, das entspricht 1.830 mg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, festgelegt (genannt Pettenkofer-Zahl). Dieser Wert wurde lange Zeit zur Beurteilung herangezogen, unter der Annahme, dass sich bei Einhaltung des Richtwerts auch andere im Raum befindliche Immissionen der Luft in einem hygienisch vertretbaren Konzentrationsbereich bewegen (Heinz, 2011). Durch die starken Veränderungen in der Gebäudebauweise können zwar heutige und damalige Innenluftverhältnisse nicht mehr vollständig gleichgesetzt werden, trotzdem kommen auch aktuelle Untersuchungen zu ähnlichen Ergebnissen. So ist nach einer Bekanntmachung des Umweltbundesamtes die Empfehlung ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.000 ppm zu lüften und ab einem dauerhaften Wert von über 2.000 ppm weitergehende eventuell auch bauliche Maßnahmen zu prüfen (Lahrz, et al., 2008).

Mit dem Menschen als bedeutendste CO<sub>2</sub>-Quelle ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Innenraum vor allem von der Anzahl der Personen und der Raumgröße abhängig. In den Körperzellen eines jeden Menschen entstehen täglich 0,7 kg CO<sub>2</sub> und werden über die Lunge abgeatmet (Lahrz, et al., 2008). Das Verhältnis des CO<sub>2</sub>-Gehalts in inhaliertes zu exhalierter Luft liegt bei ca. 1:140 (Boos, et al., 2018), dabei spielt die Aktivität des Menschen eine wesentliche Rolle. In körperlicher Ruhe stößt eine erwachsene Person stündlich ca. 13 bis 14 Liter CO<sub>2</sub> aus (VDI 4300 Bl.9).

Tabelle 2: CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Person in L/h (VDI 4300 Bl.9)

<b>Aktivität</b>	<b>in L/h</b>
Sitzende Tätigkeit	15 bis 20
Leichte Arbeit	20 bis 40
Mittelschwere Arbeit	40 bis 70
Schwere Arbeit	70 bis 110

Ausgehend von den Werten in Tabelle 2 kann nach der VDI Richtlinie 4300 für Büro-tätigkeiten ein Wert von etwa 20 Litern CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Stunde und Person ange-nommen werden.

Um zu ermitteln, wie hoch der Luftwechsel sein muss, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum wieder auszugleichen gibt es verschiedene Ansätze. Üblicherweise wird zur Berechnung der Luftwechselrate ein Luftvolumenstrom mit dem Nettoraumvolumen ins Verhältnis gesetzt. Man spricht hierbei von der n<sub>50</sub>-Kenngröße. Es wird davon ausgegangen, dass über alle Gebäudeflächen der Nutzungseinheit, unter anderem durch die Luftdurchlässigkeit des Gebäudes, Außenluft einströmen kann. Hier wurde jedoch in der Praxis festgestellt, dass diese Berechnungsmethode vergleichsweise große Abweichungen auf Grund von ungenauen Messungen in komplexen Gebäudegeometrien und Interpretationsspielraum aufweist. Des Weiteren kann die Luftwechselrate auf Grundlage der Nettogrundfläche des Gebäudes und nach DIN 4108-7 mit Hilfe der Gebäudehüllfläche ermittelt werden (Heinz, 2011).

Da in der vorliegenden Arbeit der Mensch als Hauptfaktor des CO<sub>2</sub>-Anstiegs im Raum angesehen wird, ist es sinnvoll den nötigen Luftwechsel auf die im Raum befindlichen Personen zu beziehen. Ein personenbezogener Luftwechsel lässt sich über die Außenluftrate ermitteln.

Zur Bestimmung der theoretisch notwendigen Außenluftfrate pro Person gilt folgender Ansatz:

$$q_{v,L,Au,P} = \frac{q_{v,CO_2,P}}{C_{CO_2,R} - C_{CO_2,Au}}$$

Dabei ist

$q_{v,L,Au,P}$	die theoretisch notwendige Außenluftfrate pro Person,	$\frac{m^3}{h \cdot P}$
$q_{v,CO_2,P}$	die pro Person ausgestoßene Menge CO <sub>2</sub> ,	$\frac{L}{h \cdot P}$
$C_{CO_2,R}$	der unterer Richtwert des CO <sub>2</sub> -Gehalts im Raum,	ppm
$C_{CO_2,Au}$	der CO <sub>2</sub> -Gehalt der Außenluft	ppm

Berechnung der personenbezogenen Außenluftfrate nach Heinz, 2011 S.49 (2.1)

### 3 Projektvorstellung

Die in den Abschnitten 5 und 6 beschriebene thermische Gebäudesimulation zur Entwicklung eines energiesparenden Lüftungskonzepts wurde auf Grundlage eines realen Bauprojekts des Büros Freie Ingenieure erstellt.

Das geplante Bauvorhaben befindet sich in Hamburg-Wandsbek. Hier soll ein aktuell bestehendes Kundenzentrum einer Telekommunikationsfirma abgerissen und durch einen wesentlich größeren eingeschossigen und vollunterkellerten Neubau ersetzt werden. Das Büro Freie Ingenieure ist zur Planung für Heizung, Lüftung und Sanitär beauftragt. Auf Grund der Nutzung des Neubaus ist mit erheblichen internen Wärmelasten zu rechnen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch eine thermische Gebäudesimulation die zu erwartende Raumtemperatur im Jahresverlauf zu ermitteln und basierend auf den Ergebnissen ein energiesparendes Lüftungskonzept zu entwickeln. Nach Möglichkeit soll auf den Einbau von Heizkörpern verzichtet werden, weshalb zu prüfen ist, ob der Lüftung neben einer Kühlfunktion auch eine Heizfunktion zufällt.

Da der geplante Keller lediglich zur Lagerung und als Archiv genutzt wird, ist eine Belüftung hier nicht erforderlich und wird in den Ergebnissen der Simulation nicht berücksichtigt.

Die Gewerke Heizung und Sanitär werden im Folgenden nicht weiter behandelt, da dies den Umfang dieser Arbeit übersteigen würde.

Planzeichnungen für den Neubau sind den Anhängen 4 und 5 zu entnehmen.

## 4 Theoretische Vorüberlegungen

Ziel dieser Arbeit ist es, ein behagliches Raumklima unter möglichst geringem Energieeinsatz zu schaffen. Nach Definition und Einstellung aller internen Wärmelasten soll daher auf Basis der Simulationsergebnisse ein Großteil dieser Lasten über eine freie Lüftung gesenkt werden. Hierbei sollen die genutzten Fensteröffnungen motorisch steuerbar sein, um keinen zusätzlichen Energieverlust als Folge einer Dauerlüftung, insbesondere im Winterfall, zu haben. Eine eventuell zusätzlich notwendige ventilatorgestützte Lüftung soll nur nach Bedarf zugeschaltet werden. Neben dem Hauptparameter der Temperatur wird auch die CO<sub>2</sub>-Konzentration als Lüftungsparameter betrachtet.

Bei allen Angaben zu Mitarbeiter- und Besucherzahlen sind, mit der männlichen Form der Aufzählung, grundsätzlich alle Geschlechter gleichermaßen gemeint.

### 4.1 Lüftung auf Grundlage der Temperatur

Durch die deutliche Vergrößerung des Kundenzentrums erhöht sich ebenfalls die Anzahl der Arbeitsplätze im Gebäude, deshalb kann nicht mehr von der bisherigen internen Last ausgegangen werden. Auf Grundlage der Planzeichnung (Anhang 4) wird im Folgenden mit insgesamt 12 Arbeitsplätzen, verteilt auf den Kundenbereich, zwei Büros und den Empfang, gerechnet. Durch den zum Zeitpunkt der Simulation noch sehr frühen Planungsstand, kann der Erfahrung nach mit eventuellen Änderungen der Innenraumgestaltung gerechnet werden. Auch ist nicht klar, ob die verglasten Türen der Büros offen stehen oder vorwiegend geschlossen sein werden, da hier das Nutzerverhalten nicht vorausgesehen werden kann. Aus diesen Gründen wird das Kundenzentrum als ein großer Raum angesehen und gilt in der Simulation als eine Zone.

Für die Arbeitshilfen werden folgende Werte als interne Lasten angenommen:

Tabelle 3: Stromverbrauch verschiedener Büroarbeitshilfen  
(O.Ö. Energiesparverband, 2016; Stromverbrauchinfo, 2019)

		In Betrieb	Standby
Personenbezogen	Computertower	40 W	3 W
	Computerbildschirm, 24 Zoll	20 W	0,5 W
Personenunabhängig	Multifunktionsdrucker	350 W	6,5 W
	Fernseher, 55 Zoll	85 W	0,4 W
	Licht (Energiesparlampen)	10 W/m <sup>2</sup>	-

Allgemein kann man davon ausgehen, dass der vom Gerät aufgenommene Strom vollständig in Wärme umgewandelt wird.

Für jede Person im Raum werden 120 W Wärmeabgabe berechnet (Abschnitt 2.4.1, Tabelle 1). Pro Person werden ein Computertower und zwei Computerbildschirme am Arbeitsplatz vorgesehen (personenbezogene Arbeitshilfen). Des Weiteren werden zwei Multifunktionsdrucker (Drucker, Kopierer und Scanner kombiniert), ein an der Wand hängender Fernsehbildschirm und auf die Fläche bezogene Beleuchtung eingerechnet. Für personenunabhängige Arbeitshilfen wird davon ausgegangen, dass diese während den Arbeitszeiten von 09:00 bis 20:00 Uhr eingeschaltet und nachts ausgeschaltet sind. Personenabhängige Arbeitshilfen werden nach der Anzahl an Mitarbeitern während der Arbeitszeit als eingeschaltet und nachts ebenfalls als ausgeschaltet betrachtet.

Hinzu kommen die Besucher des Kundenzentrums, die ebenfalls Wärme emittieren. Ihr Einfluss auf den Temperaturverlauf wird in der Simulation versuchsweise durch eine wechselnde Besucheranzahl geprüft.

Weil sich die empfundene Raumtemperatur von der Raumlufthtemperatur unterscheidet, soll bei der Durchführung und Auswertung der thermischen Simulation die operative Temperatur betrachtet werden.

## 4.2 Lüftung auf Grundlage des CO<sub>2</sub>-Gehalts

Da es sich bei dem zu simulierenden Gebäude um ein Kundenzentrum handelt, ist von einer schwankenden Personenanzahl im Raum auszugehen. Kongruent zur Personen-dichte im Kundenzentrum wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigen oder sinken. Es scheint also sinnvoll eine theoretisch notwendige Außenluftfrate anhand der pro Person ausge-stoßenen Menge CO<sub>2</sub> zu ermitteln. Der daraus resultierende Luftwechsel lässt eine erste Einschätzung zur Notwendigkeit einer zusätzlichen ventilatorgestützten Lüftung zu.

Das Kundenzentrum hat eine Fläche von rund 306 m<sup>2</sup> und eine Deckenhöhe von 2,78 m. Damit ergibt sich ein Raumvolumen von ca. 851 m<sup>3</sup>. Es wird eine CO<sub>2</sub>-Außenkonzentration von 400 ppm und ein Grenzwert für den Innenraum von 1.000 ppm angenommen.

Unter Einberechnung der Personenanzahl, mit einem angenommenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 20 L/h pro Person (Abschnitt 2.5, Tabelle 2), kann nach Formel (2.1) folgende Kennlinie erstellt werden:

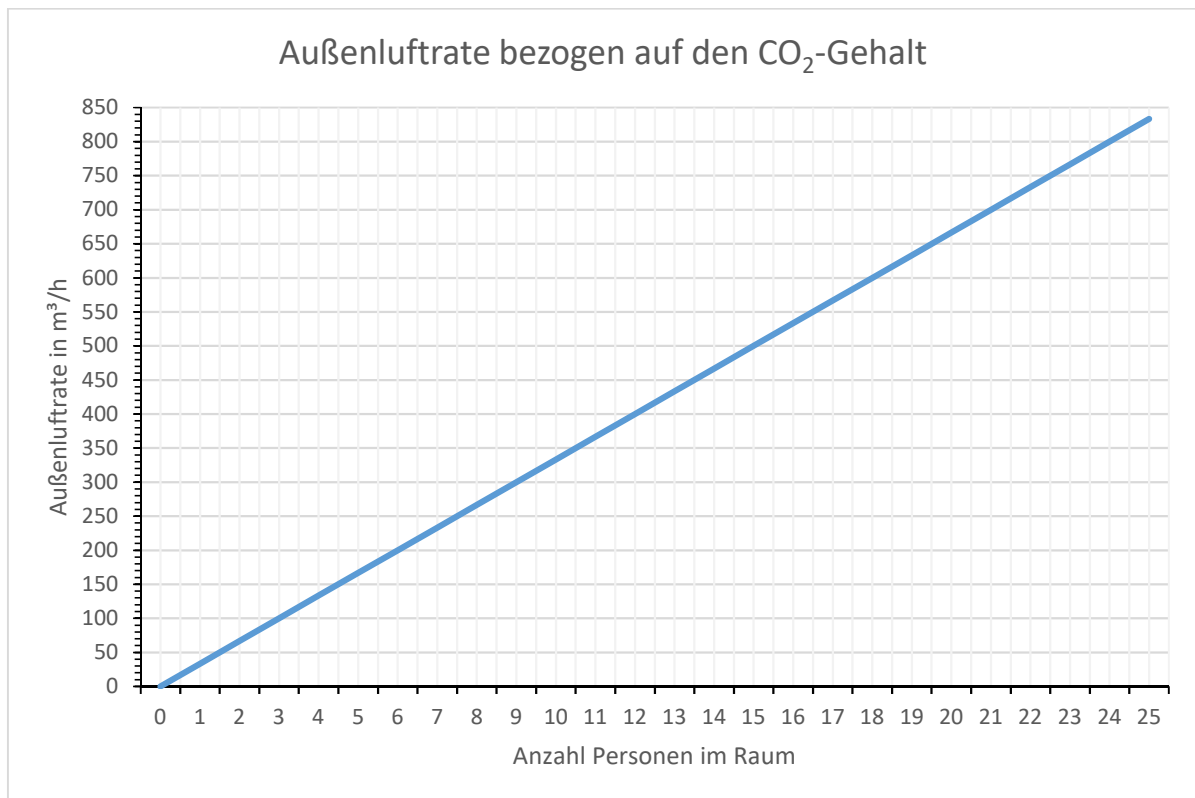


Abbildung 6: Theoretisch notwendigen Außenluftfrate in Abhängigkeit zur Personenanzahl

Setzt man die Außenluftfrate mit dem Raumvolumen ins Verhältnis ergibt sich eine Kennlinie des benötigten personenbezogenen Luftwechsels, um das ausgestoßene CO<sub>2</sub> zu kompensieren.

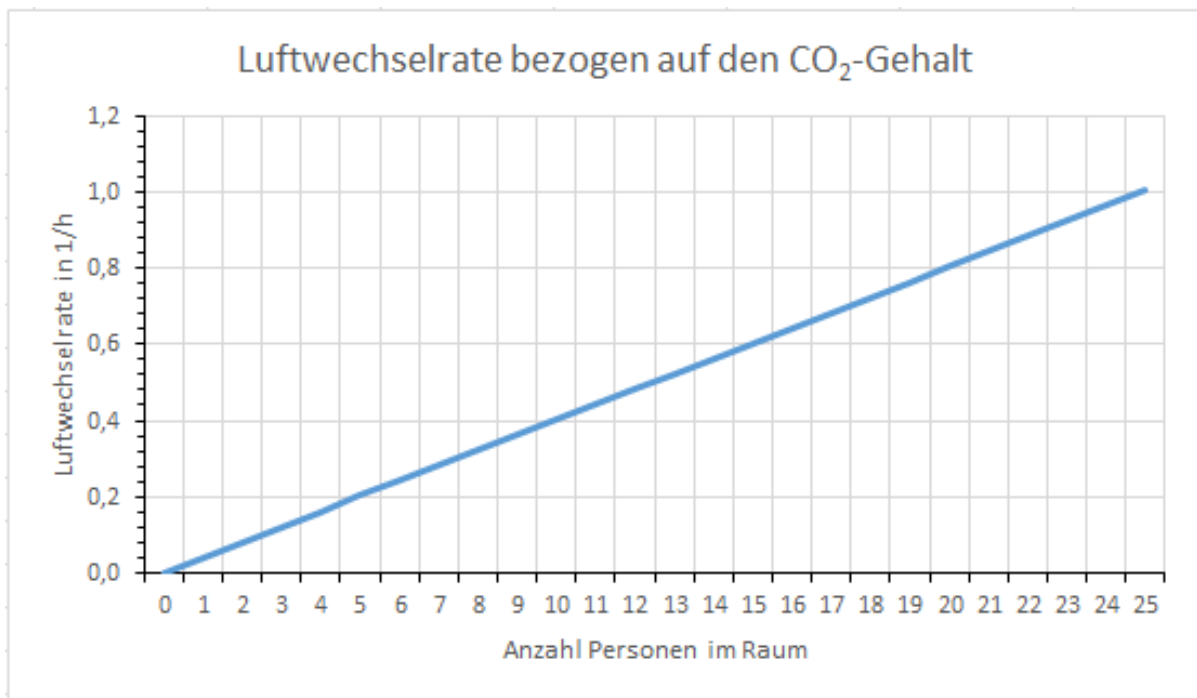


Abbildung 7: Personenbezogene Luftwechselrate

Die berechnete Außenluftfrate und Luftwechselrate soll direkt als Lüftungsparameter in die Simulation eingebunden werden.

### 4.3 Sonnenschutz

Abgesehen von Lüftungssystemen ist Sonnenschutz eine einfache Möglichkeit die Erwärmung eines Raumes durch gezielte Verringerung äußerer Wärmeeinträge zu mindern. Dieser sollte außen an den Fenstern angebracht werden, um neben dem Schutz geblendet zu werden, auch einen ausreichenden Wärmeschutz zu bieten. Zur Steuerung eines Sonnenschutzes kann die für Deutschland durchschnittliche direkte Strahlungsleistung der Sonne herangezogen werden. Jahreszeitlich abhängig kann die Strahlungsintensität an einem klaren Sommertag bis zu 1000 Watt pro Quadratmeter erreichen, an einem bewölkten Wintertag jedoch bis auf 50 Watt pro Quadratmeter absinken (Wagner, 2017).

Bei der Verwendung eines äußeren Sonnenschutzes sollte auf die Raumnutzung Rücksicht genommen werden. Damit die Fenster eines Büros im Sommer nicht durchgehend verdeckt werden, kann überlegt werden nur an den stark beschienenen Fensterseiten einen Sonnenschutz anzubringen, sprich die Nordseite ohne Sonnenschutz zu belassen. Weiter wäre auch zu ermitteln wie stark die Verschattung über den Sonnenschutz insgesamt sein muss, um einen Effekt auf die Wärmeentwicklung im Raum zu haben.



## 4.4 Bewertung der Simulationsergebnisse

Ausgehend von Formel (2.1) in Abschnitt 2.5 soll die Lüftung des Kundenzentrums CO<sub>2</sub>-gesteuert sein. Bei vermehrter Personenzahl wird automatisch die Lüftung angepasst und entsprechend erhöht. Die Personenzahl soll dementsprechend einstellbar sein. Unter Einbezug dieses Regelparameters wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum kontrolliert und somit eine gute Raumluftqualität gewährleistet.

Unabhängig vom CO<sub>2</sub>-Gehalt, kann die Raumtemperatur als zu warm oder zu kalt empfunden werden. In beiden Fällen wird die Temperatur dann als unbehaglich eingestuft. Im Falle einer als zu gering empfundenen Raumtemperatur kann mit Hilfe eines Heizsystems bzw. durch Erwärmen der durch die Lüftung zugeführten Luft reagiert werden. Im Falle einer zu hohen Raumtemperatur kann diese eventuell durch eine weitere Erhöhung der Lüftung reduziert werden. Als mittlerer Luftwechsel für Nichtwohngebäude wird für die Größe des hier zu betrachtenden Kundenzentrums ein konstanter Wert von etwa 1,5 pro Stunde vorgegeben (DIN 4108-2:2013-02). Dieser soll als maximaler Luftwechsellparameter eingestellt werden.

Für eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse sollen eventuell entstehende Übertemperaturgradstunden nach der „Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz“ (DIN 4108-2:2013-02 Abschnitt 8) ermittelt und bewertet werden.

### 4.4.1 Bewertung nach Übertemperaturgradstunden

Um die Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes nachzuweisen, kann laut DIN 4108-2:2013-02 eine thermische Gebäudesimulation durchgeführt werden. Zur Bewertung der Simulationsergebnisse werden unter anderem Übertemperaturgradstunden (UTS) als Maßstab herangezogen. Sie bezeichnen die Summe aller Temperaturgradstunden oberhalb eines vorgegebenen Bezugswertes (Tabelle 4) der zugehörigen Sommer-klimaregion (Abbildung 8) im Laufe eines Referenzjahres.

Bei Überschreitung des Bezugswertes um 1 K für die Dauer von einer Stunde wird eine Übertemperaturgradstunde berechnet. Bei Überschreitung von 2 K für die Dauer von einer Stunde werden zwei Übertemperaturgradstunden berechnet. Dieser Logik folgend würde sich beispielsweise für eine Überschreitung des Bezugswertes von 2 K für die Dauer von vier Stunden die Summe von acht Übertemperaturgradstunden ergeben.

Zur Berücksichtigung regional unterschiedlicher Klimaverhältnisse im Sommer, wird Deutschland in drei Sommerklimaregionen unterteilt.



Abbildung 8: Sommerklimaregionen in Deutschland (DIN 4108-2:2013-02 S. 21)

Tabelle 4: Maximal zulässige Anzahl an Übertemperaturgradstunden pro Jahr mit Bezugswert (DIN 4108:2-2013-02 S. 28)

Sommerklimaregion	Bezugswert $t_{b,op}$ der Innentemperatur °C	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden Kh/a	
		Wohngebäude	Nichtwohngebäude
A	25	1 200	500
B	26		
C	27		

Mit der Betrachtung eines Bauprojekts in Hamburg sind die Ergebnisse der nachfolgenden thermischen Gebäudesimulation mit dem Bezugswert von 26 °C aus der Sommerklimaregion B zu vergleichen. Da es sich hierbei um ein Nichtwohngebäude handelt, gilt ein Anforderungswert von maximal 500 Übertemperaturgradstunden im Jahr.

## 5 Thermische Gebäudesimulation mit TRNSYS

Die nachfolgende thermische Gebäudesimulation wurde mit dem Simulationsprogramm TRNSYS erstellt.

### 5.1 Einführung in das Programm TRNSYS

Das Softwareprogramm TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation Program) ist ein Open Source Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm, welches erstmalig 1975 als Version TRNSYS 6.0 von der University of Wisconsin herausgegeben wurde. In Deutschland wird die Software durch die Transsolar Energietechnik GmbH in Stuttgart vertrieben (The Board of Regents of the University of Wisconsin System, 2017).

Mit TRNSYS lassen sich Energieströme grafisch anordnen und berechnen und die daraus entstehenden Ergebnisse in Form von Graphen und Zahlenwerten ausgeben. Die Berechnung der Energieströme ist zeitlich aufgelöst und somit dynamisch. Auch die zu betrachtende Zeitspanne und der Simulationszeitschritt lassen sich im Programm einstellen. Grundlage der Berechnung bilden insbesondere die in das Programm einlesbaren Wetterdatensätze eines Referenzjahres für verschiedene Standorte. Diese Datensätze werden unter anderem von der Firma Meteonorm bereitgestellt und enthalten sowohl Strahlungsparameter, wie direkte und diffuse Strahlung, als auch meteorologische Parameter, wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Sonnenstand, Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte.

Für eine Gebäudesimulation werden im TRNSYS Simulation Studio verschiedene Komponenten miteinander verknüpft. Komponenten mit vorprogrammierten Eigenschaften nennen sich „Type“, sie können Daten als „Inputs“ aufnehmen, mit den Informationen Berechnungen durchführen und Ergebnisse als „Outputs“ an andere Types weitergeben oder als Ergebnisdaten ausgeben.

### 5.2 Aufbau der Simulation in TRNSYS

In dieser Arbeit wird die aktuelle Version des Programms, TRNSYS 18, mit den Programmkomponenten TRNSYS Simulation Studio zur grafischen Systemmodellierung und TRNBuild zur Definition des Multizonengebäudemodells, unter Einbindung des Gebäude-modells aus Google SketchUp, verwendet. Für die korrekte Einbindung muss das Gebäudemodell mit dem TRNSYS 3D-PlugIn gezeichnet werden.

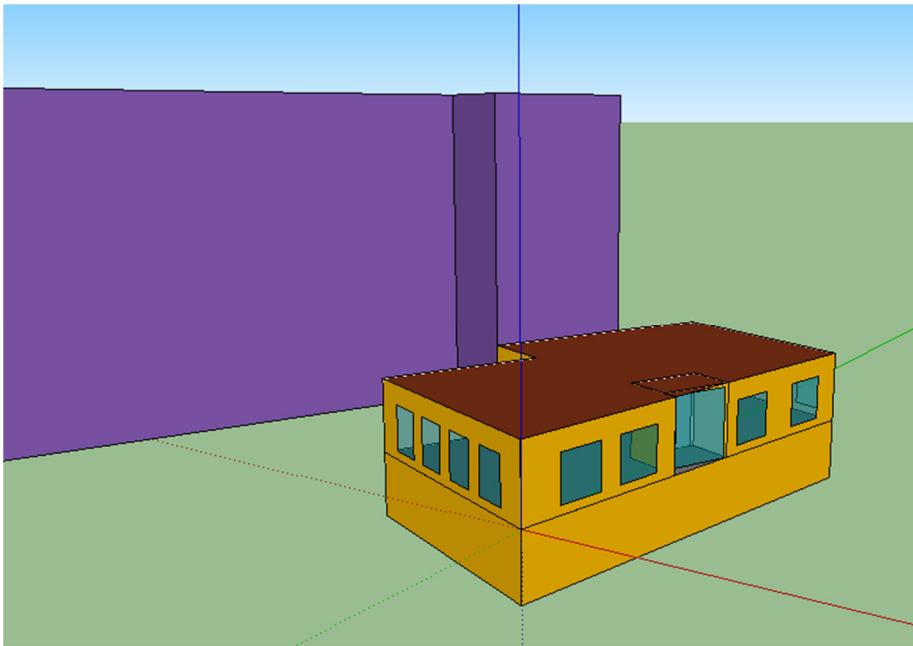


Abbildung 9: Modelzeichnung des Kundenzentrums in Google SketchUp, Version 8

Abbildung 9 zeigt das SketchUp-Model mit Keller, dem Kundenzentrum im Erdgeschoss und einem Eingangsbereich, bestehend aus zwei automatischen Glasschiebetüren. Hier in lila dargestellt werden angrenzende Gebäude als Schatten werfende Flächen abgebildet. Umstehende Bäume werden nicht berücksichtigt, da diese in ihrer Größe und Beschaffenheit über die gesamte Nutzungszeit des Gebäudes nicht als konstant angesehen werden können.

Um die Temperatur innerhalb des Gebäudes im Jahresverlauf darstellen zu können, wird für die Berechnung eine Zeitspanne von 8760 Stunden, mit einem stündlichen Zeitschritt eingestellt. Der stündliche Zeitschritt wurde als ausreichend erachtet, da bei einem Testlauf mit einem kleineren Zeitschritt von 15 Minuten keine höhere Genauigkeit des Lüftungskurvenverlaufs erreicht werden konnte.

Aus den Wetterdatensätzen wird der Datensatz DE-Hamburg-Fuhlsbuettel ausgewählt.

Im Mittelpunkt der Gebäudesimulation steht Type 56 das Multizonengebäude „Multi-Zone Building“ (siehe Abbildung 10). Type 56 nimmt die Wetterdaten aus Type 15-6 als Input auf und verarbeitet diese mit den Informationen aus dem Gebäudemodell. Das Gebäudemodell ist mit Type 56 verknüpft und kann über TRNBuild bearbeitet werden.

In der vorliegenden Betrachtung sind vordergründig Temperatur beeinflussende Faktoren für das Multizonengebäude relevant. Dazu gehören die Beschaffenheit der Wände und Fenster, außerdem interne Lasten „Gains“ wie elektronische Geräte und Personen. Diese Faktoren können über TRNBuild nach ihrer Anzahl, Nutzungsdauer und ihren Eigenschaften definiert und in das Modell integriert werden.

Da zum Zeitpunkt der Gebäudesimulation keine Angaben zum Aufbau der Wände und Fenster verfügbar sind, wird mit den vorgeschlagenen Bauteilen aus TRNBuild gearbeitet. Hier wird für die Fenster standardmäßig ein g-Wert von 0,62 und ein U-Wert von  $1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  angegeben. Dazu wird für die Außenwände ein U-Wert von  $0,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  und ein Wert von  $0,124 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  für das Dach vorgegeben.

Eine ebenfalls wichtige Rolle spielt in dieser Simulation Type 168 „Simple Natural Ventilation Model“. Durch diesen Type wird eine freie Lüftung im Multizonengebäude dargestellt. Dabei werden allgemeine Infiltration durch die Gebäudehülle, kontrollierte Lüftungsvorgänge und Stoßlüftung berücksichtigt.

Gelüftet wird ausschließlich über mechanisch betriebene Fenster und es kann zeitlich zwischen Tag und Nacht differenziert werden (Type 14h). Als konstante Inputwerte können nach Art der Hysterese Temperaturgrenzwerte für Tag und Nacht angegeben werden, nach denen die Fenster bei entsprechender Raumtemperatur geöffnet oder geschlossen werden sollen.

Als steuerbare Fensterflächen können nach den Planzeichnungen vorgesehene Oberlichter festgelegt werden (siehe Anhang 5). Da das Öffnen der Fenster ansonsten nutzerabhängig und nicht kontrollierbar ist, werden weitere Fensterflächen nicht berücksichtigt. Die Fenster weisen eine Gesamthöhe von 2,34 m auf. Da die Höhe der Oberlichter im aktuellen Planungsstand noch nicht abschließend festgelegt ist, wird davon ausgegangen, dass diese im oberen Drittel der Fenster angebracht sind. Aus dieser Annahme ergibt sich eine Fensterfläche von rund  $1,7 \text{ m}^2$  je Oberlicht. Nach dem geplanten Grundriss (Anhang 4) stehen 16 Fenster für eine gesteuerte Lüftungsanwendung zur Verfügung. Um die Raumnutzer vor Zugluft zu schützen, werden die Fensterflächen nur an einer Raumseite vorgesehen. Hierfür wird die südöstlich gerichtete Seite gewählt, da sich an dieser ebenfalls der Eingangsbereich des Kundenzentrums befindet. Daraus ergibt sich mit vier Fensterflächen eine Gesamtfensterfläche von rund  $6,7 \text{ m}^2$ , über die Oberlichter.

Zur Regelung der Luftwechselrate über Type 168 sind vorrangig die drei Inputs 5, 4 und 3 interessant. Zu Beginn lässt sich über Input 5 die Minimalanforderung der Lüftung einstellen, die mindestens erfüllt werden soll und grundsätzlich gültig ist. Im Falle des Kundenzentrums soll als Grundvoraussetzung der Lüftung immer eine gute Luftqualität im Raum gewährleistet sein. Das bedeutet, dass unabhängig von der Temperatur eine ausreichende Lüftung zur Kompensation des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Raumluft eingesetzt werden muss. Diese Lüftung ist personenbezogen und bezieht sich auf die Berechnungen nach Formel (2.1). Zur geregelten Umsetzung ist die Berechnungsformel der Außenluftfrate im selbst erstellten Berechnungsmodul „Ventilation Calculator“ hinterlegt und mit Input 5 in Type 168 verknüpft. Über dieses Berechnungsmodul lassen sich auch die Anzahl der Mitarbeiter und Besucher des Kundenzentrums einstellen und verändern.

Zusätzlich lässt sich über Input 4 ein kontrollierter Luftwechsel einstellen, welcher nur nach Bedarf hinzugeschaltet wird. Der Lüftungsbedarf lässt sich über Input 3 definieren. Da neben dem CO<sub>2</sub> die Temperatur als Hauptparameter angesehen wird, sollen hierüber eventuell auftretende zu hohe Innenraumtemperaturen gesenkt werden. Nach den Kriterien der Übertemperaturgradstunden ergibt sich ein Lüftungsbedarf ab 26 °C. Ist das Kriterium erfüllt schaltet sich die zusätzliche temperaturgesteuerte Lüftung ein. Insgesamt wird die temperaturgesteuerte Lüftung auf einen 1,5-fachen Luftwechsel beschränkt, um die Anforderungen nach DIN 4108-2:2003-07 einzuhalten (siehe Abschnitt 4.4.1). Um ein Auskühlen des Raumes zu verhindern kann die Lüftung auf einen Temperaturbereich durch konstante Inputwerte begrenzt werden, dieser Bereich lässt sich in Tag und Nacht unterscheiden.

Die resultierende Luftwechselrate wird auf Grundlage aller Inputs berechnet und als Output an Type 56 weiter gegeben. Hier fließen diese Informationen wiederum in die fortlaufenden Berechnungen des Multizonengebäudes ein. Die Auswirkungen der Lüftung auf das Gebäude können grafisch über Type 65 „Plotter“ als Temperaturverlaufskurve deutlich gemacht werden.

Über das Berechnungsmodul „Ventilation Control“ lässt sich die Lüftung an- oder ausschalten.

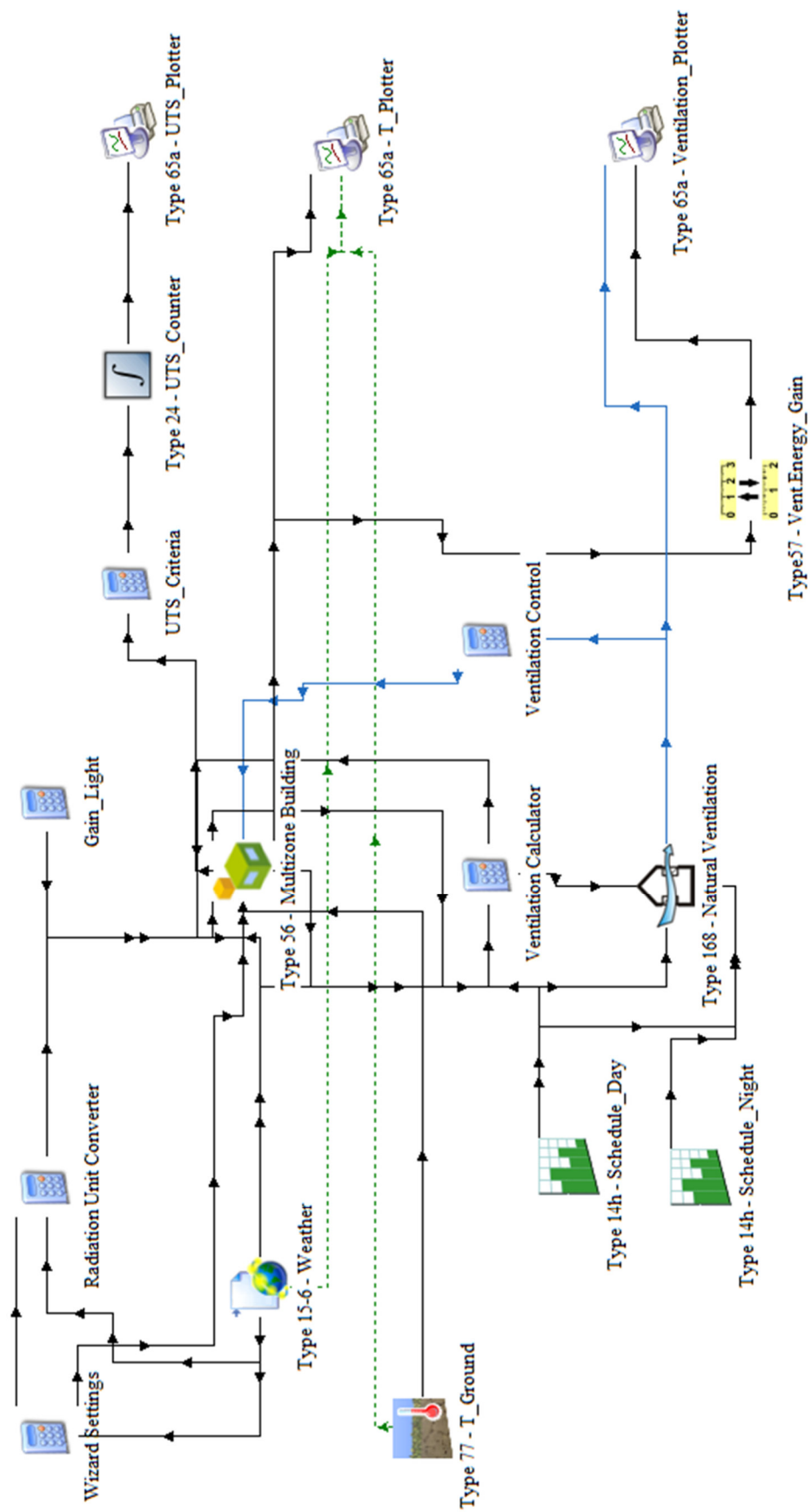


Abbildung 10: Grafische Benutzeroberfläche in TRNSYS Simulation Studio

## 6 Ergebnisse und Auswertung

Nach Einarbeitung aller Werte aus den theoretischen Vorüberlegungen konnten die Simulationsergebnisse ausgegeben und Einflüsse der Einstellungen verglichen, sowie ausgewertet werden. Durch mehrmaliges Durchlaufen der Simulation, mit variierenden Einstellungen, wurden die Ergebnisse auf ihre Plausibilität geprüft.

Bei allen Angaben zur Raumtemperatur handelt es sich um die operative Temperatur.

### 6.1 Sonnenschutz

Zuerst sollte festgestellt werden, ob ein Sonnenschutz zusätzlich zur Lüftung erforderlich ist und welchen Einfluss dieser hat. Da der Sonnenschutz ausschließlich vor äußeren Wärmeeinträgen schützen kann, wurden hierfür die internen Lasten über TRNBuild zunächst ausgeschaltet und die Anzahl der Personen im Raum auf null gesetzt, um einen ersten Eindruck über den Einfluss durch Verschattung zu bekommen. Anschließend wurden die internen Lasten wieder hinzugeschaltet und eine Personenzahl von insgesamt 24, aufgeteilt auf 12 Mitarbeiter und 12 Besucher, eingestellt, um zu untersuchen, ob eine Verschattung bei dann deutlich höheren Raumtemperaturen für einen geringeren Lüftungsbedarf sorgen kann. An allen südlich und südöstlich gerichteten Fenstern wurde ein Sonnenschutz vorgesehen, an den nördlich gerichteten Fenstern wurde wegen der geringen Einstrahlung auf einen Sonnenschutz verzichtet.

Tabelle 5: Einfluss eines äußeren Sonnenschutzes ohne interne Lasten

Lüftung	Verschattung in %	UTS	Tmax in °C	Lmax in 1/h
an	100	0	21,7	1,5
	0	0	23,3	1,5
aus	100	0	24,6	-
	0	1.326	29,6	-

Tabelle 6: Einfluss eines äußeren Sonnenschutzes mit internen Lasten

Lüftung	Verschattung in %	UTS	Tmax in °C	Lmax in 1/h
an	100	0	25,3	1,5
	0	0	26,6	1,5
aus	100	15.456	35,3	-
	0	29.164	40,1	-

Da bei ausgeschalteter Lüftung ohne Sonnenschutz sehr hohe Übertemperaturgradstunden (UTS) auftreten, nach Schließen des Sonnenschutzes diese jedoch wieder entfallen wird deutlich, dass ein Sonnenschutz grundsätzlich vor äußeren Wärme-einträgen schützt (Tabelle 5). Die entstehenden Übertemperaturgradstunden sind allerdings schon mit einer vergleichsweise geringen maximal auftretenden Luftwechselrate (Lmax) von 1,5



pro Stunde kompensiert, wodurch sich annehmen lässt, dass dieser Schutz bei Nutzung der Lüftung kaum relevant ist. Nach weiteren Untersuchungen konnte erst ab einer Luftwechselrate von  $<0,2$  ein Einfluss der Verschattung festgestellt werden.

Daraus folgend wird die Bedeutung der internen Kühllasten auf die Raumtemperatur in Tabelle 6 ersichtlich. Hier ist ein Sonnenschutz alleine nicht mehr ausreichend, um Übertemperaturgradstunden zu vermeiden. Bei ausgeschalteter Lüftung und voller Verschattung entstehen 15.456 Übertemperaturgradstunden durch interne Lasten.

Da jedoch bei eingeschalteter Lüftung ohne Verschattung, zugeschalteten internen Lasten und einer Anzahl von insgesamt 24 Personen im Raum, mit einer maximalen Luftwechselrate von 1,5 keine Übertemperaturgradstunden entstehen, kann ein nur geringer Einfluss eines Sonnenschutzes auf die Raumtemperatur festgestellt werden. Auf Grund dieses Ergebnisses wurde die weitere Simulation ohne Sonnenschutz durchgeführt.

## 6.2 Kohlenstoffdioxid

Tabelle 7: Auswirkungen hoher Besucherzahlen auf die Luftwechselrate

Lüftung	Mitarbeiter	Besucher	UTS	Lmax in 1/h
an	12	50	16	2,5
	12	100	94	4,5

Die Lüftung ist zunächst CO<sub>2</sub>-gesteuert. In Tabelle 7 ist die Lüftungsanpassung an die Personenzahl durch eine Extremwertbetrachtung mit 50 und 100 Besuchern zu sehen. Die Lüftung wird durch eine Luftwechselrate von 2,5 und 4,5 pro Stunde angepasst, wodurch die Funktionalität über die CO<sub>2</sub>-Steuerung bestätigt wird. Ziel war es hierbei eine gute Raumluftqualität sicherzustellen und einen Teil der Wärme bereits abzutransportieren, erst wenn dann noch ein zusätzlicher Kühlbedarf besteht, wird die Lüftung entsprechend erhöht.

Aus der im Vorwege erstellten Kennlinie über die berechnete Luftwechselrate (Abschnitt 4.2, Abbildung 7) lässt sich ablesen, dass bei 24 Personen im Raum ein 0,9 bis 1,0-facher Luftwechsel anzusetzen ist, um das ausgestoßene CO<sub>2</sub> zu kompensieren. Dieser Luftwechsel lässt sich im Luftwechseldiagramm wiederfinden (siehe Anhang 3). Über die Simulation konnte eine genaue Luftwechselrate von 0,9651 pro Stunde berechnet werden.

Ein Ausschnitt des Luftwechseldiagramms (Anhang 3) zeigt die zeitliche Abhängigkeit der Luftwechselrate über die Öffnungszeiten des Kundenzentrums von 09:00 bis 20:00 Uhr. In Abbildung 11 ist dieser Zusammenhang unter Einbindung eines Zeitrafen, in pink dargestellt, verdeutlicht. Hier steht die linke Achse für die personenabhängige Luftwechselrate (rot) pro Stunde und die rechte Achse für die Uhrzeit in Stunden.

Ohne anwesende Personen im Gebäude und ohne überschüssige Wärme schließen sich die Fensteröffnungen nach Ende der Arbeitszeit jahreszeitlich bedingt wieder, um ein Auskühlen des Raumes zu verhindern.

Es konnte somit, über die thermische Simulation, eine gute Raumluftqualität, durch einen ausreichenden Luftwechsel zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Gehalts festgestellt werden.

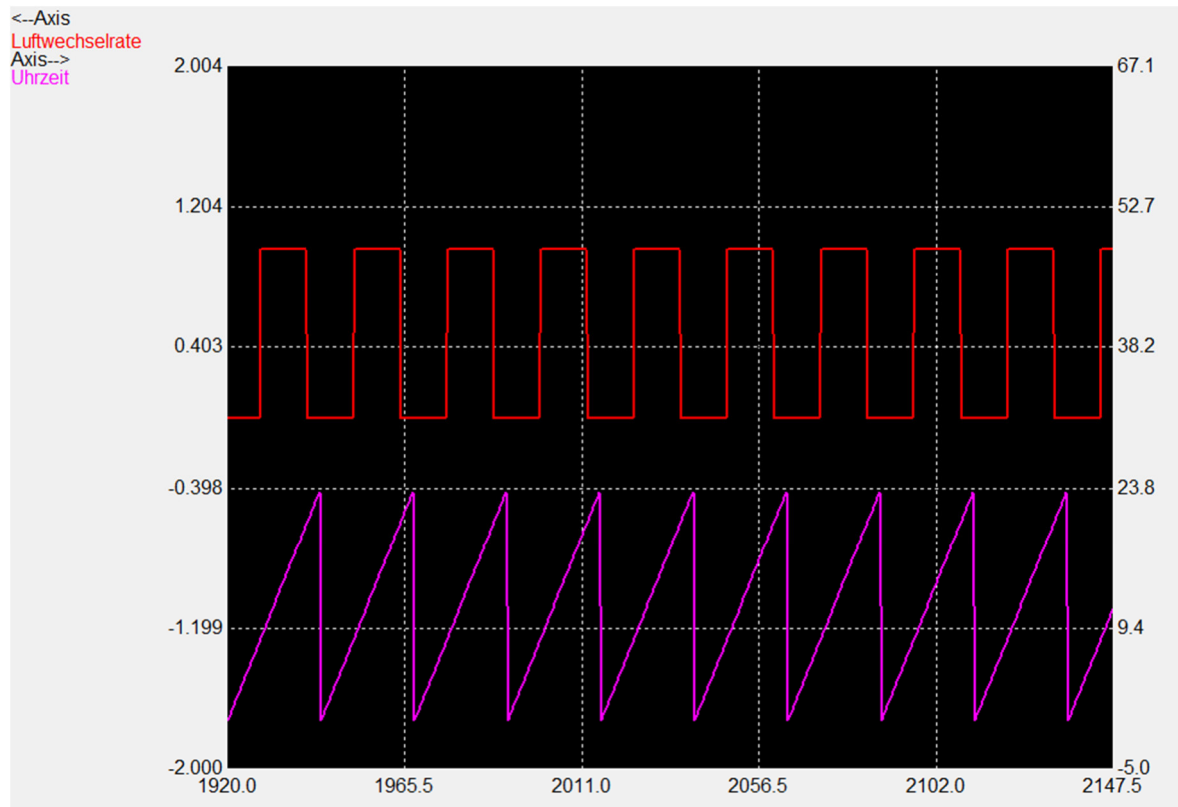


Abbildung 11: Ausschnitt aus dem Luftwechseldiagramm, Anhang 3

## 6.3 Temperatur

In den Anhängen 1 und 2 ist der Temperaturjahresverlauf im Kundenzentrum (Hauptgebäude) bei gleichbleibenden internen Lasten und 24 Personen im Raum (12 Mitarbeiter, 12 Besucher), mit und ohne Lüftung abgebildet. Die Berechnung erfolgte in stündlichen Zeitschritten, mit insgesamt 8760 Stunden für ein volles Jahr. Ebenfalls abgebildet sind die Temperaturverläufe der Außenluft, des Eingangs, des Kellers und des Erdbodens. In Tabelle 8 ist der Temperaturunterschied wertemäßig als Jahresmittelwert ( $T_{\text{mittel}}$ ), Jahresmaximum ( $T_{\text{max}}$ ), Übertemperaturgradstunden (UTS) und maximale Luftwechselrate ( $L_{\text{max}}$ ) dargestellt.

Tabelle 8: Raumtemperaturjahreswerte mit und ohne Lüftung

Lüftung	$T_{\text{mittel}}$ in °C	$T_{\text{max}}$ in °C	UTS	$L_{\text{max}}$ in 1/h
an	15,3	26,6	0	1,5
aus	25,0	40,1	29.164	-

### 6.3.1 Keller

Es lässt sich eine direkte Abhängigkeit der Kellertemperatur zum Erdboden ablesen. Der Keller wird wegen seiner Funktion als Lagerraum nicht belüftet, ist aber als ein an das Kundenzentrum unmittelbar angrenzender Raum zu berücksichtigen. Da die Kellertemperatur annähernd der Bodentemperatur entspricht, konnte kein zusätzlicher Wärmegewinn durch einen isolierenden Effekt des Kellers gegen den Erdboden und ein dadurch höherer Lüftungsbedarf festgestellt werden. Im Zuge einer Heizlastberechnung wäre hier eine mögliche Dämmung der Kellerdecke zu überlegen, um gegebenenfalls die Heizlast zu senken. In diesem Fall wären die Ergebnisse einer Dämmung mit der Simulation des Lüftungssystems abzugleichen.

### 6.3.2 Eingangsbereich

Die Temperaturkurve des Eingangs steigt im Vergleich zum belüfteten Hauptgebäude stark an und erreicht Temperaturen über 40 °C. Wie in der Planzeichnung (Anhang 4) zu sehen, besteht der Eingangsbereich aus zwei hintereinander folgenden Glasschiebetüren, welche in der Simulation nur als permanent geschlossene Fenster dargestellt sind. Hieraus folgt, dass die Wärme sich im Eingang sammelt und keine Möglichkeit hat zu entweichen, was nicht der Realität entspricht. Während des Betriebs würden die Schiebetüren sich jedes Mal öffnen und wieder schließen, wenn eine Person das Kundenzentrum betritt oder wieder verlässt, dadurch ist hier automatisch eine gute Durchlüftung gegeben.

Um den Einfluss des Eingangs auf den Luftwechsel im Hauptgebäude zu prüfen, wurden die beiden Fenster des Eingangs versuchsweise mit einer verdunkelten Sonnenschutzverglasung ersetzt.

Durch die geänderte Verglasung konnten deutlich niedrigere Temperaturen, mit einem Maximalwert von 35,3 °C im Eingangsbereich erreicht werden. Trotz dessen betrug die

maximale Raumtemperatur im Hauptgebäude weiterhin 26,6 °C und die maximale Luftwechselrate verblieb bei einem Wert von 1,5. Da durch den Eingangsbereich kein wesentlicher Einfluss auf die Lüftung des Hauptgebäudes festgestellt werden konnte, werden für den weiteren Verlauf der Simulation die Fenster im Eingangsbereich wieder auf die vom Programm vorgeschlagenen Standardaußenfenster zurückgesetzt. Des Weiteren wird der Temperaturverlauf des Eingangsbereichs für die Berechnung des Lüftungssystems nicht weiter eingebunden.

### 6.3.3 Hauptgebäude (Kundenzentrum)

Es ist ein eindeutiger Unterschied der beiden Temperaturkurven zu sehen. Bei eingeschalteter Lüftung liegt der Kurvenverlauf der Raumtemperatur nur leicht oberhalb des Außenlufttemperaturverlaufs. Ist die Lüftung ausgeschaltet wird die Jahresraumtemperatur insgesamt deutlich angehoben und erreicht eine Maximaltemperatur von rund 40 °C.

Die hohe Zahl von 29.164 Übertemperaturgradstunden aus Tabelle 8 macht die Notwendigkeit einer Lüftung auf Grund der Raumnutzung offensichtlich. Aus der Tabelle geht ebenfalls hervor, dass durch ein geregeltes Lüftungssystem die Jahresmitteltemperatur im Raum um ca. 10 K gesenkt werden kann. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die eingestellte Lüftung mit einem maximalen Luftwechsel von 1,5, den zu Beginn definierten Anforderungen entspricht und mit den eingestellten Werten keine Übertemperaturgradstunden auftreten.

Schon in der Gesamtdarstellung (Anhang 2) lässt sich der Tagestemperaturverlauf gut erkennen. In Abbildung 12 ist dieser noch einmal im Detail zu sehen. Es wird mit der linken Achse die operative Raumtemperatur im Hauptgebäude (blau) in °C dargestellt und mit der rechten Achse die Uhrzeit (pink) in Stunden. Hier zeichnet sich der erst starke Temperaturanstieg am Morgen ab, ausgelöst durch das Beginnen der Arbeitszeit. Mit Beginn der Arbeitszeit sind 24 Personen im Kundenzentrum anwesend und alle personenabhängigen und -unabhängigen elektronischen Geräte eingeschaltet. Daraufhin reagiert das Lüftungssystem und die Temperatur fällt kurz ab. Ebenso zu sehen, ist das Ende der Arbeitszeit um 20:00 Uhr mit einem deutlichen Temperaturabfall dadurch bedingt, dass die internen Lasten ausgeschaltet sind.

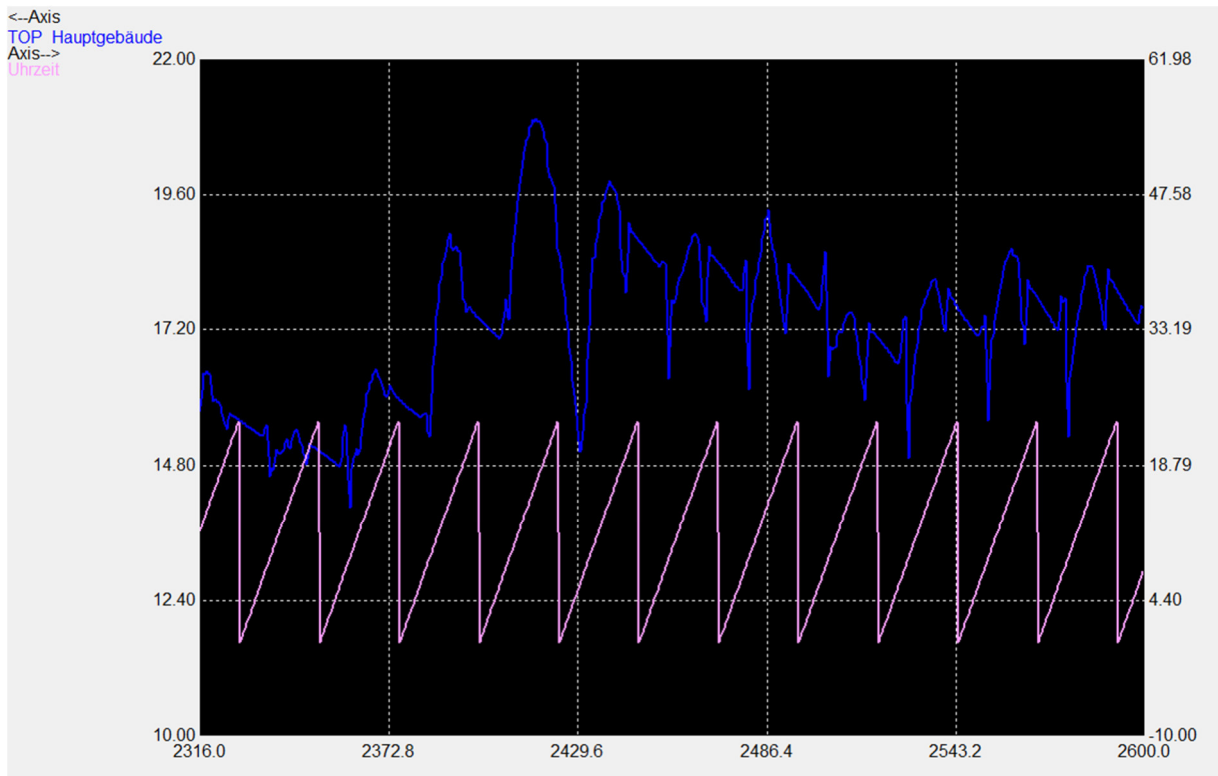


Abbildung 12: Ausschnitt der Temperaturverlaufskurve, Anhang 2 Hauptgebäude

## 7 Diskussion

Nach Erfassung und Auswertung aller Simulationsergebnisse konnte im Rahmen einer kritischen Auseinandersetzung die Plausibilität der Befunde festgestellt werden.

Zu den Ergebnissen eines möglichen Sonnenschutzes (Abschnitt 6.1) ist zu beachten, dass bei den hier dargestellten Untersuchungen erstmal von einer vollkommenen Verschattung mit 100 % ausgegangen wurde. In der Praxis würde das bedeuten, dass über die Fenster mit Sonnenschutz, neben der Wärme, auch keinerlei Helligkeit mehr in den Raum gelangen würde und damit für den Anwendungsfall nicht geeignet ist. Für einen ausreichenden Lichteinfall wäre beispielsweise eine Verschattung um 50 % oder weniger sinnvoll, vorausgesetzt die dann im Raum befindliche überschüssige Wärme kann über die Lüftung genügend abgeführt werden. Wegen des schon bei 100 %iger Verschattung geringen Einflusses, ist der Verzicht eines äußeren Sonnenschutzes sinnvoll. Im weiteren Planungsverlauf kann über einen inneren Sonnenschutz entschieden werden. Dieser würde dafür sorgen, dass die Raumnutzer nicht geblendet werden und wäre nicht automatisch gesteuert, was einen deutlich geringeren Montageaufwand erfordern würde. Da die Anzahl der Übertemperaturgradstunden bei einer größeren Personenzahl ohne Sonnenschutz noch immer weit unter dem Anforderungswert bleibt (siehe Tabelle 7), ist die Annahme, dass kein äußerer Sonnenschutz notwendig ist erneut bestätigt. Man kann davon ausgehen, dass sich keine 50 Besucher gleichzeitig im Kundenzentrum aufhalten werden, somit wird in der Regel keine Luftwechselrate von 2,5 und höher erreicht.

Im Hinblick auf die Ergebnisse zur CO<sub>2</sub>-gesteuerten Lüftung (Abschnitt 6.2), kann aus Tabelle 7 geschlossen werden, dass auch bei einer großen Besucherzahl eine gute Raumluftqualität erreicht werden kann. Für eine deutlich realistischere Besucherzahl von 12 Personen ist sogar nur ein einfacher Luftwechsel notwendig. Grundsätzlich ist aber bei der Gebäudesimulation zu beachten, dass sich vor jedem Simulationsdurchlauf nur ein konstanter Wert für die Personenanzahl der CO<sub>2</sub>-gesteuerten Lüftung einstellen lässt. Das würde bedeuten, dass sich den gesamten Arbeitstag über die gleiche Anzahl an Mitarbeitern und Besuchern im Kundenzentrum aufhalten würde. Für die Mitarbeiter könnte man, auch bei eventueller Schicht- oder Gleitzeitarbeit, von einer Mindestanzahl ausgehen, mit denen das Kundenzentrum immer besetzt sein muss. Für die Besucherzahlen gibt es keine feste Regelung, hier sind lediglich Annahmen aus Erfahrungswerten über zu erwartende Stoßzeiten möglich. Aus dieser Überlegung folgt, dass nicht von einer konstanten Luftwechselrate von rund 1,0 pro Stunde, wie in Anhang 3 abgebildet, auszugehen ist. Sind 12 Mitarbeiter im Raum, aber keine Besucher, reduziert sich die nötige Luftwechselrate auf ca. 0,5 pro Stunde (siehe Abschnitt 4.2, Abbildung 7), dementsprechend müsste sich der Kurvenverlauf der Luftwechselrate theoretisch verändern. Dass die CO<sub>2</sub>-Steuerung aber grundsätzlich funktioniert hat sich in den Resultaten gezeigt.

Unter anderem war das Ziel dieser thermischen Gebäudesimulation zu prüfen, ob eine ausreichende Belüftung des Kundenzentrums für ein angenehmes Raumklima, über ein freies Lüftungssystem möglich ist. In den Ergebnissen aus Abschnitt 6.3 stellte sich heraus, dass die Lüftung unabhängig von den Temperaturen des Kellers und des Eingangs funktioniert und eine angenehme Raumtemperatur ohne die Entstehung von Übertemperaturgradstunden erreicht werden kann. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die freie Lüftung über Fensteröffnungen sowohl insgesamt ausreichend, als auch genügend konstant für die geforderte Belüftung ist. Somit ist keine zusätzliche ventilatorgestützte Lüftung notwendig und es müssen keine baulichen Maßnahmen zur Verbesserung des Lüftungskonzepts durchgeführt werden. Es fällt jedoch auf, dass die Raumtemperatur zeitweise in einen Bereich deutlich unter 20 °C fällt (siehe Anhang 2), weshalb, zum Erhalt der Behaglichkeit, eine Raumheizung erforderlich ist.

Allgemein ist bei der Simulation einer freien Lüftung über Type 168 (siehe Abschnitt 5.2) anzumerken, dass sich lediglich die Größe der Fensterflächen und der Abstand der Flächenmittelpunkte einstellen lassen, aber nicht an welchen Außenwänden sich die Fensterflächen befinden. Aus dem Abstand und der Größe der Fläche wird dann die Luftströmung ermittelt. Bei gleich großen Fensterflächen auf gleicher Höhe wird die Fläche als mittig geteilt angenommen, sodass sich zwei übereinander angeordnete Fensterflächen ergeben.

Aus den Ergebnissen der Luftwechselrate lässt sich demnach ableiten, dass die Fensterfläche insgesamt für die Belüftung ausreicht, darüber ob hier eine Querlüftung eventuell einen besseren Lüftungseffekt als eine einseitige Belüftung aufweisen würde kann jedoch keine Aussage getroffen werden.

Durch die Raumlufatabfuhr über Fensteröffnungen wird neben Schad- und Geruchsstoffen Wärme mit abgeführt. Im Falle einer Lüftung zum sommerlichen Wärmeschutz ist dieser Effekt gewollt. Im Winter sorgt das allerdings zu Wärmeverlusten, welche durch die entsprechende Heizlast wieder ausgeglichen werden müssen. In Anhang 3 ist der Zusammenhang zwischen der Lüftung und der abgeführten Wärme gut nachvollziehbar. Überschüssige Wärme wird als Wärmegewinn in kW abgebildet. Im Zusammenhang mit der zugeschalteten Lüftung entsteht ein negativer Wärmegewinn, sprich Wärmeverlust. Für eine übliche Heizperiode von Oktober bis einschließlich April ergibt sich aus der thermischen Simulation ein Wärmeverlust von rund 10.000 kWh. Da es sich hier um eine freie Lüftung über Fenster handelt, gibt es keine Möglichkeit die abgeführte Wärme zurückzugewinnen. Eine mögliche Alternative zur Lüftung wäre die Kühlung im Sommer über eine Kühlanlage. Aus den Berechnungen der Simulation lässt sich ermitteln, dass im Sommer, zwischen Mai und September, rund 13.000 kWh Wärme aus dem Kundenzentrum abgeführt werden. Die dementsprechende Arbeit müsste also auch eine Kühlanlage erbringen.

Zur Beurteilung welches System geeigneter ist gilt zu berücksichtigen, dass die Kühlanlage während des Betriebs Energie verbraucht. Zusätzlich entsteht bereits in der Herstellung der Anlage graue Energie. Neben der energetischen Auseinandersetzung ist im Sinne der Nachhaltigkeit auch auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz zu achten. Dieser Aspekt bezieht sich vor allem auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung und Verwendung unterschiedlicher Energieträger zum Betrieb einer Heizungs- oder Kühlanlage.

## 8 Fazit

Für diese Arbeit sollte ein Kundenzentrum simuliert werden, um ein energiesparendes Lüftungskonzept mit besonderer Berücksichtigung des Raumklimas zu entwickeln. Im Hinblick dessen, konnte ein insgesamt positives Endergebnis erzielt werden.

Durch ein in erster Linie CO<sub>2</sub>-gesteuertes Lüftungskonzept über Fensteröffnungen wird eine gute Raumluftqualität im Kundenzentrum sichergestellt. Neben der Abfuhr von CO<sub>2</sub> kann man davon ausgehen, dass ebenfalls eine ausreichende Abfuhr von Feuchtigkeit, sowie Schad- und Geruchsstoffen erfolgt. Durch eine zusätzliche Temperaturregelung der Lüftung konnte ebenfalls die thermische Behaglichkeit der Raumnutzer berücksichtigt und eine angenehme Raumtemperatur ohne die Entstehung von Übertemperaturgradstunden erreicht werden. Gerade durch die besondere Raumnutzung, des hier simulierten Gebäudes, mit hohen internen Lasten, war dieser Aspekt zur Konzepterstellung wichtig.

Dadurch, dass die Belüftung ausschließlich über Fensteröffnungen funktioniert, ist die Forderung nach einem möglichst energiesparenden Lüftungskonzept erfüllt. Ebenfalls sind keine besonderen Einbauten für die Umsetzung notwendig. Als technische Hilfsmittel sind lediglich Messgeräte für die CO<sub>2</sub>-Konzentration und Temperatur erforderlich.

Für die Entscheidung, ob das Lüftungssystem so angewendet wird, wie es hier konzipiert wurde müssen noch weitere Fragen geklärt werden. Da eines der Ergebnisse war, dass bei einer auch im Winter notwendigen Belüftung ein zusätzliches Heizsystem benötigt wird, um die thermische Behaglichkeit zu erhalten, muss dieses in einem energetischen Vergleich mit berücksichtigt werden.

Insgesamt könnten noch einige interessante Aspekte in der Simulation eingebunden werden, um noch detailliertere Ergebnisse zu erzielen. Beispielsweise wurde die Beleuchtung im Kundenzentrum über die gesamte Raumfläche angenommen, durch einfallendes Sonnenlicht ist diese aber nicht immer im ganzen Raum erforderlich. In TRNSYS 18 kann hierfür mit der „Dynamic Daylight Simulation“, der dynamischen Tageslichtsimulation, über das Multizonengebäude gearbeitet werden. Dennoch konnte hier schon eine sehr gute Aussage über die Frage nach einem energetisch sinnvollen Lüftungskonzept getroffen werden. Weitere Entscheidungen zum Lüftungskonzept unterliegen der Detailplanung und können auf Grund des Arbeitsumfangs hier nicht weiter ausgeführt werden.



## Literaturverzeichnis

- BAuA, 2019. *Das Raumklima und seine Parameter*. [Online]  
Available at: <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physikalische-Faktoren-und-Arbeitsumgebung/Klima-am-Arbeitsplatz/Faktoren.html>  
[Zugriff am 23. 04 2019].
- Bischof, D. W., Dompke, D.-I. M. & Schmid, D.-I. W., 1993. *Sick Building Syndrome*.  
1. Auflage Hrsg. Karlsruhe: C.F. Müller GmbH.
- BMI, 2019. *Leitfaden Nachhaltiges Bauen - Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden*, Berlin: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat.
- Bogusch, D.-I. N. & Duzia, D.-I. T., 2012. *Basiswissen Bauphysik - Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes*. s.l.:Fraunhofer IRB Verlag.
- Bohne, D., 2019. *Technischer Ausbau von Gebäuden - und nachhaltige Gebäudetechnik*.  
11. Auflage Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Boos, D.-I.D. R. et al., 2018. *Bewertung der Innenraumluft - Physikalische Faktoren, Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter*. [Online]  
Available at: [http://www.komfortlueftung.at/fileadmin/komfortlueftung/EFH/co2\\_01.pdf](http://www.komfortlueftung.at/fileadmin/komfortlueftung/EFH/co2_01.pdf)  
[Zugriff am 13. Juni 2019].
- Czichos, J., 2019. *Nur bei Frauen steigt die Denkleistung mit der Raumtemperatur*. [Online]  
Available at: [https://www.wissenschaft-aktuell.de/artikel/Nur\\_bei\\_Frauen\\_steigt\\_die\\_Denkleistung\\_mit\\_der\\_Raumtemperatur1771015590700.html](https://www.wissenschaft-aktuell.de/artikel/Nur_bei_Frauen_steigt_die_Denkleistung_mit_der_Raumtemperatur1771015590700.html)  
[Zugriff am 15. Juli 2019].
- Ecofys Germany GmbH, 2011. *Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung*, Köln: Umweltbundesamt.
- Heinz, E., 2011. *Wohnungslüftung - frei und ventilatorgestützt*. 2. Auflage Hrsg. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Hellwig, R. et al., 2012. *Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen*. Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Imbery, F. et al., 2019. *Neuer Rekord der mittleren Junitemperatur für Deutschland und intensive Hitzewelle in Europa*, Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- Kern, A., 2014. *Thermische Gebäudesimulation nach DIN 4108-2:2012 zum Nachweis des Sommerlichen Wärmeschutzes*. [Online]  
Available at: [https://www.bauphysik-software.de/download/TermSim\\_Nutzen.pdf](https://www.bauphysik-software.de/download/TermSim_Nutzen.pdf) /  
<https://www.bauphysik-software.de/de-de/produkte/moduluebersicht/thermische-simulation-e-modul2.html>  
[Zugriff am 24. Juni 2019].

Lahrz, T., Bischof, D. W. & Sagunski, D. H., 2008. *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft*, s.l.: Springer Medizin Verlag.

O.Ö. Energiesparverband, 2016. *Checklistefür den Einkauf von energieeffizienten Bürogeräten*. [Online]

Available at:

[https://www.energiesparverband.at/fileadmin/redakteure/ESV/Info\\_und\\_Service/Publikationen/Checkliste\\_Buerogeraete.pdf](https://www.energiesparverband.at/fileadmin/redakteure/ESV/Info_und_Service/Publikationen/Checkliste_Buerogeraete.pdf)

[Zugriff am 26. Juni 2019].

Recknagel, D.-I. H., 2018. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik Band 1*.

79. Auflage Hrsg. Augsburg: InnoTech Medien GmbH.

Richter, P. D.-I. h. W., 2007. *Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Sommerlicher Kühlbetrieb -*, Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Stromverbrauchinfo, 2019. *Tipps und Informationen zum Stromverbrauch*. [Online]

Available at: [www.stromverbrauchinfo.de](http://www.stromverbrauchinfo.de)

[Zugriff am 26. Juni 2019].

The Board of Regents of the University of Wisconsin System, 2017. *A TRaNsient SYstems Simulation Program*. [Online]

Available at: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>

[Zugriff am 10. Juni 2019]

UBA, 2011. *Kühl durch den Sommer - auch ohne Klimaanlage (Pressemitteilung)*. [Online]

Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/kuehl-durch-den-sommer-auch-ohne-klimaanlage>

VfW, 2018. *Lüftungsarten*, Bundesverband für Wohnungslüftung e.V.. [Online]

Available at: <http://wohnungslueftung-ev.de/lueften/lueftungsarten/>

[Zugriff am 21. Juli 2019].

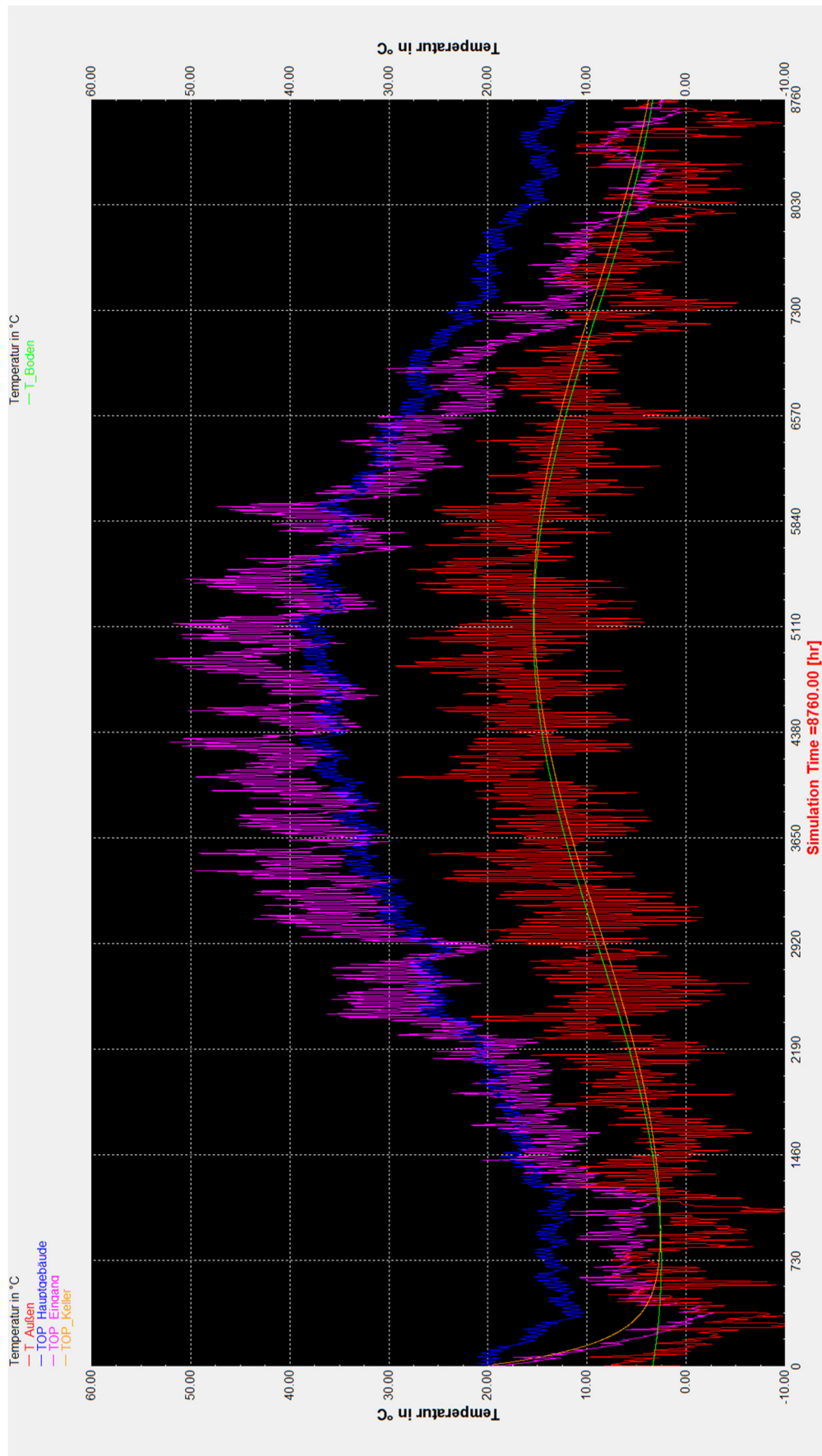
Wagner, H.-F., 2017. *Strahlungsenergie der Sonne*. [Online]

Available at: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/solarenergie/sonnenenergie/>

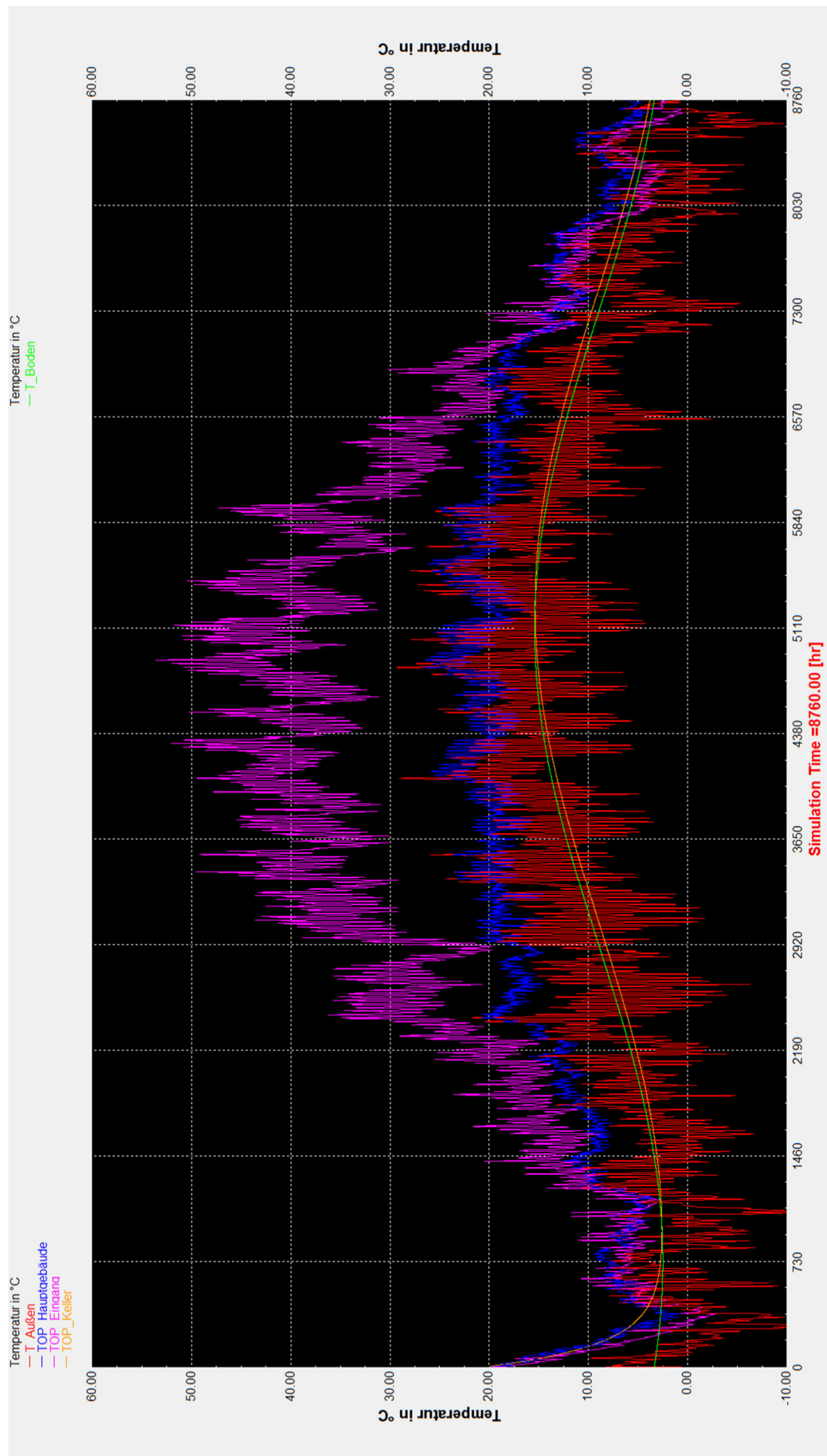
[Zugriff am 17. Juli 2019].

# Anhang

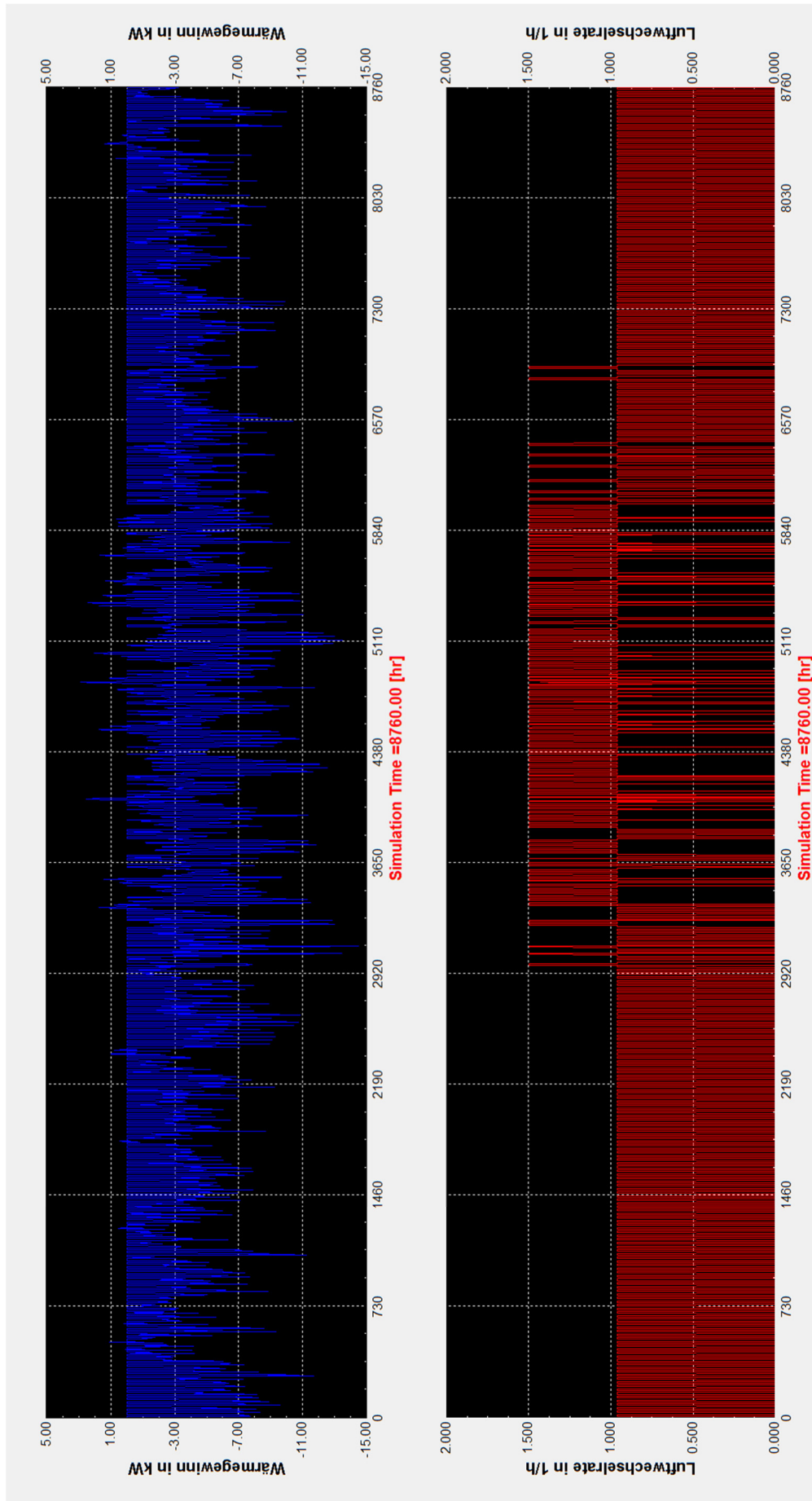
## Anhang 1: Temperaturjahresverlauf ohne Lüftung



## Anhang 2: Temperaturjahresverlauf mit Lüftung

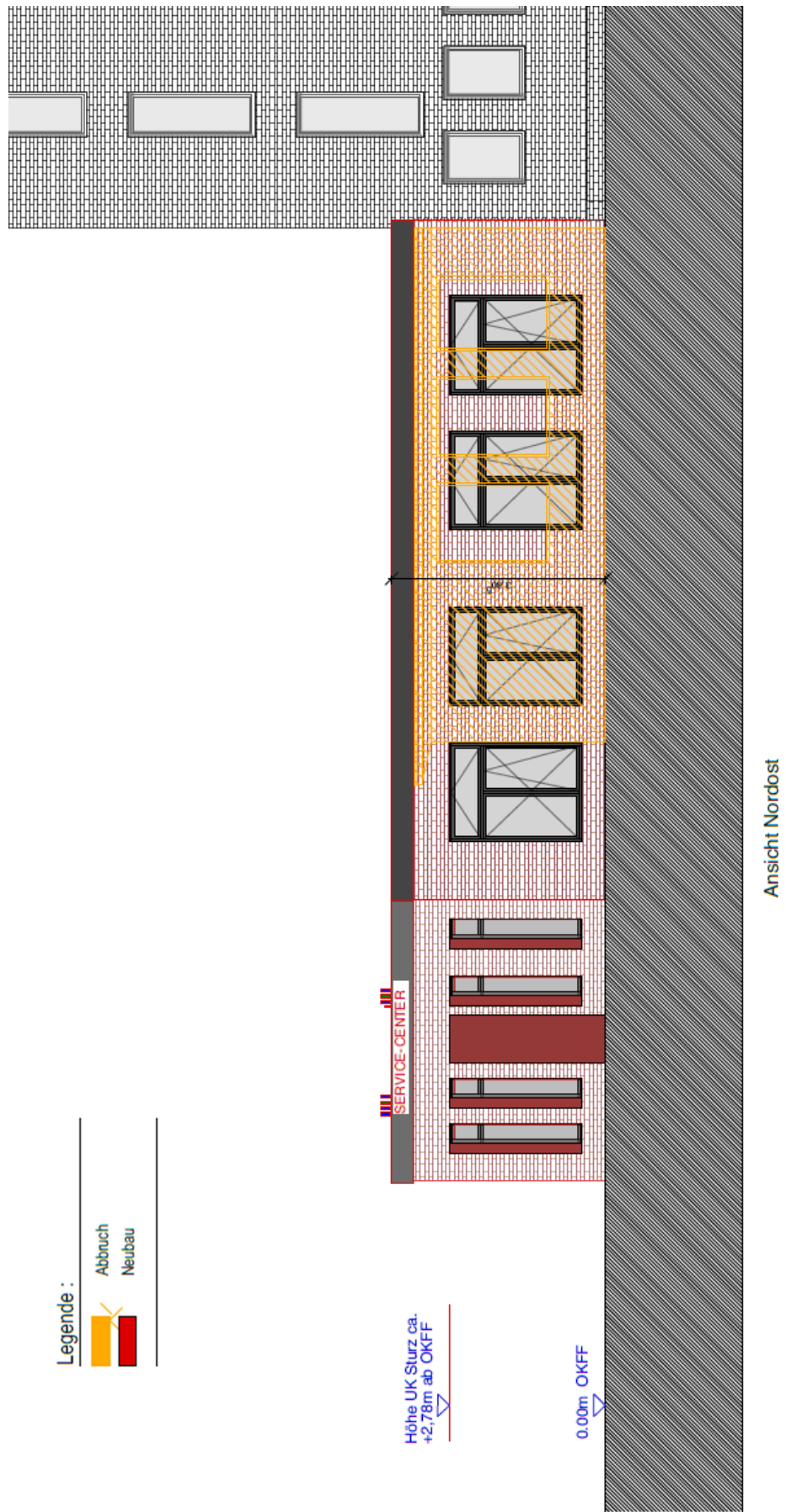


### Anhang 3: Zusammenhang zwischen Luftwechselrate und Wärmegewinn





# Anhang 5: Planzeichnung – Seitenansicht



## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Simulation eines Kundenzentrums zur Entwicklung eines energiesparenden Lüftungskonzepts mit besonderer Berücksichtigung des Raumklimas“ eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ich bin mit der Veröffentlichung meiner Bachelorarbeit einverstanden.

Hamburg      25.07.2019

Ort

Datum

Unterschrift