

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Zurück in die Zukunft – Verzicht auf Technik

**Ein Beitrag zur Entwicklung eines funktionierenden Gebäudes ohne Heizung durch konzeptionelle
Planung mit Hilfe transienter Gebäudesimulation**

Bachelorarbeit

Im Studiengang Umwelttechnik

Vorgelegt von

Pia Laima Verselis

2105580

Hamburg

Am 17.08.2016

1. Gutachter: Prof. Dr. Armin Gregorzewski (HAW Hamburg)

2. Gutachter: Dipl.-Ing. Bernd Schwarzfeld (BZE Ökoplan)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma BZE Ökoplan

**When the last tree has been cut down
the last fish caught
the last river poisoned
Then will you find that money cannot be eaten**

Weissagung der Cree

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1. Geschichte der Gebäudetechnik	5
1.1.1. Wie der Mensch anfang zu bauen.....	5
1.1.2. Einzug der Gebäudetechnik	7
1.2. Intention der Bachelorarbeit	8
1.2.1. Studie zur Entwicklung eines Gebäudes ohne Heizung.....	8
1.2.2. Begriffsklärung	9
2. Entwicklung eines Schulgebäudes ohne Heizung.....	10
2.1. Methodik und Darstellung	10
2.1.1. Simulation mit TrnSYS	10
2.1.2. Auswertung von Simulationsergebnissen	10
2.2. Wie funktionieren Gebäude?.....	11
2.2.1. Vorstellung des Projektes.....	11
2.2.2. Interaktion mit internen Lasten	12
2.2.3. Interaktion mit der Umwelt	15
2.2.4. Wie sich die Temperatur in einem Raum entwickelt	16
2.2.5. Wann ein Raum als behaglich empfunden wird	16
2.3. Entwicklung des Projekts	19
2.3.1. Die Gebäudehülle.....	19

2.3.2.	die internen Lasten	21
2.3.3.	Die Gebäudelüftung	23
2.3.4.	Die Heizlast.....	26
2.3.5.	Ausrichtung	29
2.3.6.	Fenster	31
2.3.7.	Behaglichkeit im Gebäude	36
2.3.8.	Standort	38
2.4.	Weiterentwicklung des Gebäudes	41
2.4.1.	Vorstellung der neuen Kubatur.....	41
2.4.2.	Anpassung der Lüftung	44
2.4.3.	Berechnung der verbleibenden Heizlast	47
2.4.4.	Behaglichkeit im Gebäude	47
3.	Fazit.....	53
4.	Zusammenfassung	54
5.	Literaturverzeichnis	55
6.	Abbildungsverzeichnis	56

1. Einleitung

1.1. Geschichte der Gebäudetechnik

1.1.1. Wie der Mensch anfang zu bauen

Bei dem Versuch, sich das erste dauerhafte Gebäude der Menschheit vorzustellen, ist wahrscheinlich jeder dazu geneigt, vor dem geistigen Auge eine windschiefe Hütte aus Ästen, Blättern, Lehm und sonstigen Fundsachen zu sehen. Im Hintergrund trottet gemütlich ein Mammut vorbei und neben dem Bauwerk steht ein Exemplar der Gattung Homo sapiens. Etwas beharter, als man ihn heutzutage erwarten würde und auch nicht so eloquent, aber in höchstem Maße erfreut seine Keule schwingend, da er sich gerade ein sicheres Dach und vier Wände gebaut hat.

Die Vorstellung ist nicht unrealistisch. Tatsächlich weisen Funde darauf hin, dass der Mensch sesshaft wurde, als er vor 1,7 Mio. Jahren lernte, das Feuer zu beherrschen. Die Macht über diese Energiequelle und das Ende der letzten Eiszeit verliehen ihm die Möglichkeit, von seinem Ursprungsort Afrika in kältere Klimazonen zu wandern (Henke, 1999). In Nizza wurden 1966 die ältesten nachweisbaren Spuren (400.000 v.Chr.) selbstgebauter Behausungen gefunden. Es handelte sich um ovale Hütten mit einer Fläche von 6x12 Metern, die einen First hatten, der auf Astgabeln lagerte. Die Wände bestanden aus senkrecht im Erdreich steckenden Ästen, die durch Steine gesichert wurden. In der Mitte des Raumes gab es eine Feuerstelle. Ein Loch im Dach darüber diente als Rauchabzug. Diese Hütten wurden vermutlich von bis zu 20 Personen als Schlafstätte genutzt. (Willig, 08.09.2010) Die ersten Wohnstätten waren also nicht gerade Einfamilienhäuser.

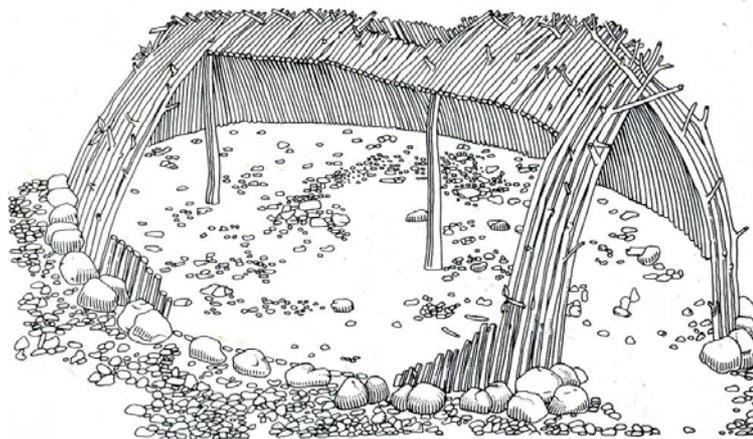


Abbildung 1 Terra amata: ca. 400000 v.Chr., Rekonstruktionszeichnung (Willig, 08.09.2010)

Mit dem Eintritt der Neolithischen Revolution, dem Beginn von Ackerbau und Viehzucht, entwickelte der Mensch erstmals eine produzierende Wirtschaft und es bestand nicht nur die Notwendigkeit, stabilen, langfristigen Wohnraum zu schaffen, sondern auch Lagerstätten und Ställe, sowie Gemeinschaftsbauten und Grabstätten. Dabei wurde auf die Ressourcen zurückgegriffen, die die Natur zu bieten hatte. Im vorderen Orient, also im heutigen Syrien, dem Libanon, in Jordanien, Israel

und Palästina wurden die ersten Bauten vorwiegend mit Lehm erarbeitet und sogar Lehmziegel hergestellt. Gebrannter Kalk diente als Mörtel. In Europa wurde vor allem mit Holz und Stein gebaut. Eine Besonderheit waren Siedlungen an Gewässern. Sogenannte Pfahlbauten standen auf Holzpfählen und schützten vor Wildtieren und nassen Füßen. (Partsch, 1999)

Nicht nur die Baumaterialien, sondern auch die Bauform revolutionierte sich im Laufe der Menschheitsgeschichte. Das Rundhaus gilt als die älteste Form des Hauses und existiert bis heute, vermutlich entstand die Form durch den Kreis um die Feuerstelle. Die zweite Bauform ist das Rechteckhaus. Mit ihm entstanden ganz neue Möglichkeiten. Die Materialwahl wurde freier und Räume konnten beliebig angebaut, abgetrennt oder kombiniert werden. Das Rechteckhaus setzte sich auf Grund seiner vielen Vorteile durch und es entstanden Bauernhäuser, die unterschiedliche Nutzungszonen wie Stall, Lager und Wohnraum aufwiesen. Im Wesentlichen wurde nun viele tausend Jahre in dieser Art gebaut. Eine nachhaltige Veränderung beim Bauen setzte ein, als die Phönizier entdeckten, dass Kalkmörtel vermischt mit vulkanischem Gestein sogar unter Wasser aushärtet. Die Römer übernahmen diese Technik 300 v. Chr., erforschten und verfeinerten sie und der „opus caementitium“, der römische Beton, war geboren. Das gab den Startschuss für einen Bauboom in ganz Europa und im ersten Jahrhundert nach Christus tobten sich Generationen von Baumeistern aus. Es entstanden Bauwerke mit monumentalem Charakter. Mit Stahl versetzt ist der sogenannte Stahlbeton heute der wichtigste Baustoff Deutschlands. (InformationsZentrum Beton GmbH, 2016) Durch zunehmende Kenntnisse über Statik und Materialien sind der Phantasie beim Bauen fast keine Grenzen mehr gesetzt.



Abbildung 2 Kolosseum, Rom, 80 n.Chr.

(Photo by DAVID ILIFF. License: CC-BY-SA 3.0)



Abbildung 3 Heydar Aliyev center, baku, 2014 (Hepper, 2015)

Obwohl moderne Gebäude gar nicht mehr an jungsteinzeitliche Ast-Hütten erinnern, haben Sie doch etwas ganz Wesentliches gemeinsam: Sie bieten den Nutzen Sicherheit und Schutz vor äußeren Einflüssen.

1.1.2. Einzug der Gebäudetechnik

Mit der Erfüllung des Grundbedürfnisses nach Sicherheit gelangen untergeordnete Bedürfnisse zutage. Der bewohnte Raum soll auch behaglich sein. Der Mensch möchte sich wohl fühlen und sich geistig entfalten können. Doch die geistige Entfaltung fällt schwer, sitzt man inmitten einer Wolke aus Qualm. Mit offenen Feuerstellen geht natürlicherweise eine Rauchentwicklung einher und die Brandgefahr ist bei dieser Bauweise nicht unerheblich. Aber nicht nur der Rauchabzug gab Anlass dazu, Lüftungstechniken zu entwickeln. Mit dem zunehmenden Bau geschlossener Räume wurde es notwendig, die Frischluftzufuhr zu sichern. Die ersten bewusst geplanten und ausgeführten Lüftungssysteme dienten dazu, Luft gezielt einem Raum zuzuführen und diese auch wieder gezielt abzuführen. Die ersten nachweisbaren Beispiele für ein intelligent geplantes System lieferten die Chinesen ca. 300 v.Chr. Es wurden Rauchgaskanäle in Wänden und Fußböden installiert, es handelte sich also bereits um ein kombiniertes Heiz- und Lüftungssystem. Etwas später entwickelten die Römer das Hypokaustum, eine Warmluftheizung. Dabei wurde ein Hohlraum unterhalb des Fußbodens beheizt um die Räume darüber warm zu halten. Diese Technik war ein Rückschritt, denn sie war sehr aufwendig im Bau, sowie materialintensiv.

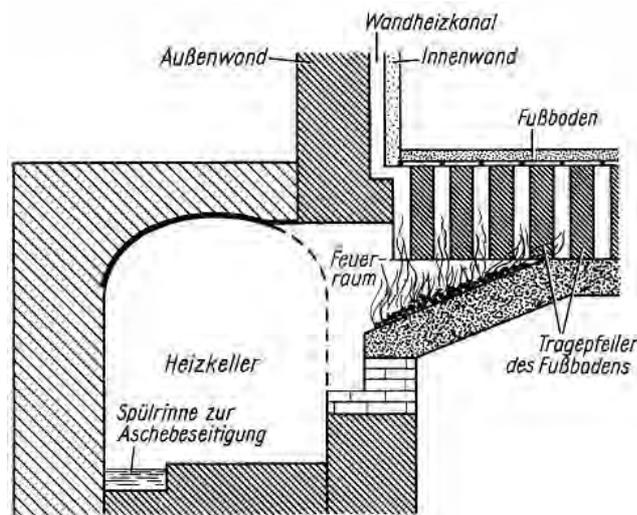


Abbildung 4 Rekonstruktion eines römischen Hypokausten (Hottgenroth)

Die Technik des Heizens und Lüftens wurde unverzichtbar. Im 17. Jhd. wurden Kristallglasfenster erfunden und die Fensterlüftung bot eine neue Möglichkeit des Lüftens. Die Fensterlüftung war aber oft nicht ausreichend, da es auch fensterlose Räume wie innenliegende Bäder gab. Die Erfindung und Weiterentwicklung des Ventilators löste dieses Problem. Jedoch wurde im folgenden Jahrhundert auf Kosten einer guten Lüftung billig gebaut und die Heiztechnik wurde immer komfortabler, da Energie in Form von Öl, Kohle oder Gas in unerschöpflicher Menge zur Verfügung zu stehen schien. Während der Energiekrise in den 1970er Jahren änderte sich diese Sichtweise. Wärme war plötzlich kostbar, es wurde in nachhaltige Technik investiert und 1976 regelte erstmals das Energieeinsparungsgesetz

(EnEG), dass in Gebäuden Vorkehrungen zur Energieeinsparung getroffen werden müssen. Ein Jahr später wurde die Wärmeschutzverordnung erlassen, der Vorläufer der heutigen Energieeinsparverordnung (EnEV). (Laible, 2012)

1.2. Intention der Bachelorarbeit

1.2.1. Studie zur Entwicklung eines Gebäudes ohne Heizung

Heutzutage kann ohne moderne Technik kein Bauvorhaben mehr gedacht werden. Die Frage, ob immer mehr Technik überhaupt notwendig ist, um ein funktionierendes Gebäude zu schaffen, gab den Anstoß zu dieser Arbeit. Ein Bauvorhaben, das auf einem realen Projekt des Ingenieurbüros BZE Ökoplan beruht, bildet die Grundlage für die Untersuchungen. Es soll betrachtet werden, wie sich das Gebäude verhält, keine Heizung vorhanden ist. Es werden unterschiedliche Varianten des Gebäudes mit TRNSYS simuliert und die Reaktion auf natürliche Phänomene der Umgebung betrachtet. Nach und nach soll Erkenntnis erlangt werden, welches die sensiblen Reaktionspunkte, die „Stellschrauben“ des Gebäudes sind.

Das Ziel der Arbeit ist es, eine unkonventionelle Denkweise in der Gebäudeplanung zu präsentieren. Das Ergebnis soll die Dokumentation der Planungsschritte sein, nicht etwa die Präsentation eines Prototyps, der unabhängig von Standort und Nutzung seinen Zweck erfüllt und somit einem Wunderwerk gleichen würde.

Am Ende soll die Frage beantwortet werden, ob die gewonnenen Erkenntnisse einen ganzheitlichen Ansatz unterstützen können und überdimensionierte Technikinstallationen vermieden werden können.

1.2.2. Begriffsklärung

Im Titel der Arbeit finden sich zwei entscheidende Schlagworte wieder, welche genau definiert werden müssen. Die Ausdrücke „**funktionsierendes Gebäude**“ und „**ohne Heizung**“ rufen ohne weitere Erläuterung unterschiedlichste Assoziationen und Bilder hervor. Deshalb soll an dieser Stelle interveniert werden. Der Fokus der Arbeit wird damit gesetzt und Missverständnisse, Fehlinterpretationen und Unklarheiten beim Lesen sollen vermieden werden.

Ein Gebäude „funktioniert“ von ganz alleine. Es braucht dazu keine Hilfe. Es „funktioniert nicht“ sobald von außen festgelegte Funktionskriterien nicht erfüllt sind. Beispielsweise kann eine Person die Raumtemperatur als absolut behaglich empfinden, während ein anderes Kriterium (z.B. die Luftqualität) den Aufenthalt unerträglich macht. In Kapitel 2.2 *Wie funktionieren Gebäude* werden die Kriterien erläutert.

Um den Ausdruck „ohne Heizung“ zu definieren, muss erst die Frage beantwortet werden, was „Heizen“ eigentlich bedeutet und ob es ein Gebäude ohne Heizung überhaupt geben kann. Aus Sicht eines Heizungsanlagen-Planers bedeutet „Heizen“, die Temperatur in einem Aufenthaltsraum des Menschen auf einen gewünschten Wert anzuheben, meist geschieht das durch einen Heizkörper im zu beheizenden Raum. (Recknagel, Sprenger, & Schamek, 09/10) Aus Sicht eines Thermodynamik-Verständigen bedeutet „Heizen“ gleichzeitig „Kühlen“, da diese beiden Zustände nach dem Energieerhaltungssatz nie ohneeinander existieren. Oder anders gesagt: Die Energie, die in einen Raum abgegeben wird, um das Temperaturniveau zu erhöhen, muss irgendwo anders entzogen werden. In konventionellen Kraftwerken wird die Primärenergie einem fossilen Energieträger wie Kohle oder Gas entzogen. Nach einer Umwandlungskette mit hohen Verlusten wird sie dem Verbraucher als Nutzenergie (Raumwärme) zur Verfügung gestellt. Mittlerweile gibt es vielfältige Methoden, um fossile Energieträger zumindest teilweise zu ersetzen, z.B. durch die Nutzung von Erdwärme oder Sonnenstrahlung. Wenn in einem Gebäude nun aber keine Heizkörper installiert sind und kein Anschluss zur Wärmeversorgung besteht, bedeutet dies nicht, dass es sich um ein Gebäude ohne Heizung handelt. Denn ein Gebäude lebt durch die Einflüsse von außen und innen, solare Strahlung und Personen können einen Raum auch wärmen und sind energetisch gesehen auch nichts anderes als „Heizungen“.

Wird im Rahmen dieser Arbeit von einem Gebäude ohne Heizung gesprochen, so handelt es sich dabei um das Fehlen eines konventionellen Heizkörpers mit Anschluss an eine Wärmeversorgung. Das Gebäude erhält trotzdem Energie in Form von Wärme durch externe und interne Energieeinträge.

2. Entwicklung eines Schulgebäudes ohne Heizung

2.1. Methodik und Darstellung

2.1.1. Simulation mit TrnSYS

Das Werkzeug für die Untersuchungen bildet die Simulationsumgebung TRaNsient SYStems Simulation (TRNSYS). Es handelt sich dabei um ein Programm zur Simulation transienter Systeme. Das bedeutet, dass die Parameter zeitlich aufgelöst dargestellt werden und dabei nicht einem konstanten Wert folgen, sondern sich mit jedem Zeitschritt ändern. Dazu wird zunächst ein energetisches Modell des Gebäudes mit Google SketchUp gezeichnet. Dabei wird das Gebäude in Zonen unterteilt, die miteinander verbunden werden und so interagieren können.

Mit dem Interface „TRN Build“ lassen sich alle Einstellungen für die Gebäudestruktur vornehmen. Hier werden alle Details festgelegt, die wichtig sind, um das thermische Verhalten des Gebäudes simulieren zu können. Dazu zählen u.a. optische Eigenschaften von Fenstern, die Wandaufbauten, interne Lasten oder die Heiztemperatur.

Das Interface „Simulation Studio“ stellt die graphische Simulationsoberfläche vor. Per „drag and drop“ werden die einzelnen Komponenten hinzugefügt und miteinander verbunden. Es wird mit sogenannten „Types“ gearbeitet. Die wichtigsten Types sind Type 56, hier stehen alle Informationen über das Gebäude zur Verfügung und Type 15, hier ist der Wetterdatensatz für ein Jahr hinterlegt. Die Types werden durch Inputs und Outputs miteinander verknüpft und interagieren so miteinander. Z.B. wird der Output „Außentemperatur“ der Wetterdaten mit dem Input „Außentemperatur“ des Gebäudes verbunden und das Programm kann den Einfluss der Außentemperatur auf verschiedene Faktoren, wie z.B. die Raumtemperatur berechnen.

2.1.2. Auswertung von Simulationsergebnissen

Als Ergebnis der Berechnung erhält man einen Plot, auf dem unterschiedliche Ergebnisse wie z.B. die Raumtemperaturen oder die Heizlast im zeitlichen Verlauf als Diagramm dargestellt sind. Man kann sich aber auch die berechneten Werte als reine Zahlen in einer Textdatei ausgeben lassen und diese Zahlen dann mit Excel weiterverarbeiten, um Zusammenhänge, die nichts mit dem zeitlichen Verlauf zu tun haben, darstellen zu können.

2.2. Wie funktionieren Gebäude?

2.2.1. Vorstellung des Projektes

Bauwerke sind Wohngebäude, Nichtwohngebäude oder eine Mischform davon. In ihrem Verhalten unterscheiden sie sich deutlich voneinander. Beide Typen auf ihre Funktionsweisen zu prüfen, würde den Rahmen der Arbeit sprengen. Deswegen wird im Zuge dieser Arbeit nur eine Form des Typs Nichtwohngebäude untersucht. Ein Projekt des Ingenieurbüros BZE Ökoplan bot die geeignete Grundlage für die Studie. Es handelt sich dabei um ein Bauvorhaben für ein Lern- Forschungs- und Kulturgebäude auf einem Hochschulcampus in Lübeck. Die Herausforderung besteht darin, das Gebäude so zu planen, dass es als „energieautarkes Gebäude“ funktioniert.

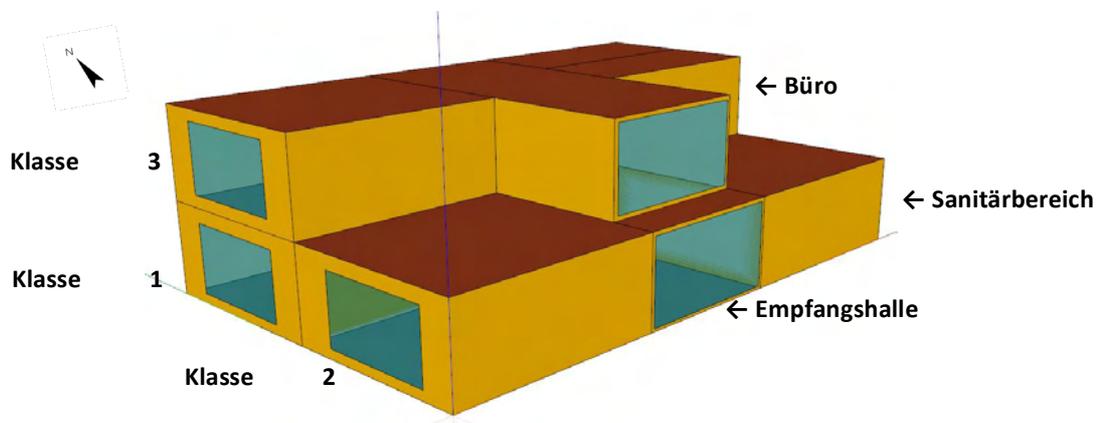


Abbildung 5 Google Sketch-Up-Modell des geplanten Neubaus Vorderseite

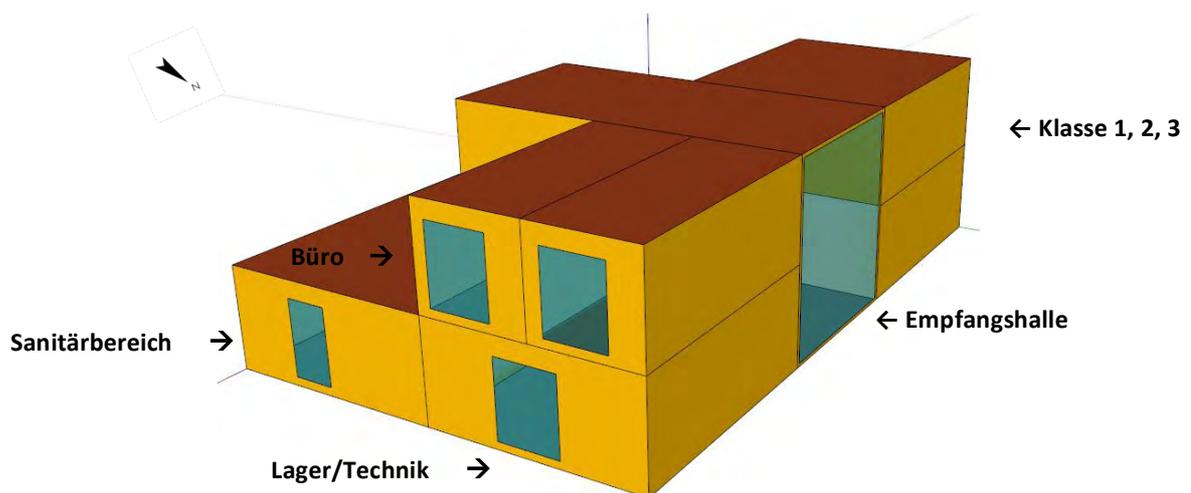


Abbildung 6 Sketchup-Modell des geplanten Neubaus, Rückseite

2.2.2. Interaktion mit internen Lasten

Lernräume stellen eine besondere Herausforderung in der Planung dar, denn sie werden kaum benutzt. In der Regel werden diese Gebäude 8 h/d von Montag bis Freitag zu Unterrichtszwecken benutzt. Während der Ferien findet keine Nutzung des Gebäudes statt. So gelangt man auf eine Nutzungszeit von 188 d/a. (Schulz, 2016)

$$8 \frac{h}{d} * 188 \frac{d}{a} = 1504 \frac{h}{a}$$

Ein Jahr hat 8760h, ein Schulgebäude wird also nur zu

$$\frac{1504 \frac{h}{a}}{8760 \frac{h}{a}} * 100 \approx 17\%$$

der möglichen Zeit pro Jahr genutzt.

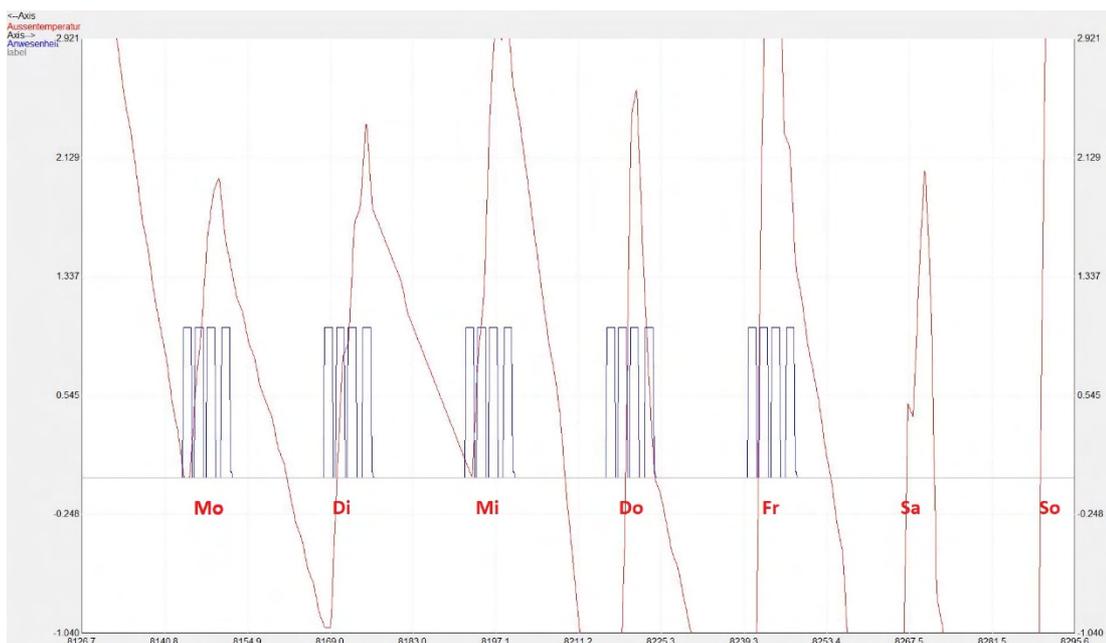


Abbildung 7 Anwesenheit (blau) und Außentemperatur (rot) über eine Woche

Der blaue Graph in Abb.7 beschreibt die Anwesenheit der Schüler in einer Dezemberwoche. Dabei sind auch Pausen berücksichtigt. Auffällig ist, dass die Außentemperatur ihr Maximum eher gegen Ende des Schultages erreicht. Ein Gebäude, welches die meiste Zeit Leerstand aufweist, besitzt nur einen geringen Energieeintrag aus internen Lasten. Dies kann gerade an besonders kalten Tagen im Winter zum Problem werden, wenn das Gebäude über Nacht oder das Wochenende auskühlt.

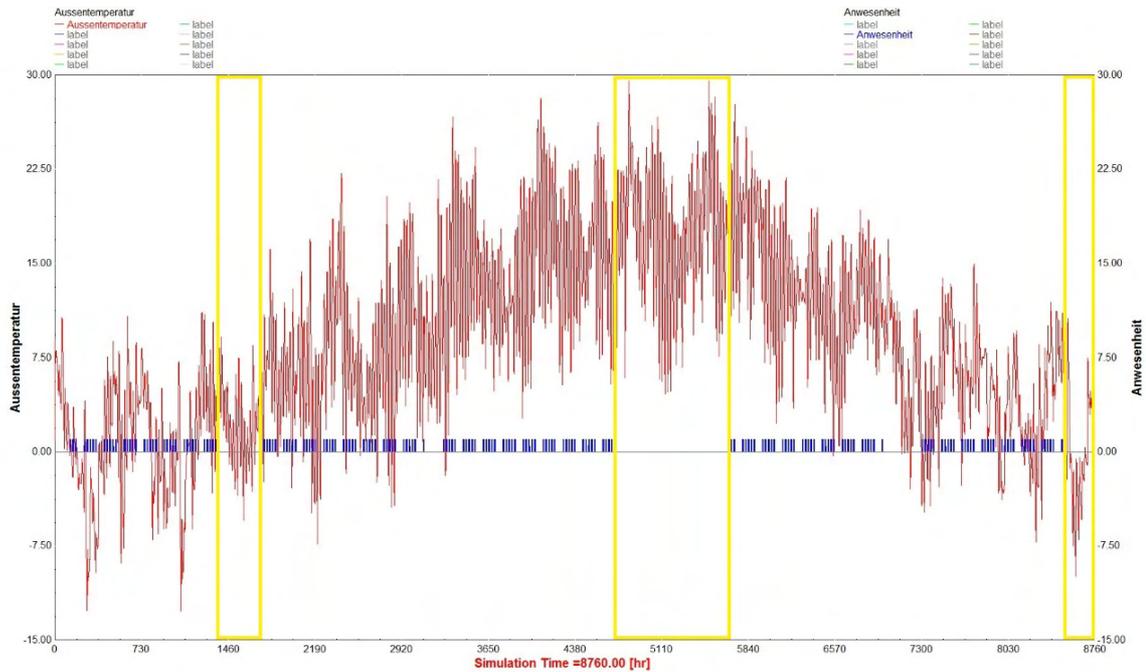


Abbildung 8 Anwesenheit (blau) und Außentemperatur (rot), kritische Phasen (gelb)

In Abb. 8 ist als blauer Graph die Anwesenheit der Schüler und als roter Graph die Außentemperatur zu sehen. Kritische Phasen (gelb) sind zum Beispiel die Märzferien oder die Winterferien, da dort keine internen Lasten auftreten und ein Kälteeinbruch herrscht. Das Gebäude könnte über die Maße auskühlen. Die Sommerferien finden zur Zeit der höchsten Außentemperaturen statt. Ohne Nutzung gibt es keinen Luftwechsel und es kann zu Überhitzung kommen, dies wäre problematisch, wenn die Schule außerhalb der Schulzeit als Veranstaltungsort z.B. für Vereine dient.

Interne Lasten entstehen durch die Abgabe von Wärme an die Umgebung. Dies kann sowohl durch Menschen oder Maschinen (z.B. PC, Lampen) erfolgen. Die Wärme wird abgegeben, sobald die Umgebungstemperatur niedriger ist als die der Quelle. Der Mensch zum Beispiel hat eine Betriebstemperatur von 37 °C. Da die Umgebungstemperatur niedriger ist, gibt er permanent Energie an die Umgebung ab. (Specht, 2005)

Bei unterschiedlichen Aktivitätslevels ergibt sich für eine erwachsene Person von 75 kg Körpergewicht eine Wärmeabgabe in Watt wie sie in der folgenden Abbildung 5 zu sehen ist.

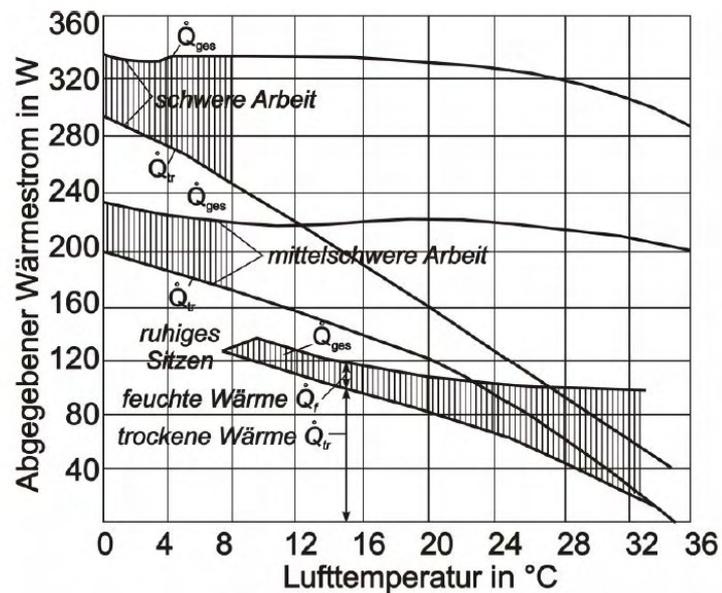


Abbildung 9 Wärmeabgabe Mensch (75 Kilo) (Specht, 2005)

Für einen Universitätsbetrieb nimmt man also laut Abb. 9 einen Wert von 120 W pro Person an. In einem Raum des geplanten Gebäudes werden durchschnittlich 24 Studenten und eine Lehrkraft anwesend sein.

$$120 \frac{W}{Person} * 25 Personen = 3000 W \text{ interne Last pro Klassenzimmer}$$

Durch die Beleuchtung kann ein Wärmeeintrag von **5 W/m²** angenommen werden, miteinbezogen sind auch Beamer, Projektoren und Whiteboards. (Recknagel, Sprenger, & Schamek, 09/10)

Im Folgenden wird die Entwicklung der durchschnittlichen Raumtemperaturen in einem Klassenraum an einem Tag unter dem Einfluss unterschiedlich hoher interner Lasten betrachtet:

□

Vergleich verschiedener interner Lasten an einem Tag

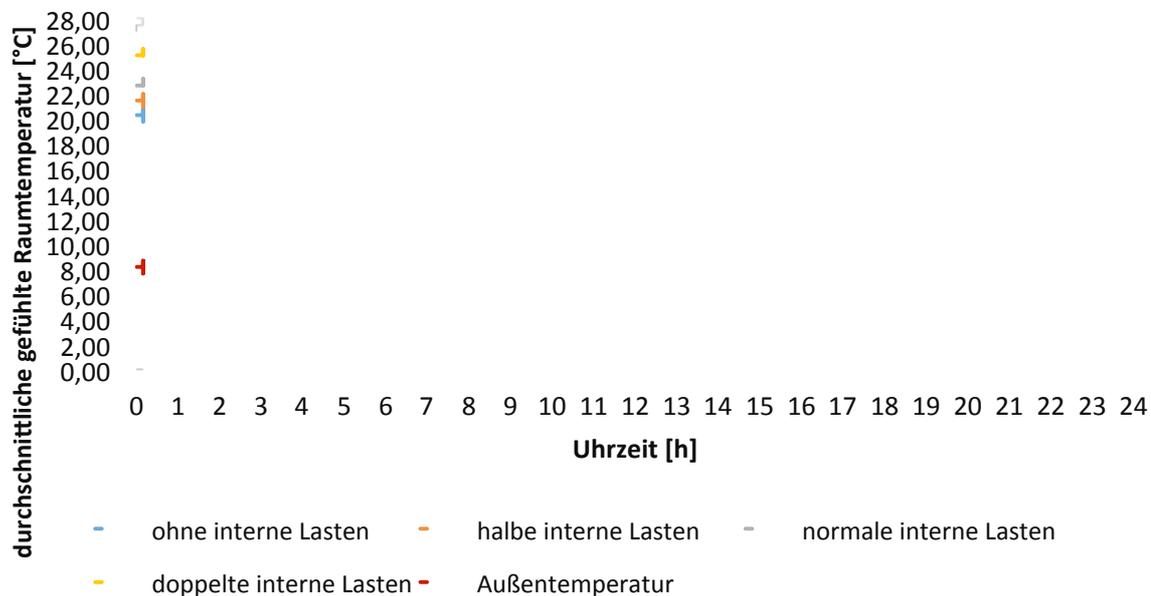


Abbildung 10 Vergleich interner Lasten

Es ist gut zu beobachten, wie die Raumtemperatur auf eine Veränderung der internen Lasten reagiert. Teilweise wird innerhalb einer halben Stunde eine Differenz zwischen dem Temperaturminimum und –maximum von 5 K erreicht (gelbe Linie). Das zeigt, wie wichtig es ist, die internen Lasten so real wie möglich festzulegen, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Raumtemperaturen haben.

2.2.3. Interaktion mit der Umwelt

Ein Gebäude reagiert sowohl auf interne Lasten, als auch auf äußere Einflüsse. Diese äußeren Einflüsse sind hinterlegt in den Wetterdaten. Den wichtigsten Faktor dabei bilden die solaren Strahlungsdaten, da das Programm diese einem 3D-Strahlungsmodell mit Hilfe der Bildung von sogenannten Gebhard-Faktoren berechnet. (Aschaber, Hiller, & Weber, 2008) Parameter des Wetterdatensatzes wie der „solar zenith angle“ und „solar azimuth angle“ werden benutzt, um kontinuierlich den Sonnenstand relativ zum Gebäude zu berechnen. Nicht nur der Sonnenstand, sondern auch Informationen über die Intensität der diffusen, direkten und reflektierten Strahlung, sowie der Einfallswinkel und Verschattungen auf die Flächen des Gebäudes werden verarbeitet.

Weitere wichtige Einflüsse sind die relative Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit und -richtung, sowie die Bodentemperatur. (TRNSYS manual, 2014)

2.2.4. Wie sich die Temperatur in einem Raum entwickelt

Das Ziel ist, behagliche Räume zu schaffen. Damit dies realisiert werden kann, ist es wichtig, ein Grundverständnis dafür zu schaffen, was in einem Raum passiert, wenn dieser den verschiedenen Einflüssen von außen und innen ausgesetzt ist. Dazu muss zunächst der Begriff „Temperatur“ genauer betrachtet werden. Die **Raumtemperatur**, die mittels Thermometer gemessen werden kann, ist eine zusammengesetzte Größe, die sich aus der örtlichen **Raumlufttemperatur** und den **Strahlungstemperaturen** der Umschließungsflächen ergibt. Interne Lasten tragen sowohl durch Strahlung, als auch durch Konvektion zur Erwärmung der Raumlufttemperatur bei. Je höher die Geschwindigkeit des umgebenden Mediums (Luft) ist, desto größer wird der Anteil durch Konvektion. (Specht, 2005)

2.2.5. Wann ein Raum als behaglich empfunden wird

Abgesehen von optischen Faktoren, wie dem Raumdesign, spielt eine große Rolle, ob die Umgebung als warm oder kalt empfunden wird. An diesem Punkt kommt eine neue Größe ins Spiel: Die **empfundene Temperatur**. Sie hängt von der Wärmeabgabe des Menschen ab, welche wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben aus Konvektion an die Luft mit der Temperatur ϑ_L und Wärmestrahlung an die Wände mit ϑ_W besteht. Mit folgender Gleichung kann die empfundene Temperatur ϑ_e berechnet werden, wobei α_K und α_S die Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion bzw. Strahlung sind:

$$\vartheta_e = \frac{\alpha_K * \vartheta_L + \alpha_S * \vartheta_W}{\alpha_K + \alpha_S} \quad (\text{Specht, 2005})$$

In der folgenden Abb. 11 ist das Behaglichkeitsempfinden in einem Raum abhängig von Luft- und Wandtemperatur dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass eine geringe Lufttemperatur von etwa 19°C noch als behaglich empfunden wird, wenn die Wandtemperatur etwas höher, bei ca. 20°C liegt:

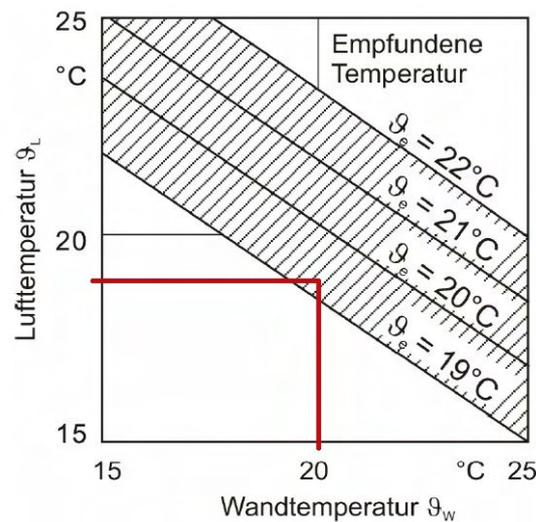


Abbildung 11 Behaglichkeitsfeld empfundene Temperatur in Räumen (Specht, 2005)

Die in der Arbeit folgenden Diagramme stellen immer die Raumlufttemperatur dar, da sie auch zur Berechnung der Heizlast und der Heizarbeit verwendet wird. Auf die empfundene Temperatur wird separat eingegangen um die Behaglichkeit im Raum zu bewerten.

Der Vollständigkeit halber werden im Folgenden noch die Behaglichkeitskriterien Zugluft und Raumluftfeuchte erwähnt, sie finden im Rahmen der Arbeit aber keine weitere Bedeutung. Wie schon erwähnt, hängt das Temperaturempfinden auch von der Luftstromgeschwindigkeit ab. Je höher diese Geschwindigkeit ist, desto mehr Wärme wird abgeführt. Dabei kann es zu sogenannten Zugscheinungen kommen, wie sie in Abb. 12 dargestellt sind:

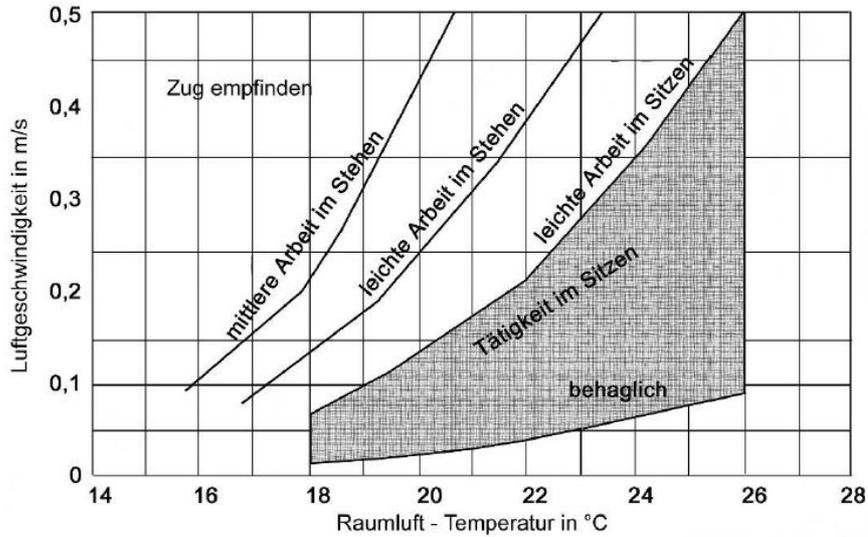


Abbildung 12 Behaglichkeit Raumlufttemperatur/Luftgeschwindigkeit (Specht, 2005)

Es fällt auf, dass bei hohen Raumtemperaturen auch sehr hohe Luftgeschwindigkeiten noch als behaglich eingestuft werden, während bei niedrigen Temperaturen das Zugempfinden schon sehr bald einsetzt, da außerhalb der Wohlfühltemperatur der Abkühlereffekt deutlich unangenehmer ist.

Im Folgenden ist die Behaglichkeit in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit dargestellt. Da die Simulationen aber weder in ariden noch in vollhumiden Klimaregionen durchgeführt werden, findet das Kriterium im weiteren Verlauf keine Bedeutung.

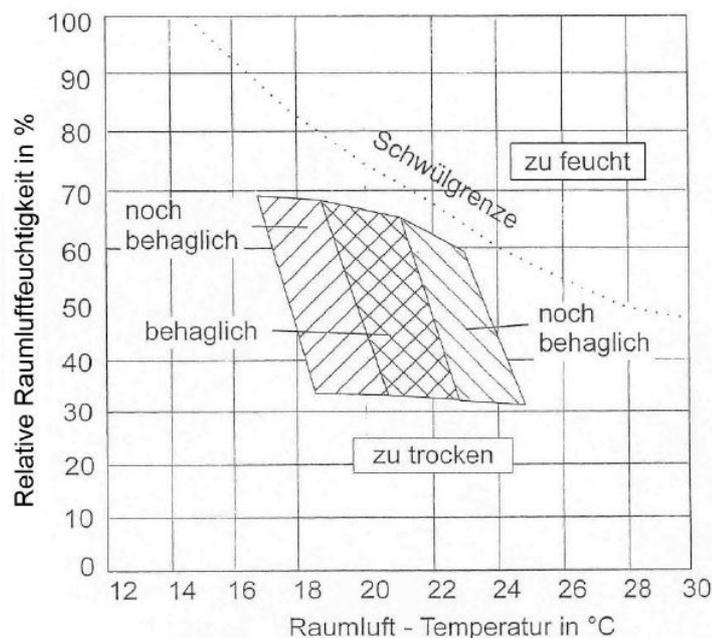


Abbildung 13 Behaglichkeitsempfinden relative Raumluftfeuchtigkeit (Specht, 2005)

2.3. Entwicklung des Projekts

2.3.1. Die Gebäudehülle

Um einen ersten Eindruck des Gebäudeverhaltens zu erhalten, wird das energetische Gebäudemodell (Abb. 5&6) in TRNSYS übertragen. Als erstes werden die Wandaufbauten eingestellt. Von den Projektbeteiligten gewünscht wurden Baumaterialien wie Stampflehm, Lehmziegel und Massivholz. Die Wandaufbauten mit den dazugehörigen U-Werten sehen wie folgt aus:

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	LEHM	0.100	massive
2	MASSIVHOLZ	0.100	massive
3	MIWD_030	0.150	massive
4	VOLLZIEGEL_LEIC...	0.150	massive

back

total thickness: m

u - value: W/m²K for reference only

Abbildung 14 Aussenwandaufbau

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	LEHM	0.200	massive

back

total thickness: m

u - value: W/m²K for reference only

Abbildung 15 Innenwandaufbau

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	MASSIVHOLZ	0.400	massive

back

total thickness: m

u - value: W/m²K for reference only

Abbildung 16 Aufbau Zwischendecke

Zunächst erhält das Gebäude keine Einflüsse durch interne Lasten. In der nachfolgenden Abbildung ist zu sehen, wie die Raumtemperaturen auf die Einflüsse der Wetterdaten mit seiner Kubatur und den Wandaufbauten reagieren:

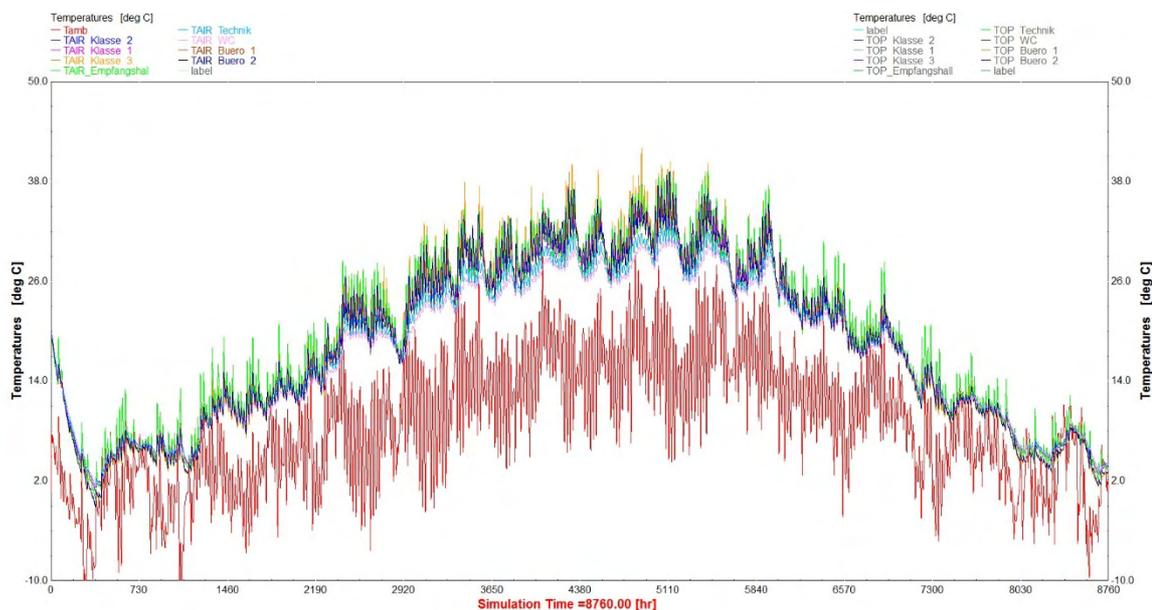


Abbildung 17 Raumtemperaturen ohne interne Lasten

In Abbildung 17 stellt der rote Graph die Außentemperatur dar. Bei den übrigen Graphen steht jeweils eine Farbe für eine Zone des Modells. Oben links ist die Legende mit der Zuordnung der Farben zu Zonen zu sehen. Die Temperaturskala (y-Achse) reicht von -10 - 50 °C. Die Abbildung repräsentiert den Fall, dass das Gebäude ein Jahr lang leer steht. Dabei ist gut zu beobachten, wie die Raumtemperaturen auf die Schwankungen der Außentemperaturen reagieren. Im Simulationsprogramm ist in den Räumen automatisch eine Starttemperatur für den Beginn der Simulation vorgegeben. Diese beträgt 20 °C. Deswegen sinken die Temperaturen von Stunde 0 bis ca. Stunde 350. Erst dann hat sich das Gebäudeverhalten eingependelt. Im Januar weist das Gebäude die niedrigsten Temperaturen auf, sie sinken bis auf 0 °C ab. Im Sommer dagegen liegen die Raumtemperaturen teilweise deutlich über den Außentemperaturen und erreichen bis zu 40 °C im Juli und August.

2.3.2. die internen Lasten

Im nächsten Schritt werden dem Gebäude die internen Lasten zugefügt. Dabei wird den Zonen jeweils von Montag bis Freitag und außerhalb der Ferien und Feiertage folgender Stundenplan zugrunde gelegt:

Zeit	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Büro
0:00	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0
7:00	0	0	0	0
8:00	25	25	6	2
9:00	25	25	6	2
10:00	25	25	6	2
11:00	25	25	6	2
12:00	25	25	6	2
13:00	25	25	6	2
14:00	6	6	6	2
15:00	6	6	6	2
16:00	6	6	6	2
17:00	6	6	6	2
18:00	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0

Tabelle 1 Stundenplan der Zonen

Die Tabelle 1 wird in TRNSYS als Schleife eingelesen, die nach 23:00 Uhr wieder vorne bei 0:00 Uhr anfängt und mit der Bedingung verknüpft ist, dass Wochenenden und Ferien ausgeschlossen sind. So wird für jede Stunde des Jahres angegeben, wie viele Personen anwesend sind. Die Zahlen stehen für die Anzahl der anwesenden Personen. So wird z.B. von 8:00 bis 9:00 Uhr der Wert „25“ für die Anzahl der Personen in Klasse 1 eingelesen. Tritt der Fall ein, dass die Prüfung der Bedingung ergibt, dass Ferien sind oder Wochenende ist, wird der Wert „25“ ignoriert und „0“ eingelesen und verarbeitet. Es lassen sich Bedingungen beliebiger Komplexität erstellen. Im Gebäude wird der eingelesene Wert nun mit der Wärmeabgabe in Watt/Person multipliziert. Hierfür wurde nach Abb. 9 ein Wert von 120 W/Person gewählt.

In der folgenden Abbildung sieht man das gleiche Bild wie in Abb. 17, diesmal mit internen Lasten:

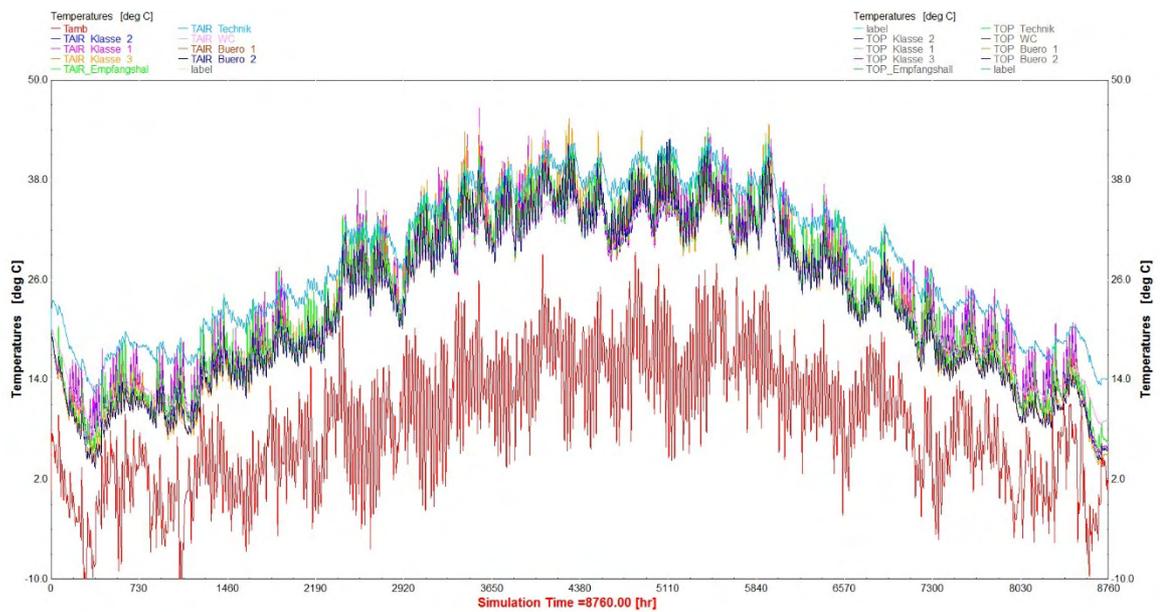


Abbildung 18 Raumtemperaturen mit internen Lasten

Beim Vergleich von Abb. 17 und Abb. 18 wird deutlich, dass die Raumtemperaturen bei Abb. 18 in einem höheren Bereich liegen. Im Sommer werden sogar Raumtemperaturen von über 40 °C erreicht. Die Kurve ist allgemein glatter und im Vergleich mit Abb. 17 ist die Differenz zur Außentemperatur höher und die Tagesschwankungen sind intensiver. Gut zu sehen sind auch die fehlenden Peaks während der Ferien im März, August und Dezember/Januar, während keine internen Lasten auftreten.

2.3.3. Die Gebäudelüftung

Sobald Personen in einem Raum anwesend sind, muss für eine behagliche Raumluftqualität gesorgt werden. Die Luft wirkt auf den Menschen in erster Linie über die Atmung, um dem Körper Sauerstoff zu- und entstehendes Kohlendioxid wieder abzuführen. (Recknagel, Sprenger, & Schamek, 09/10) Die Personen „veratmen“ die vorhandene Raumluft und der CO₂-Gehalt in der Raumluft steigt. Der Abtransport der Emissionen wird durch einen Luftwechsel generiert, der dafür sorgt, dass Schadstoffe, wie z.B. CO₂, nicht über einen bestimmten Grenzwert gelangen. Studien haben gezeigt, dass in einem Klassenraum der CO₂-Gehalt in der Luft die Grenze von 1500 ppm nicht überschreiten sollte, da sonst die Leistungsfähigkeit sinkt. CO₂ ist farb- und geruchslos, weswegen eine olfaktorische Wahrnehmung nicht möglich ist. Deshalb wird unabhängig vom subjektiven Empfinden der Luftqualität ein konstanter Luftwechsel während der Nutzungszeit eingefügt, mit dem der CO₂-Grenzwert eingehalten wird. Mit dem Luftwechsel wird einem Raum Außenluft zugeführt. Das bedeutet, dass im Winter kalte Luft in den Raum gelangt. Je mehr Personen in dem Raum anwesend sind, desto mehr Frischluft muss auch zugeführt werden. Für einen Klassenraum, in dem wie im vorliegenden Fall zeitweise 25 Personen in dem relativ kleinen Volumen von 220 m³ anwesend sind, wird ein Luftwechsel von 2 h⁻¹ angenommen. Bei einer geringeren Personenzahl ist ein Luftwechsel von 0,4 h⁻¹ üblich. (Herschberger, 2015)

Zeit	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Büro
Luftwechsel [1/h]	2	2	1	0.4

Tabelle 2 Eingestellter Luftwechsel in den einzelnen Zonen

Die folgende Abbildung 19 zeigt die Entwicklung der Raumtemperaturen unter Einfluss der internen Lasten und dem Luftwechsel zur Nutzungszeit.

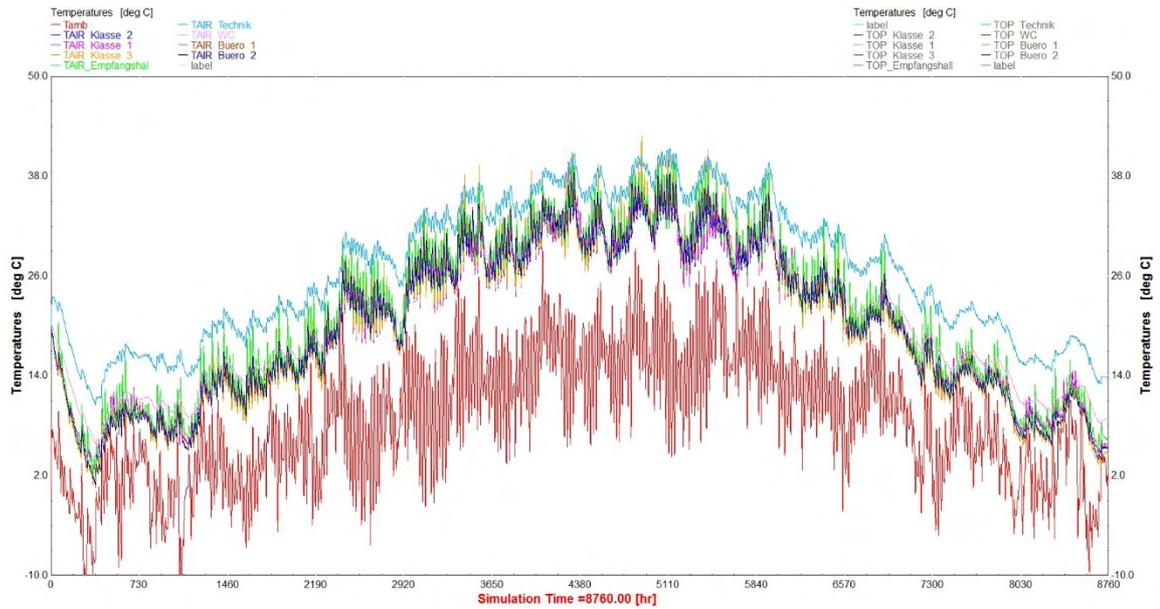


Abbildung 19 Raumtemperaturen mit internen Lasten und Luftwechsel

Es wird deutlich, dass Abb. 19 vergleichbar mit Abb. 16 ist. Das zeigt, dass der hohe Luftwechsel die Wärmegewinne durch die Personen wieder ausgleicht. Für die Planung bedeutet dies, dass viele Personen in einem kleinen Volumen für die Minimierung des Wärmebedarfes kontraproduktiv sind, da durch den hohen Luftwechsel im Winter viel kalte Außenluft in den Raum getragen wird.

Die folgende Abb. 20 fasst als Vergleich die vorangegangenen Untersuchungen zusammen. Die rote Kurve stellt die Außentemperatur dar. In Gelb ist die Temperatur der Empfangshalle ohne interne Lasten zu sehen, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben. In Blau ist die Temperaturkurve der Empfangshalle mit den internen Lasten dargestellt, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben. In Grün ist die endgültige Variante mit den internen Lasten & der Lüftung, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, zu sehen. Sie liegt in der Mitte der 3 Kurven und stellt den realistischen Fall für ein benutztes Schulgebäude dar.

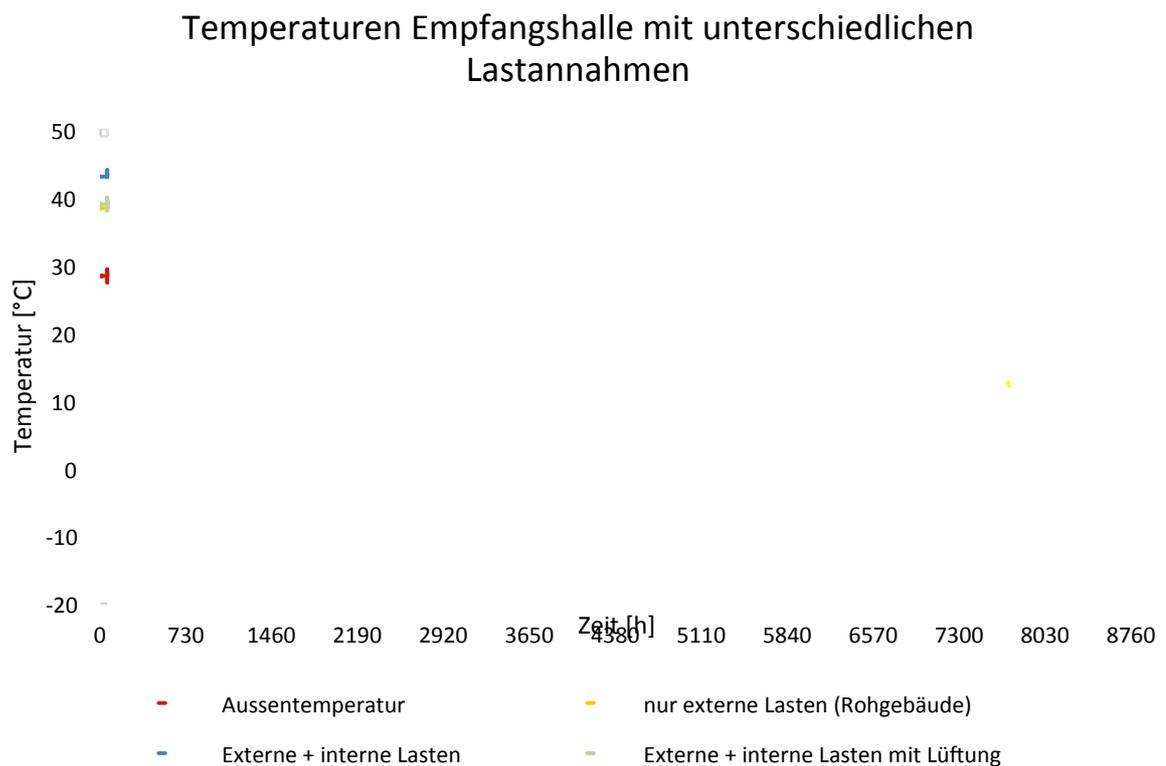


Abbildung 20 Vergleich der Temperaturen unter verschiedenen Lastannahmen

2.3.4. Die Heizlast

Um beurteilen zu können, inwieweit das Gebäude seine Funktion erfüllt, ist die Temperaturkurve allein nicht ausreichend. Eine Abschätzung des verbleibenden Heizwärmebedarfes ist mit bloßem Auge anhand der Temperaturkurven schwer durchzuführen und sehr ungenau. Deswegen wird als nächstes im Gebäude die Heiztemperatur vorgegeben.

	Klassen	Büro	Empfangshalle	Sanitärbereich	Lager/Technik
Heiztemperatur [°C]	20	20	20	20	10

Tabelle 3 Eingestellte Heiztemperatur in den einzelnen Zonen

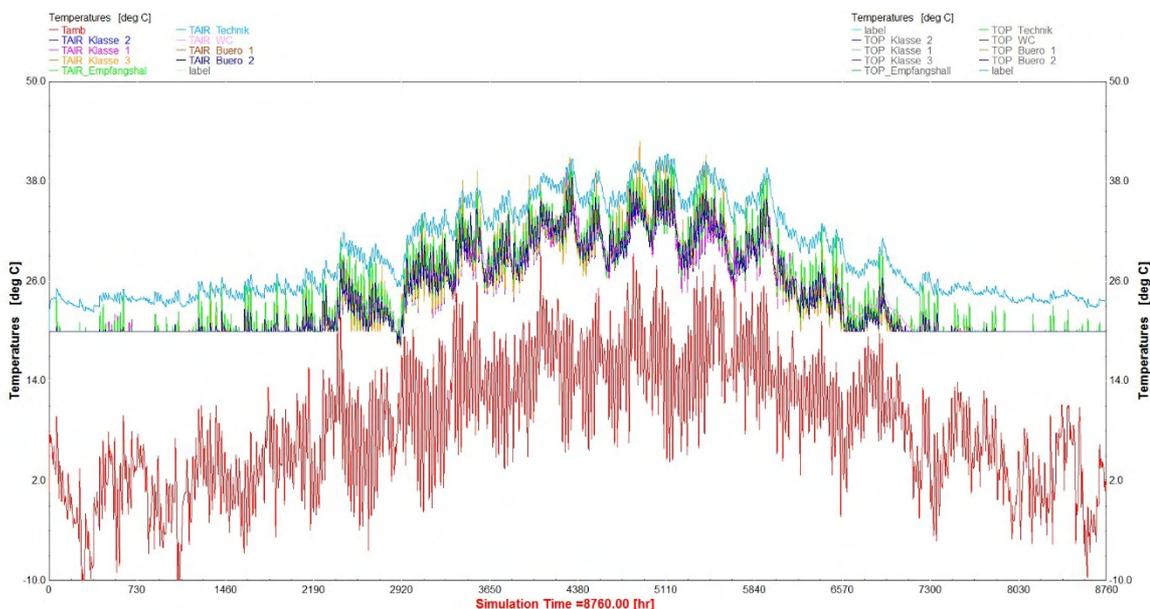


Abbildung 21 Temperaturen mit eingeschalteter Heizung

Man sieht, dass die Temperaturen in den Wintermonaten durch eine horizontale Linie abgeschnitten werden. Dies liegt daran, dass die Temperaturen durch die eingestellte Soll-Heiztemperatur nicht mehr unter die Grenztemperatur sinken können. Sie werden durch die Heizung auf diesem Niveau gehalten, sollten sie diese nicht von selbst erreichen.

Mit jedem Zeitschritt in der Simulation wird nun aus der aktuellen Temperatur und der verbleibenden Differenz bis zur Solltemperatur die Heizlast in kW berechnet. Sie ist in der folgenden Abbildung in pink dargestellt. Die pinke Summenlinie stellt die Heizarbeit in kWh dar und ist das Integral der Heizlast. Es wird deutlich, dass die Heizlast nur dann auftritt, wenn in Abbildung 21 die Temperatur nicht höher ist als die Solltemperatur.

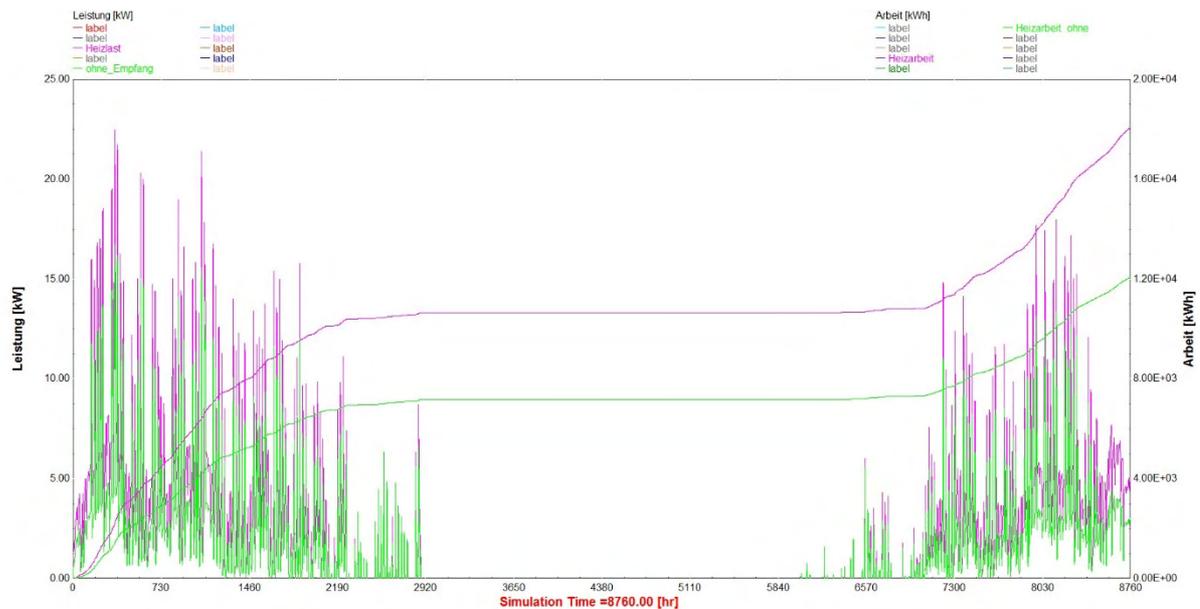


Abbildung 22 Heizlast und Heizarbeit

Zusätzlich gibt es in dem Diagramm in der Farbe Grün die Heizlast des Gebäudes ohne den Einfluss der Empfangshalle und ebenfalls in Grün als Summenlinie die Heizarbeit ohne Einfluss der Empfangshalle. Dieser Vergleich wurde gewählt, da die Empfangshalle im Verhältnis zu den restlichen Zonen ein sehr großes Volumen von 600 m^3 hat und keine internen Lasten besitzt, aber trotzdem gelüftet wird. Die Gesamtheizarbeit beträgt 18937 kWh , die Heizarbeit ohne Halle beträgt 11659 kWh . Das bedeutet, dass allein für die Halle ein Drittel der gesamten Heizarbeit anfällt. Dies wird vor allem durch das große Volumen und den hohen Fensteranteil an den Außenwandflächen verursacht.

In der folgenden Abbildung 23 ist die Heizarbeit jeder Zone aufgetragen. Hier wird ebenfalls deutlich, dass die Empfangshalle (hellblau) mit 5704 kWh den höchsten Wert erreicht, dicht gefolgt von Klassenraum 3 (pink) mit 4821 kWh, und den Klassenräumen 1 (rot) mit 2422 kWh und Klassenraum 2 (blau) mit 2946. Bei den Klassenräumen bestätigt sich somit, dass der hohe Luftwechsel für eine hohe Heizarbeit sorgt. Dass Klassenraum 3 im Verhältnis zu den anderen Klassenräumen eine viel höhere Heizarbeit hat, liegt an seiner exponierten Lage im Obergeschoss. Der Raum hat dort einen viel größeren Außenwandanteil. Außerdem hat dieser nicht die Quantität an internen Lasten wie die anderen beiden Klassenräume (siehe Tabelle 1).

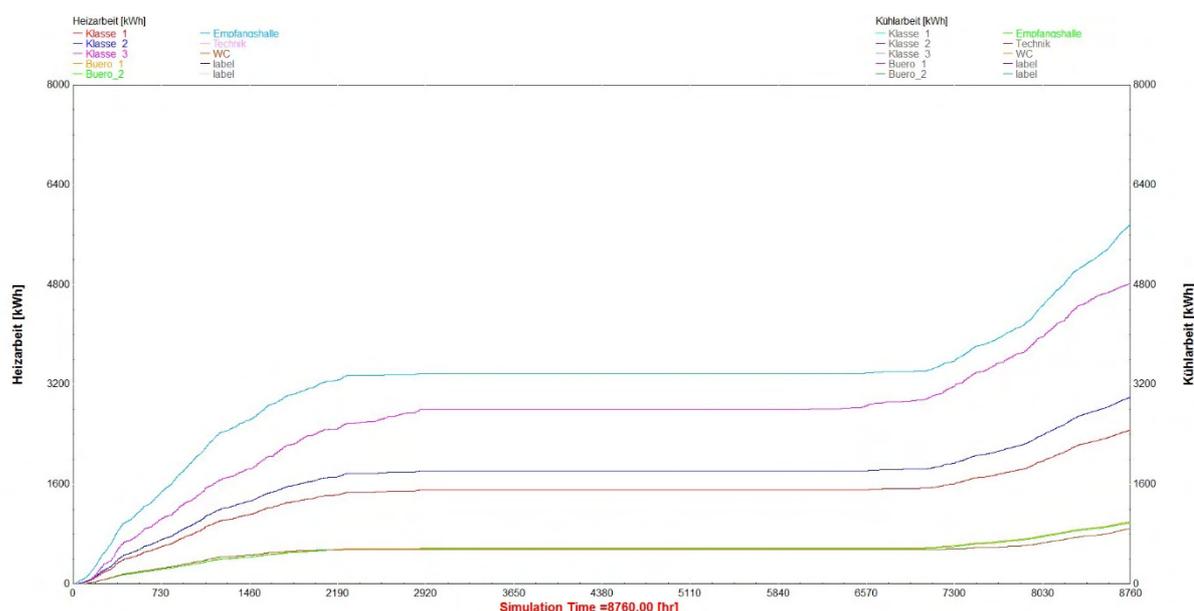


Abbildung 23 Heizarbeiten der einzelnen Zonen

Durch die Analyse der Heizarbeit konnte also nachgewiesen werden, dass die Halle eine wichtige Stellschraube bei der Planung darstellt und die Parameter Ausrichtung, Fenstertyp, Fensterfläche, Kubatur und Hülle noch genauer analysiert werden müssen.

2.3.5. Ausrichtung

Die Ausrichtung des Gebäudes ist ein Faktor, der bei der Planung oft unterschätzt wird. Der Sonneneinfall zu verschiedenen Tageszeiten hat Auswirkungen auf das Wohlbefinden und mit geschickter Ausrichtung lassen sich auch die Heizenergiekosten senken. Für das zu untersuchende Objekt liegt ein Lageplan in 3D vor, dadurch lassen sich Lage und Höhe anderer Objekte in der Umgebung bestimmen und man kann abschätzen, ob das Gebäude verschattet wird. Mit dem Verschattungstool in Google SketchUp kann die Verschattung an beliebigen Tagen und Uhrzeiten betrachtet werden. werden.

Es wurden der 21. Dezember und der 21. Juni zu verschiedenen Uhrzeiten am Geostandort Lübeck betrachtet.

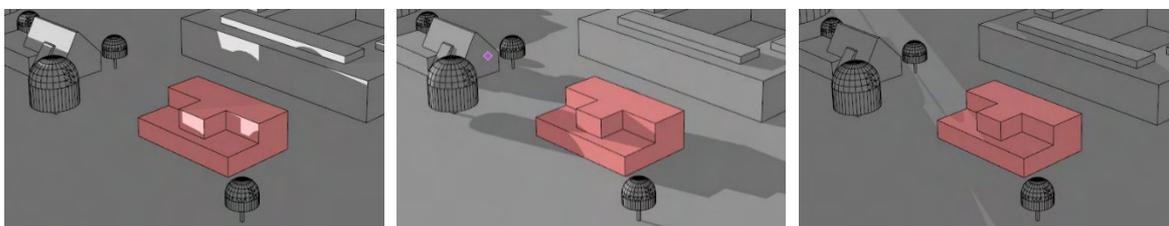


Abbildung 24 Das Gebäude jeweils um 9.00, 12.00 und 15.00 Uhr am 21. Dezember

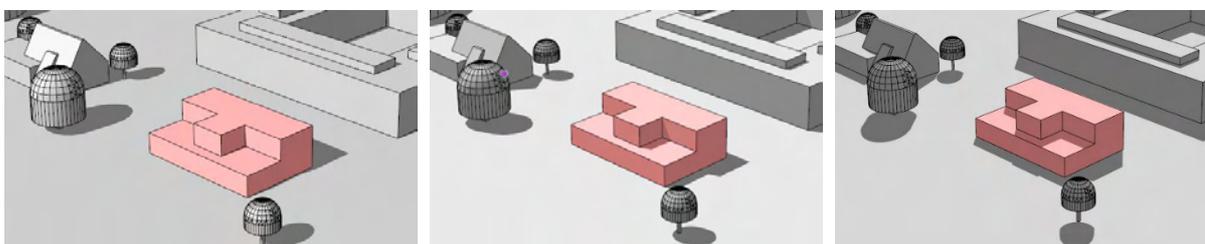


Abbildung 25 Das Gebäude jeweils um 9.00, 12.00 und 15.00 uhr am 21. Juni

Es ist gut zu erkennen, dass der einzige Zeitpunkt im Winter, zu dem das Gebäude nicht komplett verschattet wird, der späte Vormittag/die Mittagszeit ist. Dennoch ist der Sonnenstand im Südwesten bereits so tief, dass das Gebäude durch umliegende Bäume und Gebäude teilweise verschattet wird. Die wenigen verfügbaren solaren Gewinne können daher nicht ausgenutzt werden, da hauptsächlich die kurze Seite, die nach Südwesten ausgerichtet ist, solare Strahlung bekommt. Hier tut sich der Gedanke auf, dass eine andere Ausrichtung des Gebäudes eventuell vorteilhaft sein könnte. Handelt es sich nicht um ein Bestandsgebäude, sondern um einen Neubau, der sich in der Planungsphase befindet, besteht meist auch die Möglichkeit dazu. Mit dem Programm TRNSYS kann der Planer das Gebäude um eine beliebige Grad-Zahl zu drehen. Damit kann der Einfluss des Wetters auf verschiedene Gebäudeausrichtungen analysiert werden, ohne dass ein neues Gebäudemodell

erstellt werden muss. Eine Untersuchung verschiedener Ausrichtungen macht besonders Sinn, wenn das Gebäude nicht von jeder Seite identisch aufgebaut ist oder unterschiedliche Fensterflächen aufweist, so wie im vorliegenden Fall.

Das Gebäude wurde dreimal um 90° im Uhrzeigersinn gedreht, so dass jede relevante Ausrichtung einmal betrachtet werden konnte. Um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Ausrichtungen quantitativ beurteilen zu können, wurde nicht die Temperaturkurve, sondern die Heizarbeit betrachtet und verglichen. Die folgende Abbildung 26 zeigt die Veränderung der Heizarbeit bei den gewählten Drehungen.

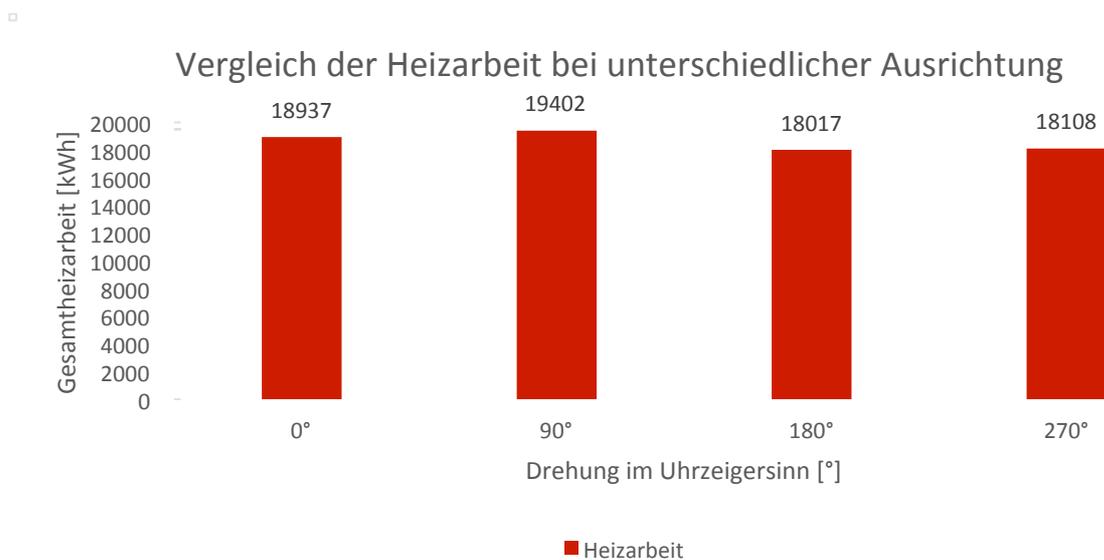


Abbildung 26 Vergleich Heizarbeiten

Am niedrigsten ist die Heizarbeit im Falle einer Drehung um 180°, also wenn das Gebäude mit der Rückseite nach Süden zeigt. Sie ist mit 18017 kWh etwa 5% niedriger als bei 0° Drehung. Da in dieser Größenordnung kein entscheidender Vorteil erlangt werden kann, wird keine Drehung in der weiteren Planung berücksichtigt.

2.3.6. Fenster

Die beiden maßgeblichen Faktoren bei der Auswahl des richtigen Fensters sind der U-Wert und der g-Wert. Treffen Sonnenstrahlen auf ein Fenster, so wird ein Teil der Strahlung ungehindert durchgelassen, ein weiterer Teil reflektiert, sowie ein Teil vom Glas absorbiert und dann durch Konvektion an die Luft nach innen und außen abgegeben. Der Anteil der durchgelassenen Strahlung ist der g-Wert. (Recknagel, Sprenger, & Schamek, 09/10) Ein Fenster mit einem hohen g-Wert lässt viel solare Strahlung passieren. Da Sonnenstrahlen kostenlose Heizenergie zur Verfügung stellen, ist dies gerade im Winter günstig. Bei einem Bauvorhaben, bei dem der Heizenergiebedarf auf ein Minimum gesenkt werden soll, ist es durchaus sinnvoll, die Art und Lage der Fenster genau zu planen. Ein Fenster mit gut aufeinander abgestimmtem U- und g-Wert an der richtigen Position kann den Primärenergiebedarf des Gebäudes spürbar senken.

Um die Sensitivität des Gebäudes auf Fenster mit unterschiedlicher Bauphysik zu analysieren, wurden vier Fenstertypen zum Vergleich ausgewählt. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind U- und g-Werte der Fenster hinterlegt.

	U-Wert [W/m ² K]	g-Wert
Einfachglas	5,68	0,855
Standardglas	1,06	0,586
Sonnenschutzverglasung	1,26	0,212
Wärmeschutzglas	0,6	0,408

Tabelle 4 Auflistung der U- und g-Werte der Fenster

□

Temperaturverlauf bei unterschiedlicher Verglasung

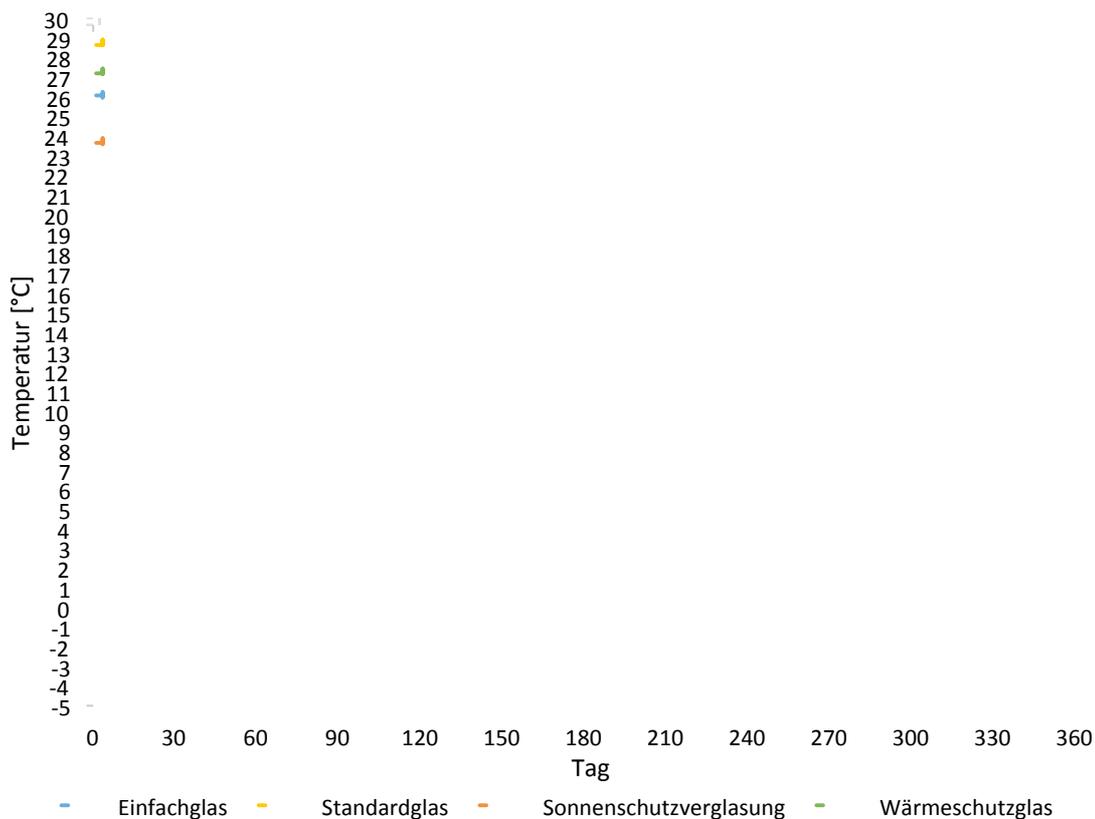


Abbildung 27 Vergleich unterschiedlicher Verglasungen

Abbildung 27 zeigt den Verlauf der Temperatur während eines Jahres mit verschiedenen Verglasungen. Es besteht eine Ähnlichkeit zwischen den Verläufen von Einfachverglasung und Sonnenschutzverglasung. Sie liegen unterhalb der Verläufe von Standardglas und Wärmeschutzglas, welche ebenfalls gleichartig verlaufen. Im Winter werden die höchsten Temperaturen mit dem Standard- und dem Wärmeschutzglas erreicht. Dies liegt an den niedrigen U-Werten beider Verglasungen. Im Sommer steigen die Temperaturen mit dieser Verglasung bis auf 29 °C. Beim Einsatz von Einfachglas oder Sonnenschutzverglasung bewegen sich die Temperaturen im Sommer im behaglichen Bereich. Im Winter dagegen sind die Transmissionsverluste durch hohe U-Werte höher, was wiederum einen höheren Heizwärmebedarf verursacht.

Im Folgenden wurde für die Variante mit Standardglas ermittelt, wie sich verschiedene Verschattungsfaktoren auf die Temperaturen auswirken. Es wurden drei verschiedene F_c -Werte für eine externe Verschattung angenommen. Der F_c -Wert ist ein Abminderungsfaktor für das eintretende Sonnenlicht. (Recknagel, Sprenger, & Schamek, 09/10) Ein Faktor von 1 bedeutet, dass keinerlei Sonnenschutzvorrichtung besteht, ein Faktor von 0 bedeutet, dass das Fenster nicht transparent ist und keine Transmission stattfindet. Der Kehrwert des F_c -Wertes ist der Verschattungsgrad. Nachfolgende Abbildung stellt die F_c -Werte für unterschiedliche Verschattungselemente dar.

Art der Sonnenschutzvorrichtung ^a	F_c
Ohne Sonnenschutzvorrichtung	1.0 ☉
Innenliegend und zwischen den Scheiben ^b	
weiß oder reflektierende Oberfläche und geringe Transparenz	0.75 ☉
helle Farben und geringe Transparenz ^c	0.8 ☉
dunkle Farben und höhere Transparenz	0.9 ☉
Außenliegend	
drehbare Lamellen, hinterlüftet	0.25 ☉
Jalousien u. Stoffe geringer Transp., hinterl.	0.25 ☉
Jalousien, allgemein	0.4 ☉
Rollläden, Fensterläden	0.3 ☉
Vordächer, Loggien, freistehende Lamellen ^d	0.5 ☉
Markisen ^e , oben und seitlich ventiliert	0.4 ☉
Markisen ^e , allgemein	0.5 ☉
Die Sonnenschutzvorrichtung muss fest installiert sein. Übliche dekorative Vorhänge gelten nicht als Sonnenschutzvorrichtung. Eine Transparenz der Sonnenschutzvorrichtung unter 15% gilt als gering.	

Abbildung 28 F_c -Werte verschiedener Sonnenschutzvorrichtungen [DIN 4108]

Es wurden die drei F_c -Werte 0.25, 0.4 und 0.5 für den Monat August untersucht. Die Verschattung wurde abhängig von der Strahlungsstärke und der Windgeschwindigkeit gesteuert und tritt ein, wenn die Strahlungsstärke größer als 360 W ist und die Windgeschwindigkeit weniger als 6 m/s beträgt. Das Ergebnis ist in der nachfolgenden Abbildung 29 dargestellt.

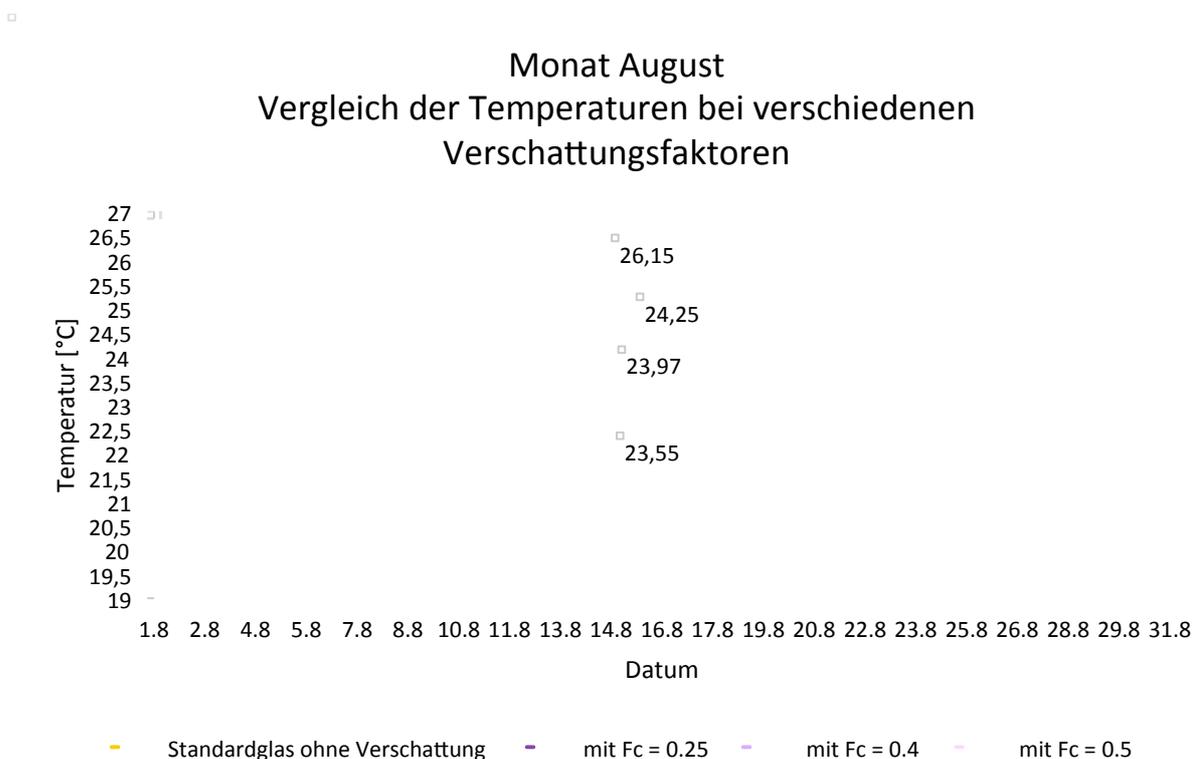


Abbildung 29 Vergleich unterschiedlicher externer Verschattungsfaktoren

In Abbildung 29 wird deutlich, dass eine Verschattung einen positiven Effekt im Sommer haben kann. Dabei wirkt sich schon eine geringe Verschattung stark aus. Mit der geringsten Verschattung, beispielsweise durch eine Markise ($F_c = 0.5$), kann die Temperatur bereits um 1,9 K gesenkt werden. Ein niedrigerer F_c -Wert würde die Temperatur nur noch geringfügig weiter senken, ab hier spielen optische Faktoren, sowie eine Abwägung zwischen Kosten und Nutzen im weiteren Entscheidungsprozess eine Rolle.

In der folgenden Abbildung sind analog zu Abb. 23 die einzelnen Heizlasten der Zonen aufgetragen. Die Halle erhielt zur Nordseite eine Wärmeschutzverglasung und zur Südseite eine Standardverglasung. Die Heizarbeit der Halle konnte durch die Anpassung der Verglasung von 5704 kWh auf 4706 kWh verringert werden. An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass die Auswahl eines geeigneten Fensters gerade bei einem großen Fensterflächenanteil einen erheblichen Einfluss auf die Heizarbeit hat.

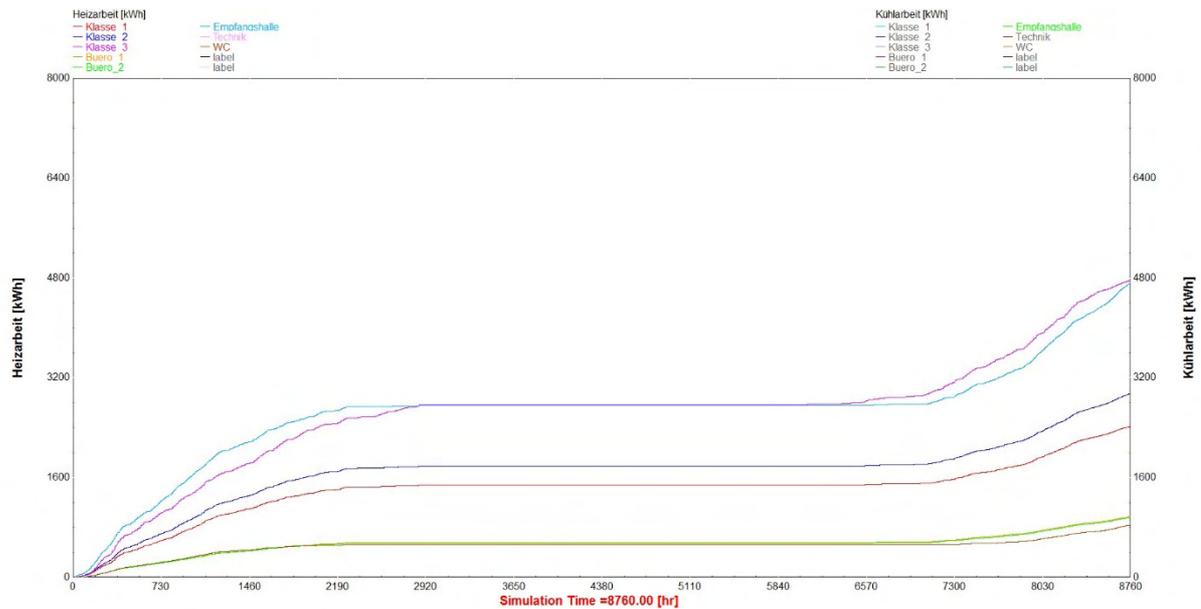


Abbildung 30 Heizlasten nach Anpassung der Fenster

2.3.7. Behaglichkeit im Gebäude

Für die vorangegangene Untersuchung wurde die Heizarbeit als Indikator benutzt, um festzustellen, ob sich der Heizwärmebedarf durch die getroffenen Maßnahmen senken lässt. Neben dem Ziel, ein Gebäude ohne Heizung zu schaffen, darf aber die Behaglichkeit nicht außer Acht gelassen werden. Dafür ist die Heizarbeit kein geeigneter Indikator.

Wie in Kapitel 2.2.5 erläutert ist die Behaglichkeit in einem Raum abhängig von der empfundenen Temperatur. Diese wiederum ist abhängig von der Lufttemperatur und der Temperatur der Oberflächen in dem Raum. Zusätzlich wird die empfundene Temperatur, wie in der Abbildung 12 deutlich wird, von der Luftgeschwindigkeit und der Tätigkeit der Person beeinflusst.

Um nun beurteilen zu können ob die Empfangshalle für den Nutzer behaglich ist wird in der Abbildung 31 die empfundene Temperatur der Raumlufttemperatur und der Wandtemperatur gegenüber gestellt. Dabei ist die Raumlufttemperatur in blau, die Wandtemperatur in grau und die empfundene Temperatur in orange dargestellt. Zusätzlich ist als gelbe Kurve die Anwesenheit der Personen dargestellt, um die relevanten Zeiträume zu analysieren. Denn nur während der Nutzungszeit besteht der Bedarf an ein behagliches Raumklima. Durch den Vergleich dieser Temperaturen wird deutlich, dass die Raumlufttemperatur nicht unter 20 °C fällt, dies ist die Heiztemperatur des Gebäudes. Die Wandtemperatur hingegen fällt teilweise unter 20 °C und ist damit unter der Raumlufttemperatur. Die empfundene Temperatur liegt entweder unter den beiden Temperaturen, oder dazwischen. Außerdem ist deutlich, dass die drei Temperaturen oberhalb von 20°C sehr dicht beieinander liegen. Durch den Vergleich der drei Temperaturen ergeben sich drei Fälle:

Bei Fall 1 ist die Wandtemperatur höher als die Lufttemperatur, die empfundene Temperatur liegt unterhalb beider Temperaturen.

Bei Fall 2 ist die Lufttemperatur höher als die Wandtemperatur, die empfundene Temperatur liegt zwischen diesen beiden Temperaturen.

Bei Fall 3 ist die Wandtemperatur höher als die Lufttemperatur, die empfundene Temperatur liegt zwischen diesen beiden Temperaturen.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Temperaturverläufe für den Monat Januar dargestellt. Darunter befinden sich für jeden Fall die Behaglichkeitsdiagramme. Darin eingezeichnet befinden sich die fallspezifischen Temperaturen. Aus den Diagrammen wird deutlich, dass die Temperatur zu jedem Zeitpunkt innerhalb des behaglichen Bereiches liegt.

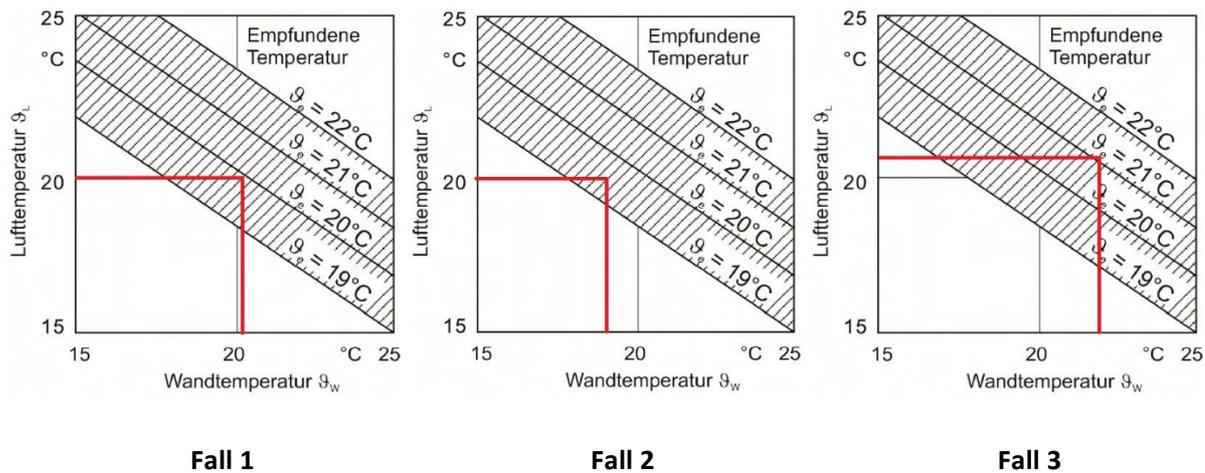
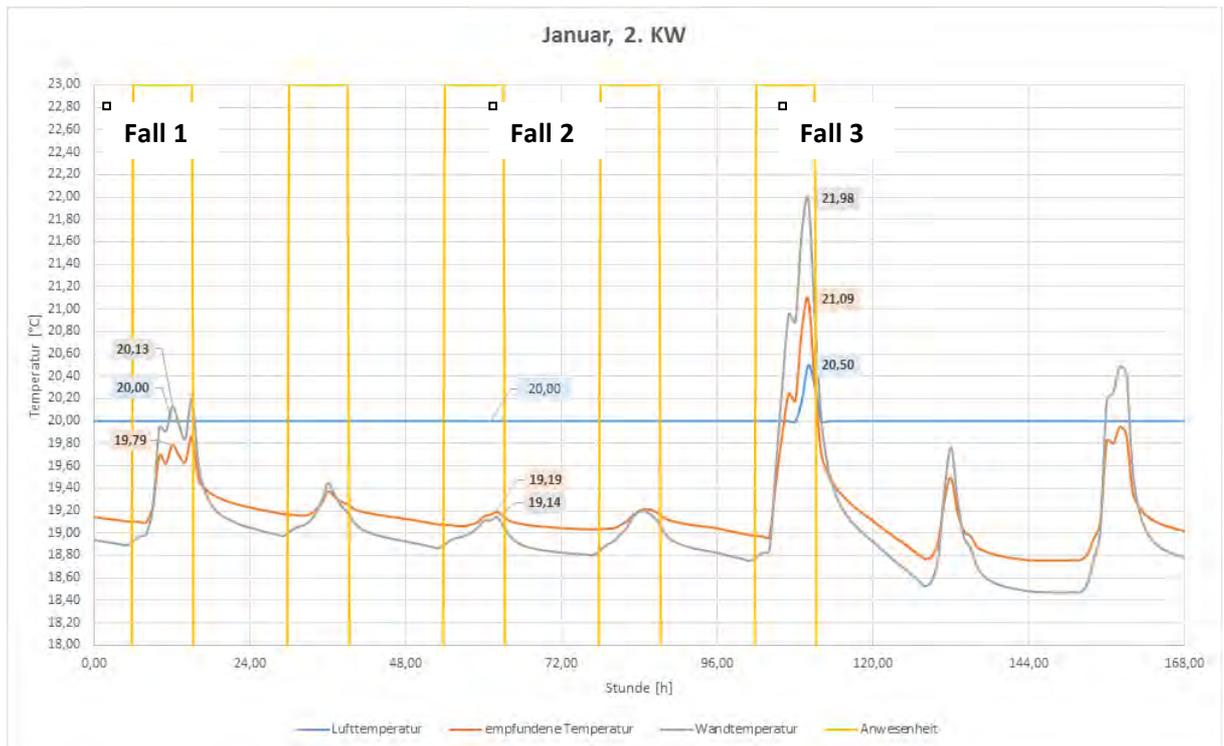


Abbildung 31 Temperatur, Wandtemperatur und empfundene Temperatur im Januar in der Empfangshalle

In der Simulationsrechnung werden die unterschiedlichen Temperaturen, sowie die Anteile durch Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung, sowie durch Atmung berücksichtigt. In diesem Rahmen lässt sich sagen, dass der Raum behaglich ist. Die Annehmbarkeit des thermischen Raumklimas und die Wahrnehmung von Behaglichkeit hängen jedoch zusätzlich von der stoffwechselbedingten Wärmeproduktion und dem Dämmwert der Kleidung ab. Ob sich eine Person in dem untersuchten Raum also insgesamt thermisch neutral fühlt lässt sich nicht zu hundert Prozent mit ja beantworten und hängt auch stark von der jeweiligen Person ab. (Recknagel, Sprenger, & Schamek, 09/10)

2.3.8. Standort

Für das reale Projekt der FH Lübeck ist der Standort nicht variierbar. Aber um zu verdeutlichen, wie die externen Einflüsse auf ein Gebäude wirken, wurde das Gebäude noch einmal für eine Auswahl an unterschiedlichen Standorten simuliert. Dazu wurden Orte gewählt, die im Wetterdatensatz vorhanden sind und klimatisch andersartig sind als das Hamburger Wetter:

- Rom
- Tromsø

Zum Vergleich wurden erneut die Heizarbeiten betrachtet, wie in nachfolgender Abbildung 32 zu sehen ist.

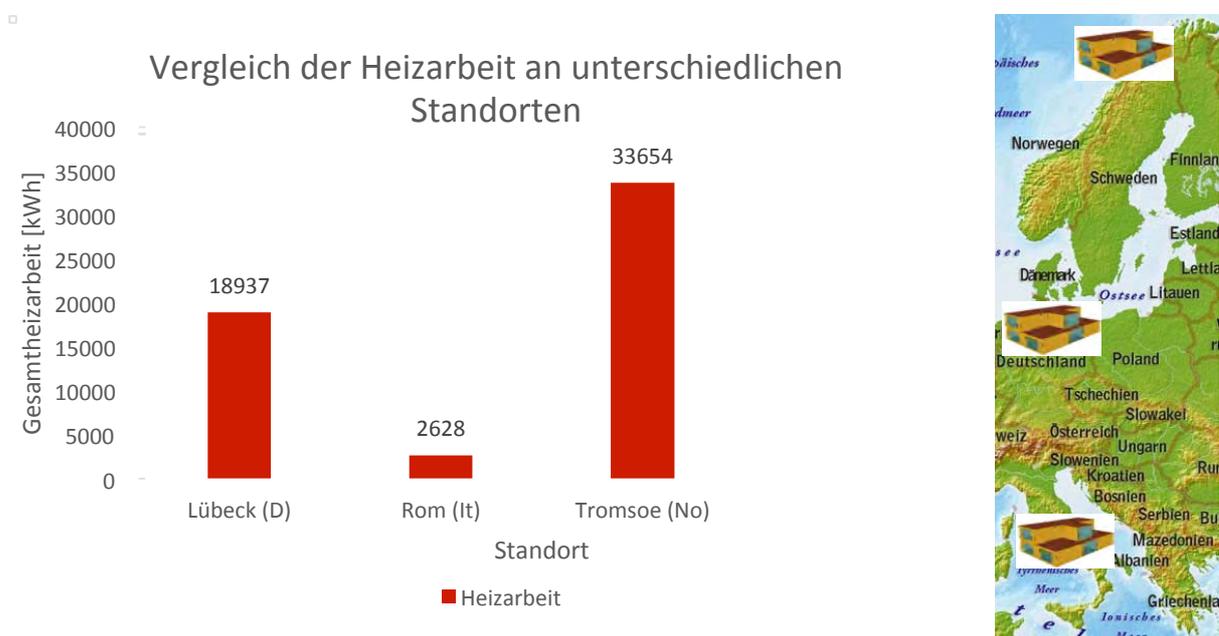


Abbildung 32 Heizarbeiten an unterschiedlichen Standorten

Das Wetter in Rom ist deutlich wärmer, weswegen die Heizlast auf einen sehr geringen Wert von 2628 kWh sinkt. Hingegen in Tromsø ist es im Winter deutlich kälter, weswegen sich die Heizarbeit fast verdoppelt. In den Abbildungen auf der folgenden Seite sieht man zum Vergleich die Temperaturkurven der drei Standorte.

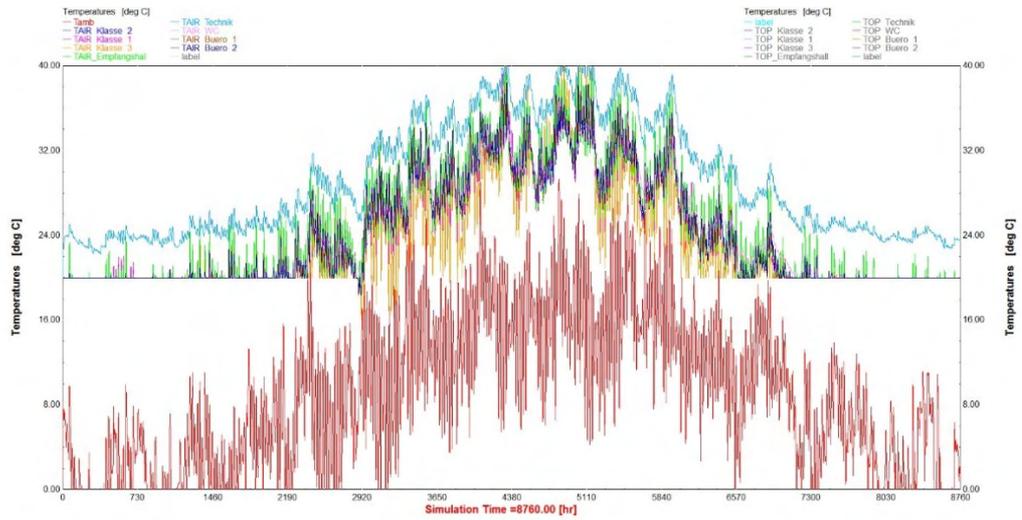


Abbildung 33 Standort Lübeck

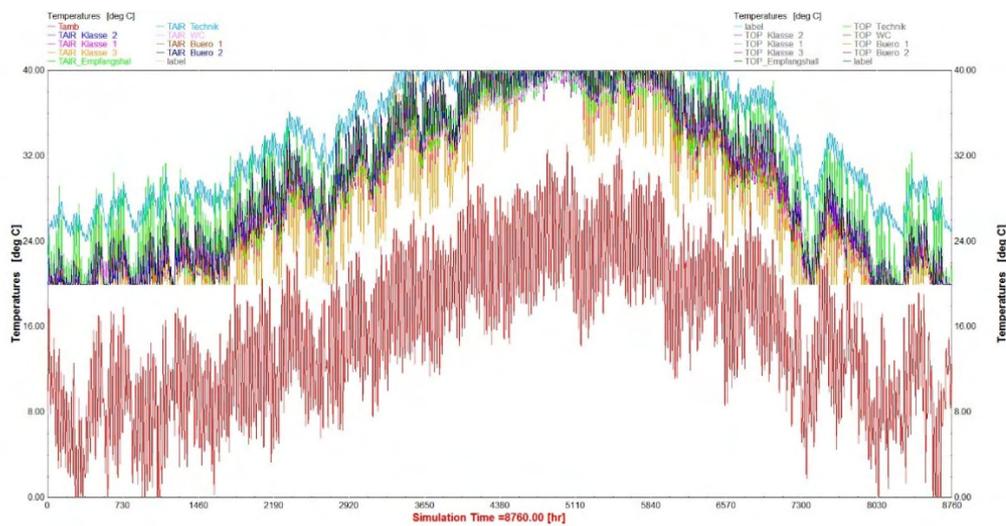


Abbildung 34 Standort Rom

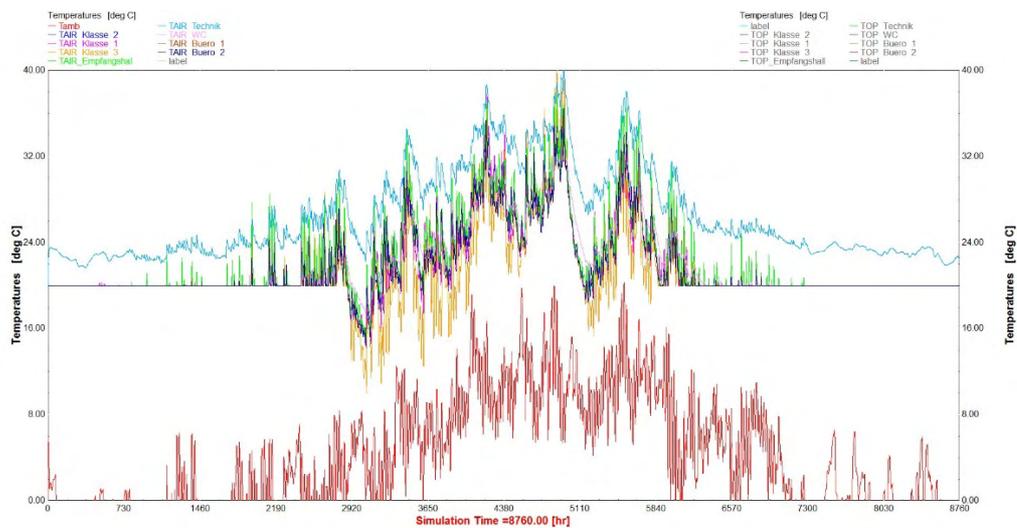


Abbildung 35 Standort Tromsø

Die Temperaturkurve des Standortes Rom weist eine deutlich andere Charakteristik auf als die Kurve des Standortes Lübeck. Sie ist gemäßiger, der Anstieg und Abstieg der Kurve ist flacher und es wird im Sommer viel wärmer. Die Heizlast ist in diesem Fall wesentlich niedriger, aber die Temperaturen sind von März bis Oktober nicht behaglich, sie erreichen weit über 40 °C. Anders ist es im Fall von Tromsø. Es ist allgemein kälter, was auch im Vergleich der Außentemperaturen (rot) zu sehen ist. Die Schwankungen fallen stärker aus und es wird teilweise im Sommer nicht warm genug im Gebäude. Die Heizperiode würde sich von September bis Juni ziehen.

Diese Ausführungen zeigen, dass nicht jedes Gebäude an einem beliebigen Standort gebaut werden kann. Jeder Standort bringt seine klimatischen Besonderheiten mit sich und das muss bei jedem Projekt miteinbezogen werden. Ein Gebäude wird selten an zwei so unterschiedlichen Standorten wie Lübeck und Tromsø baugleich errichtet. Der Fall, dass ein Typenbau geplant wird, welcher an unterschiedlichen Standorten in ganz Deutschland gebaut werden soll, ist jedoch realistisch. Die Miteinbeziehung des örtlichen Wetters trägt dazu bei, ein behagliches Raumklima zu schaffen. Außerdem können Bau- und Wartungskosten vermieden werden, indem durch Berücksichtigung des individuellen Klimas Parameter wie die Größe des Wärmespeichers oder die Dicke der Dämmschicht genauer bemessen werden können.

2.4. Weiterentwicklung des Gebäudes

In den Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine Änderung des Parameters Ausrichtung keinen entscheidenden Vorteil bei der Minimierung der Heizlast bringt. Die internen Lasten und die Lüftung sind voneinander abhängig und nicht änderbar, sofern sich nichts an der Personenzahl in den Räumen ändert. (Recknagel, Sprenger, & Schamek, 09/10) Ein großer Anteil der Heizlast entsteht zum einen durch das große, ungenutzte Volumen der Empfangshalle. Zum anderen sorgen die großen Fensterflächen für hohe Wärmeverluste und sind ebenfalls verantwortlich für die relativ hohe Heizlast.

Wird die Priorität auf den Erhalt der Architektur der Empfangshalle gelegt, sind die Möglichkeiten gering, die Heizlast zu senken. Deswegen wird im Folgenden untersucht, ob und wie sich eine Verkleinerung der Fensterflächen und des Volumens in der Empfangshalle auswirken. Sollte sich damit eine deutliche Verbesserung ergeben, ist es angebracht, die Prioritäten zu überdenken und eventuell die Halle als architektonisches Highlight aufzugeben, um dafür ein Gebäude ohne Heizung zu schaffen.

2.4.1. Vorstellung der neuen Kubatur

Für das Energiekonzept des Gebäudes ist eine PV-Anlage auf dem Dach geplant, dafür wird ausreichend Aufstellfläche benötigt. Um diese Fläche zu realisieren, wird von der ursprünglichen Variante abgewichen und ein neues Modell mit einem Schrägdach mit Südausrichtung entwickelt. Durch das Schrägdach entstehen abgeschlossene Lufträume über den Zonen. Dadurch sind die Zonen von der Außenluft abgeschirmt und somit nur verzögert den Einflüssen durch das Wetter ausgesetzt. Die Lufträume wirken wie ein Wärmespeicher und dienen somit als Puffer für die darunterliegenden Zonen. Damit wird ein Auskühlen im Winter verhindert, sowie ein Überhitzen im Sommer. Die Empfangshalle wird um einen unbeheizten Windfang im Eingangsbereich ergänzt, sodass sich das zu beheizende Volumen verkleinert. Des Weiteren entfällt ein Teil des Volumens im Obergeschoss. Die Fensterflächen in der Empfangshalle werden auf das nötigste reduziert. Es ist nur noch auf der Nordseite ein schmales, vertikales Lichtband vorhanden. Die Fensterflächen in den Büros und Klassenräumen wurden nicht verkleinert, da in diesen Räumen dem Einfall von ausreichend Tageslicht eine übergeordnete Bedeutung zugeordnet wird. Die neue Kubatur wird in den nachfolgenden Abbildungen verdeutlicht.

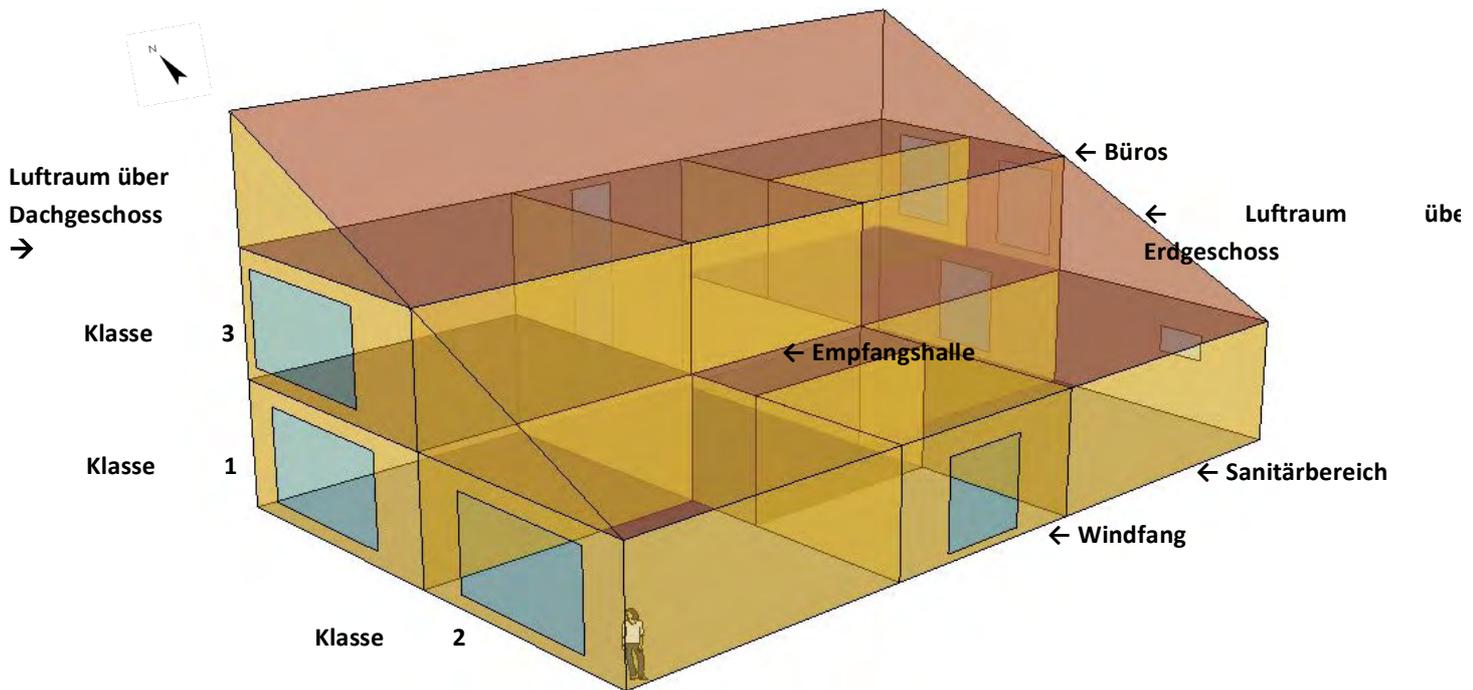


Abbildung 36 Neue Kubatur, Vorderansicht

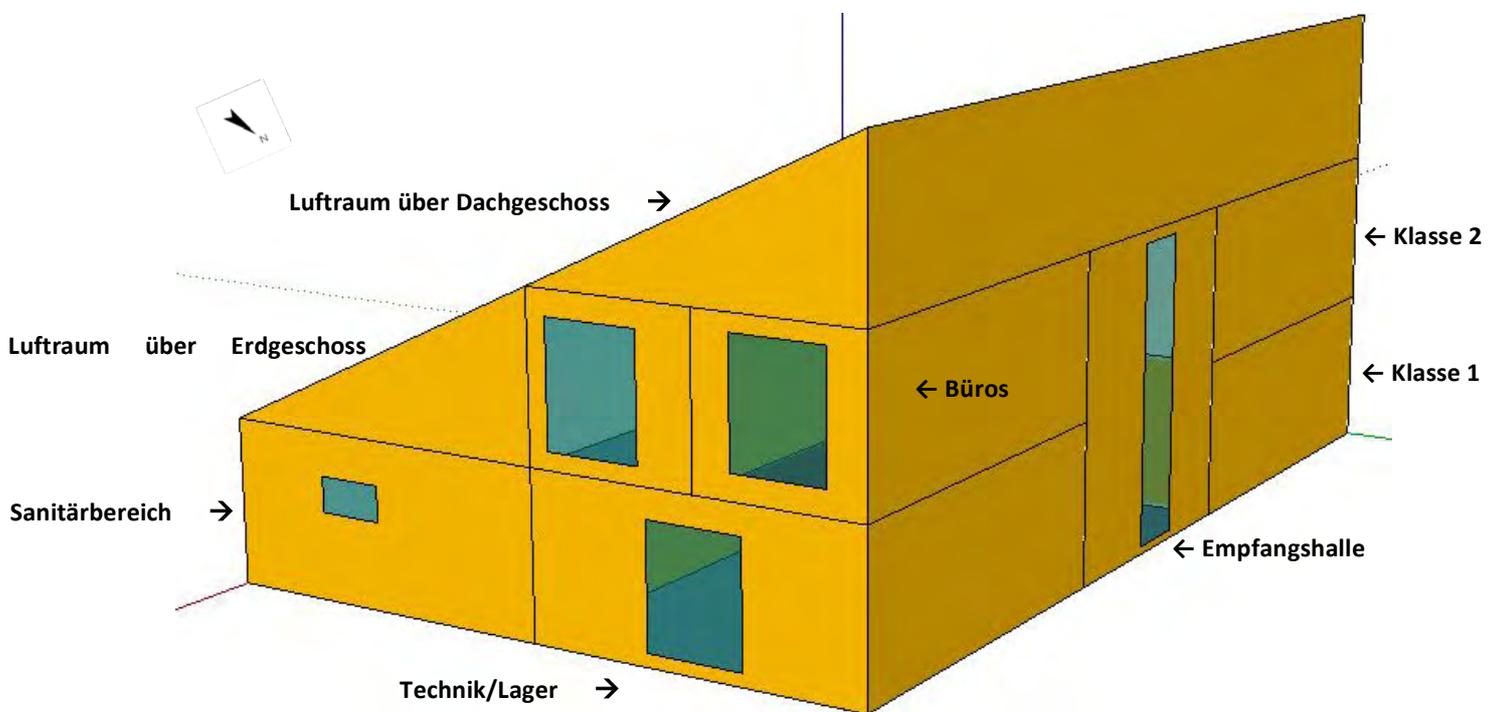


Abbildung 37 Neue Kubatur, Rückansicht

In dem folgenden Diagramm ist die Entwicklung der Raumtemperaturen im Rohgebäude (also ohne interne Lasten, Lüftung und Heizung) vor und nach der Weiterentwicklung dargestellt. Außerdem beinhaltet das Diagramm die Differenz der Tagesmittelwerte (grau). Die Differenz pendelt in der kalten Jahreszeit um den Nullpunkt, das heißt, die Temperaturverläufe liegen übereinander. In der ersten Jahreshälfte ist die Differenz allgemein höher als in der zweiten Jahreshälfte.

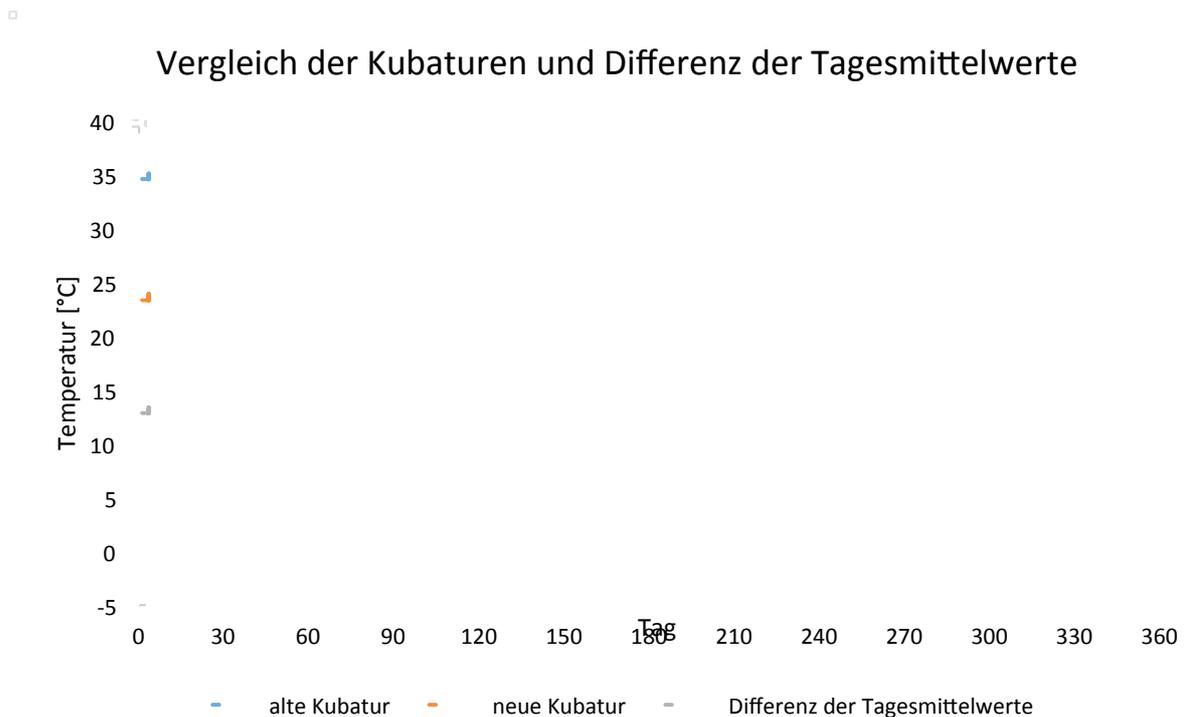


Abbildung 38 Raumtemperaturen beider Kubaturen im Rohgebäude

Bei dem Vergleich der blauen und der orangen Kurve sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Zum einen fällt auf, dass bei der neuen Kubatur die Temperaturschwankungen nicht mehr so stark ausfallen und die Kurve allgemein glatter ist. Im Winter herrschen gemäßigttere Temperaturen und im Sommer wird es nicht so warm wie bei der ursprünglichen Kubatur. Bei diesem Vergleich ist sehr gut zu sehen, dass eine Veränderung an der Architektur große Auswirkungen auf das Verhalten der Zonen hat. Vorher entzog das große Volumen der Empfangshalle die Wärme aus den umliegenden Zonen und verlor sie durch die großen Fensterflächen. Durch die Verkleinerung verringern sich nun die Verluste und die eingetragene Wärme kann gespeichert werden. Dadurch kommt es zu wesentlich geringeren Schwankungen. Einen weiteren Puffer gegen Auskühlung/Überhitzung stellen die beiden Lufträume zwischen dem Dach und den Räumen dar.

2.4.2. Anpassung der Lüftung

Die Untersuchungen aus Kapitel 2.3.3 ergaben, dass es Wärmegewinne durch interne Lasten gibt. Durch diese Lasten wird aber ein hoher Luftwechsel nötig, um für die nötige Raumluftqualität zu sorgen. Dadurch wird kalte Außenluft eingetragen und somit können die Zonen im Winter die Wärmegewinne nicht speichern. Im nächsten Schritt werden die internen Lasten auf das Gebäude mit der neuen Kubatur gegeben. Zusätzlich wurde ein Lüftungsgerät, wie es in Abbildung 39 zu sehen ist, mit einer Wärmerückgewinnung mit einem Wirkungsgrad von 85% in die Simulation integriert. Dadurch wird ermöglicht, dass die Wärmegewinne durch die internen Lasten im Gebäude genutzt werden. Das Lüftungsgerät besitzt keine Nacherwärmung. Das bedeutet, dass mit einem Wirkungsgrad von 85% die Wärme der Abluft aus den Räumen (Return air) im Wärmetauscher auf die nachströmende Außenluft (Outdoor air) übertragen wird. Die sich einstellende Temperatur dieser Zuluft wird wieder in die Räume geleitet (Supply air = ϑ_{HR}). Die behandelte Abluft der Räume geht als Fortluft (Exhaust air) aus dem Lüftungsgerät.

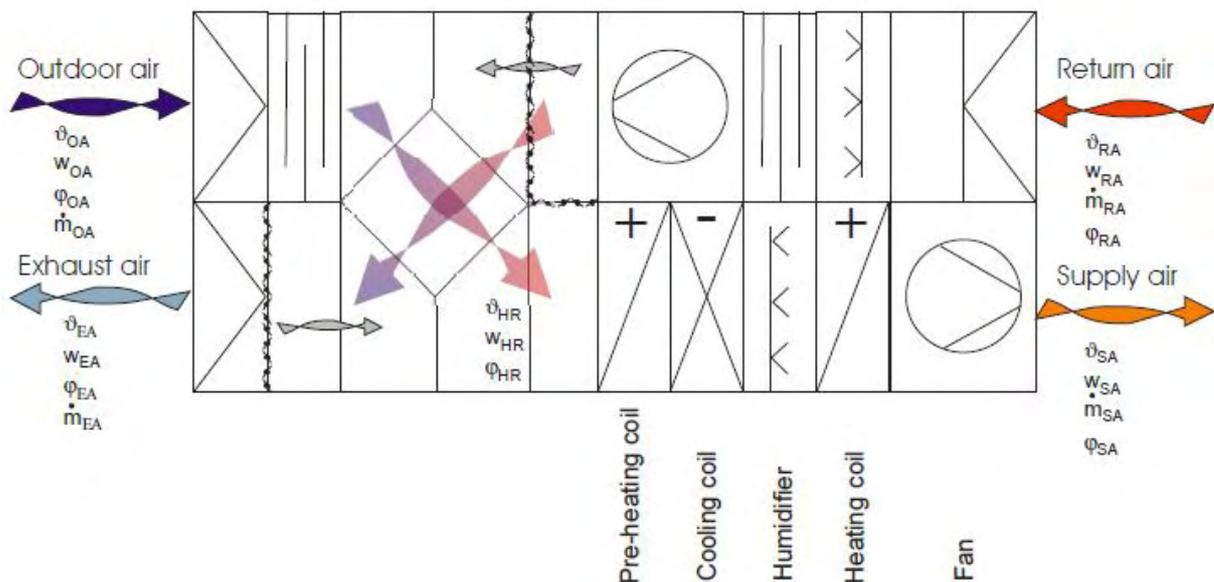


Abbildung 39 Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (TRNSYS 16 Manual Type 334)

Es ist möglich und sinnvoll, sich die Daten über die Temperaturen aus Außenluft, Abluft, Zuluft und Fortluft aus dem Lüftungsgerät ausgeben zu lassen. Somit lässt sich überprüfen, ob alle Einstellungen richtig vorgenommen worden sind.

In der nachfolgenden Abbildung 40 sind die Temperaturen der Außenluft, Zuluft, Abluft und Fortluft dargestellt. Der Wärmeübergang von der Abluft auf die Zuluft wird damit verdeutlicht.

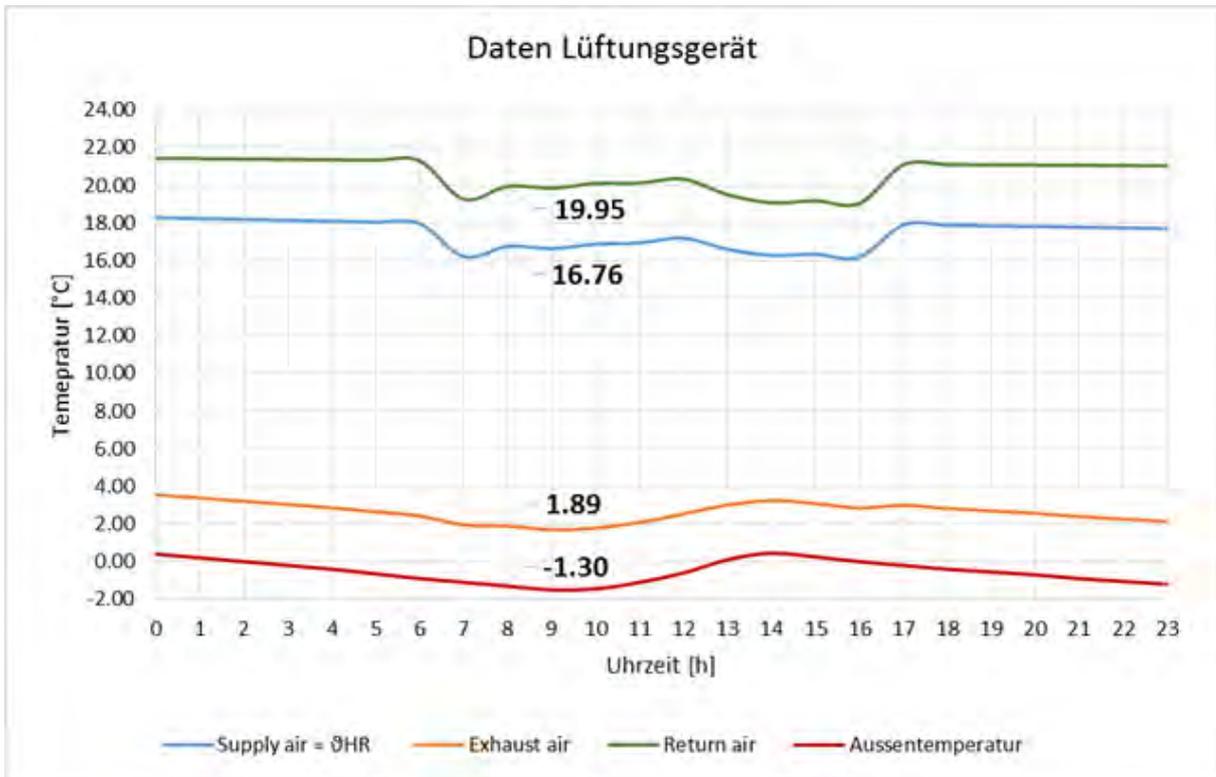


Abbildung 40 Daten aus dem Lüftungsgerät

In Abb. 40 sind die genannten Größen beispielhaft für den 8. Januar zu sehen. Aus ihnen lässt sich unter Verwendung der Gleichung für die thermische Effizienz des Wärmetauschers berechnen, ob die Ergebnisse plausibel sind.

$$\eta_t = \frac{t_{HR} - t_{Aussen}}{t_{Return\ air} - t_{Aussen}} * 100 \text{ (Recknagel, Sprenger, \& Schamek, 09/10)}$$

$$\eta_t = \frac{16,76 - (-1,30)}{19,95 - (-1,30)} * 100$$

$$\eta_t = 84,9\%$$

Aus dem Ergebnis wird deutlich, dass das Laufverhalten des Lüftungsgerätes mit der Parametrierung übereinstimmt. An Abb. 40 ist außerdem zu sehen, dass die frische Luft, mit der die Zonen versorgt werden, jetzt mit 16,76 °C anstatt mit -1,30 °C den Zonen bereitgestellt wird. Das ergibt für den beispielhaften Zeitschritt aus Abb. 40 einen Unterschied von $\Delta t_{Luft} = 18,06$ K für die Zuluft und entspricht somit einer vermiedenen Heizlast von:

$$Q = (V_{Luft} * \rho_{Luft}) * c_{Luft} * \Delta t_{Luft} \quad \text{mit } \rho_{Luft} = 1,02 \frac{kg}{m^3}; c_{Luft} = 1,005 \frac{kJ}{kg * K}; V_{Luft} = 1638 m^3$$

$$Q = 8,4 kWh$$

Das Lüftungsgerät erhält für jede Zone eine individuelle Regelung, nach der nur gelüftet wird, solange Personen anwesend sind. Damit ergibt sich für die Raumtemperaturen folgende Abb. 41:

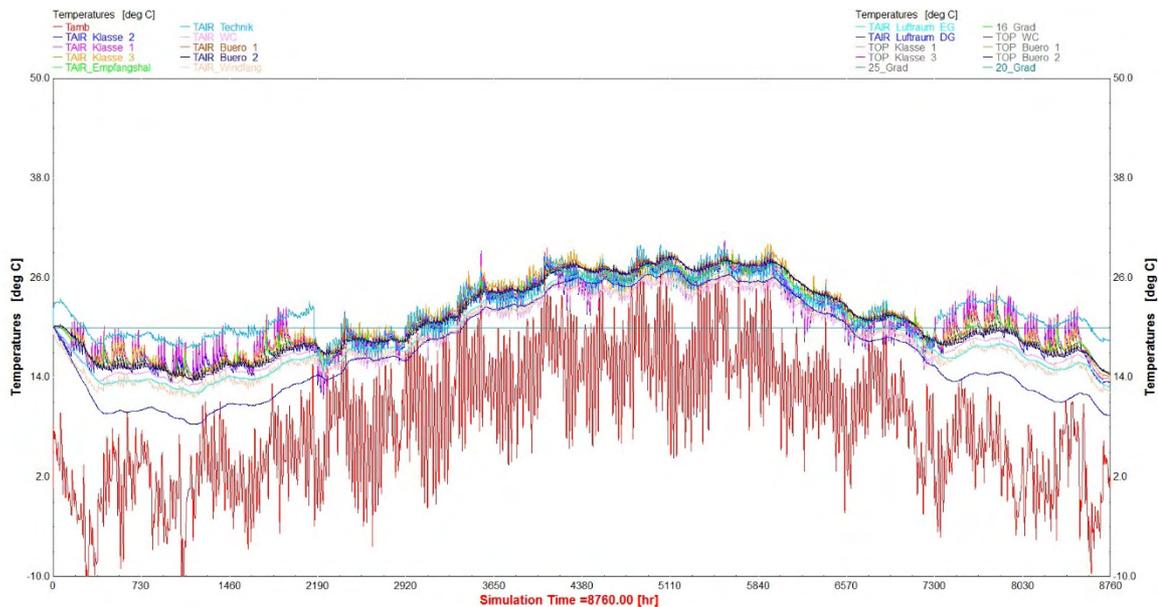


Abbildung 41 Raumtemperaturen der neuen Kubatur mit internen Lasten und WRG

Zur Verdeutlichung ist in Abb. 41 eine Horizontale eingeblendet, welche die y-Achse bei 20 °C schneidet. Es ist erkennbar, dass die Temperaturen sich im Winter nur knapp unter der 20 °C-Linie bewegen und schon im März teilweise die gewünschte Temperatur erreicht wird. Die Wärmegewinne können somit auch besser gespeichert werden und es tritt keine so extreme Nachtauskühlung ein, wie in der Variante ohne Lüftungsgerät.

2.4.3. Berechnung der verbleibenden Heizlast

Das Lüftungsgerät trägt deutlich zur Reduzierung der Heizlast bei. Da zum Erreichen der Solltemperatur von 20 °C immer noch Wärme fehlt, ergibt sich eine restliche Heizlast, welche analog zu Kapitel 2.3.4 berechnet wird. Dafür werden in den Zonen wieder die Heiztemperaturen eingestellt. Es ergibt sich damit folgende Abb. 42 für die Heizlast, sowie die Heizarbeit.

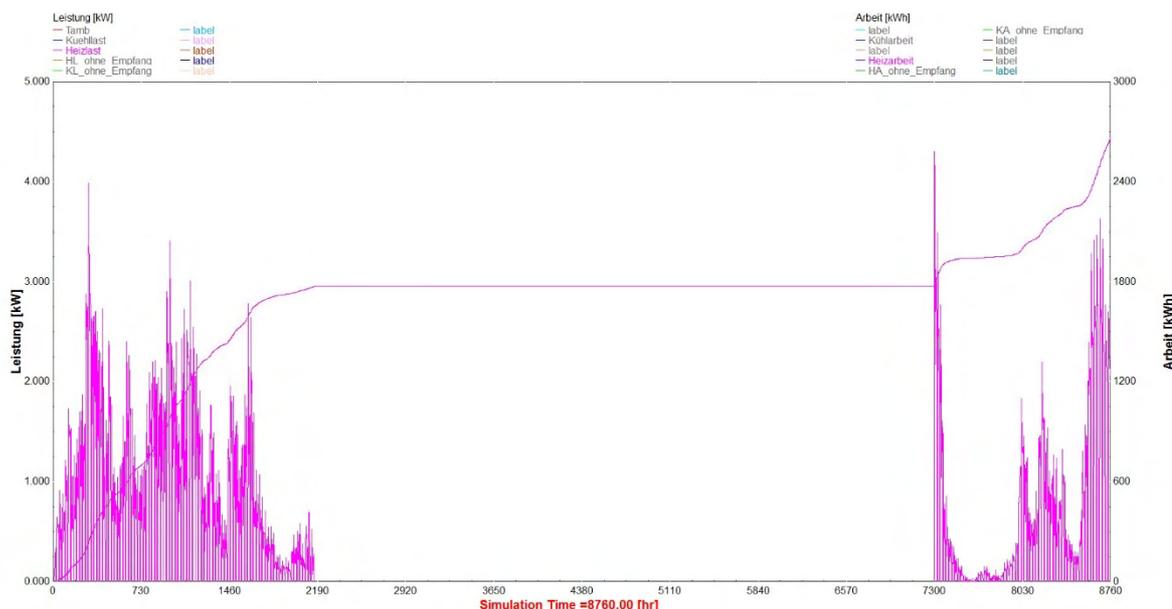


Abbildung 42 Heizlast und Heizarbeit der neuen Kubatur mit internen Lasten und Lüftungsgerät

Auch hier ist wieder die Heizarbeit als pinke Summenlinie zu sehen, sie beträgt 2657 kWh. Die Heizlast erreicht maximal 4,3 kW. Es wird deutlich, dass die Wärmerückgewinnung sich positiv auf die Minimierung der Heizarbeit auswirkt.

2.4.4. Behaglichkeit im Gebäude

Das Gebäude weist nur noch einen geringen Wärmemengenbedarf auf. Doch es darf nicht aus dem Blick verloren werden, dass das Gebäude auch benutzbar sein, also „funktionieren“, soll. Bei Betrachtung der Sommermonate in Abbildung 41 fällt auf, dass die Temperaturen von August bis Oktober dauerhaft über 26°C steigen. Bei der Planung der technischen Gebäudeausrüstung ist es üblich, diese Temperatur als Kühlgrenze festzulegen, um die Behaglichkeit im Gebäude zu garantieren. Daraus wird dann analog zur Heizlast die Kühllast ermittelt. Da Kühlen anlagentechnisch gesehen wesentlich aufwendiger als Heizen ist, hat die Vermeidung von Kühllast eine höhere Priorität als die Heizlast. In dieser Arbeit ist der Fokus auf eine technikfreie Planung mit einem ganzheitlichen Ansatz gelegt worden. Deswegen wird im folgenden Schritt durch eine natürliche sommerliche Nachtlüftung die Kühllast minimiert. Dabei wird ein erhöhter Luftwechsel für die

Zonen, die zu warm werden, angenommen, sobald keine Nutzung mehr im Gebäude stattfindet. Des Weiteren ist eine Bedingung, dass die Außentemperatur niedriger als die Raumtemperatur ist, damit eine Senkung der Raumtemperaturen stattfinden kann. Nun wird außerdem die Funktion der Lufträume zwischen dem Dach und den Zonen als Puffer näher betrachtet. Im Sommer wird hier nachts ebenfalls durch den erhöhten Luftwechsel abgekühlt. Sobald die Außentemperatur über den Wert der Raumtemperatur steigt, erfolgt kein Luftwechsel. Dadurch sind die Lufträume abgeschlossen und wirken wie eine Art Kühlkissen, das auf dem Gebäude liegt. Die tagsüber entstehende Wärme der Räume, die natürlicherweise aufsteigt, wird langsam von den Lufträumen aufgenommen und sorgt dafür, dass die Räume sich nur mäßig aufwärmen.

Nachfolgend wird in Abb. 43 für diesen Fall die Entwicklung der Raumtemperaturen dargestellt:

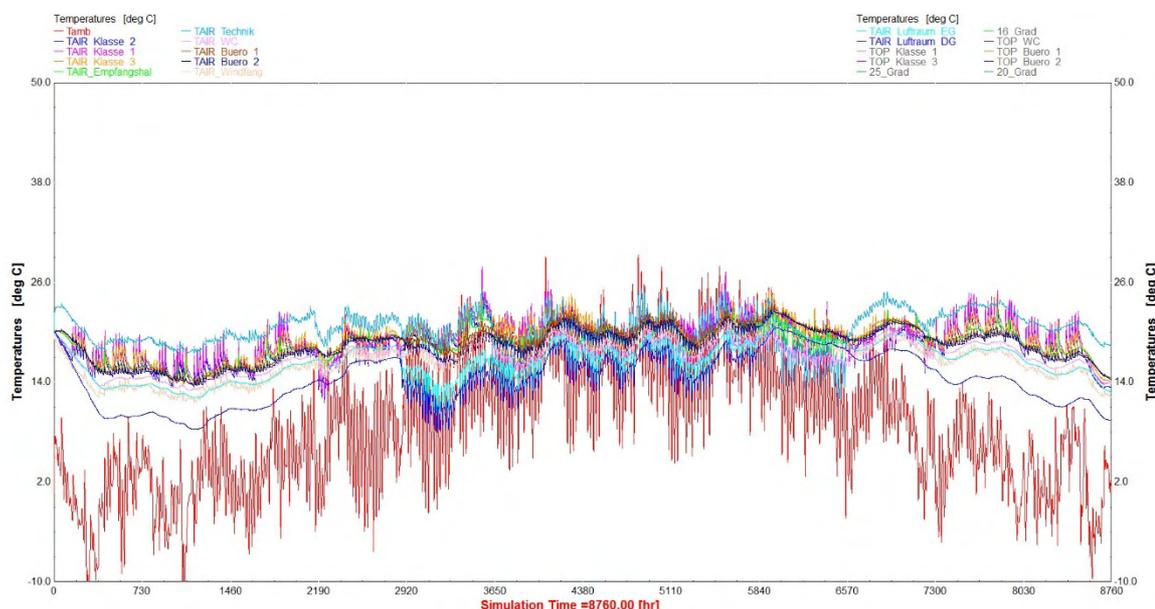


Abbildung 43 Entwicklung der Raumtemperaturen mit sommerlicher Nachtlüftung

Die Lufttemperaturen der Lufträume (dunkelblau und türkis) sinken durch die sommerliche Nachtlüftung in einen Bereich zwischen 8 - 20 °C und beeinflussen damit alle anderen Räume. In den genutzten Räumen steigt die Temperatur während der Nutzungszeit nicht über 26 °C und sinkt nicht unter 17 °C. Somit herrschen auch im Sommer angenehme Raumtemperaturen.

In den folgenden Abbildungen ist das Gebäude zu verschiedenen Uhrzeiten jeweils mit und ohne Luftwechsel in den Zwischenräumen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Klassen und Büros ohne Lüftung der Zwischenräume schon morgens, bevor die Nutzung beginnt, Temperaturen um die 22 °C erreichen. Mit Lüftung weisen die Zwischenräume sehr niedrige Temperaturen auf und die übrigen Räume bewegen sich ebenfalls bei moderaten Temperaturen von 17 - 20 °C. Bereits zur Mittagszeit treten ohne die Nachtlüftung sehr hohe Temperaturen von 23 - 25 °C in den Zonen auf.

Mit Nachtlüftung bewegen sich die Temperaturen immer noch in einem behaglichen Bereich zwischen 19 - 22 °C. Es ist auch zu sehen, dass die Lufträume immer noch sehr niedrige Temperaturen zwischen 14 - 16 °C aufweisen und somit noch genügend Kapazität haben, um die Abwärme der Zonen bis zum Nachmittag aufzunehmen. Am späten Nachmittag müssten ohne Lüftung der Zwischenräume bereits alle Zonen gekühlt werden, da die Temperatur in jedem Raum 26 °C erreicht hat. Mit Lüftung weisen alle Zonen moderate Temperaturen von 20 - 23 °C auf und die Lufträume haben immer noch Temperaturen von 14 - 16 °C. Dies wird in den nachfolgenden Abbildungen verdeutlicht.

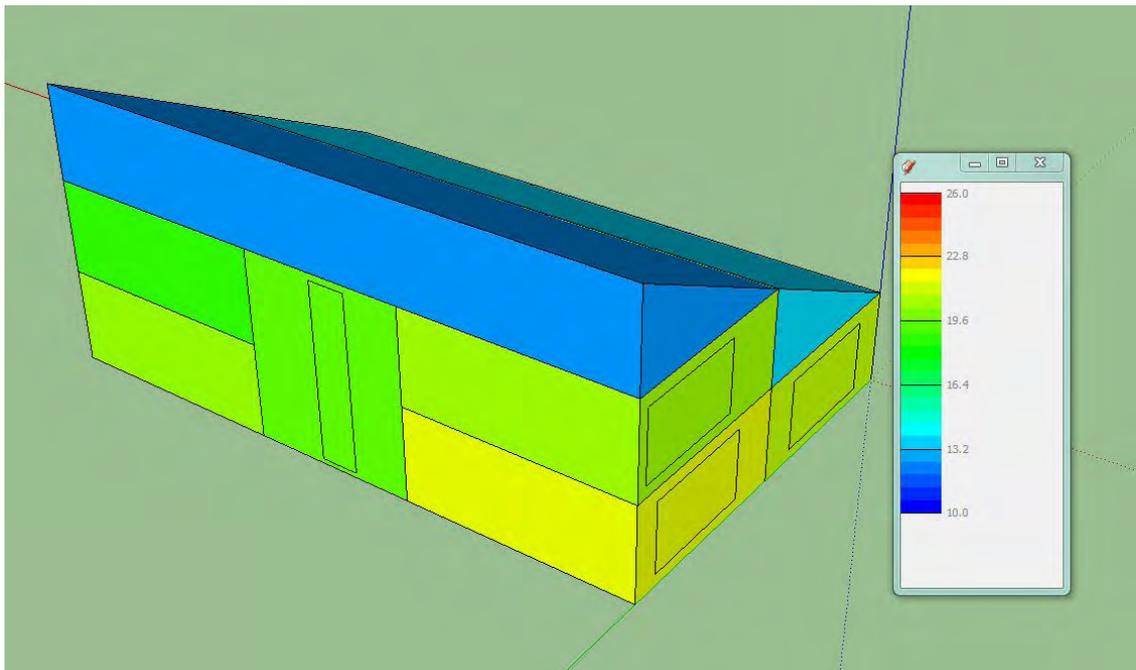


Abbildung 44 22. Juni, 4.00 Uhr morgens, mit Lüftung der Zwischenräume

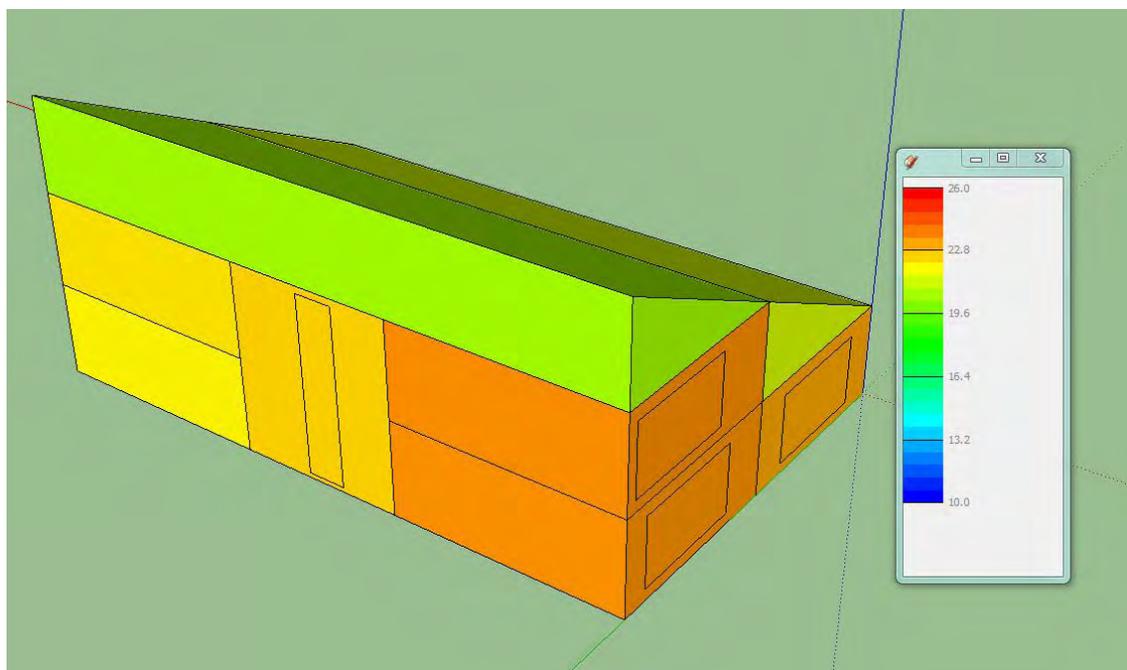


Abbildung 45 22. Juni, 4.00 Uhr morgens, ohne Lüftung der Zwischenräume

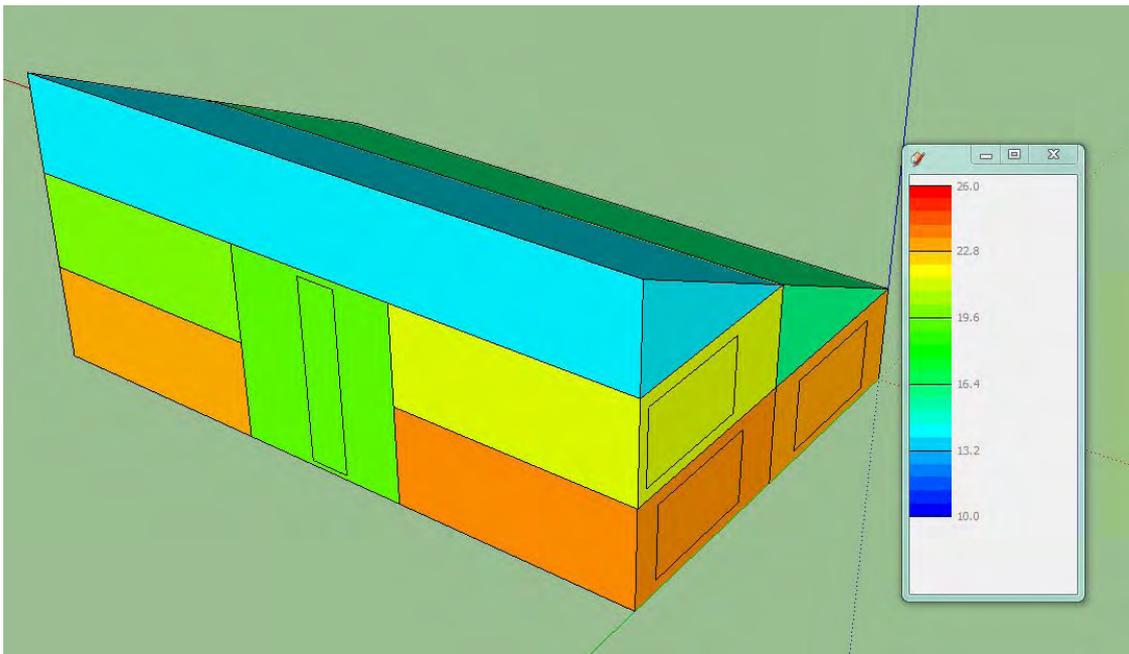


Abbildung 46 22. JUNI, 12.00 Uhr mittags, mit Lüftung der Zwischenräume

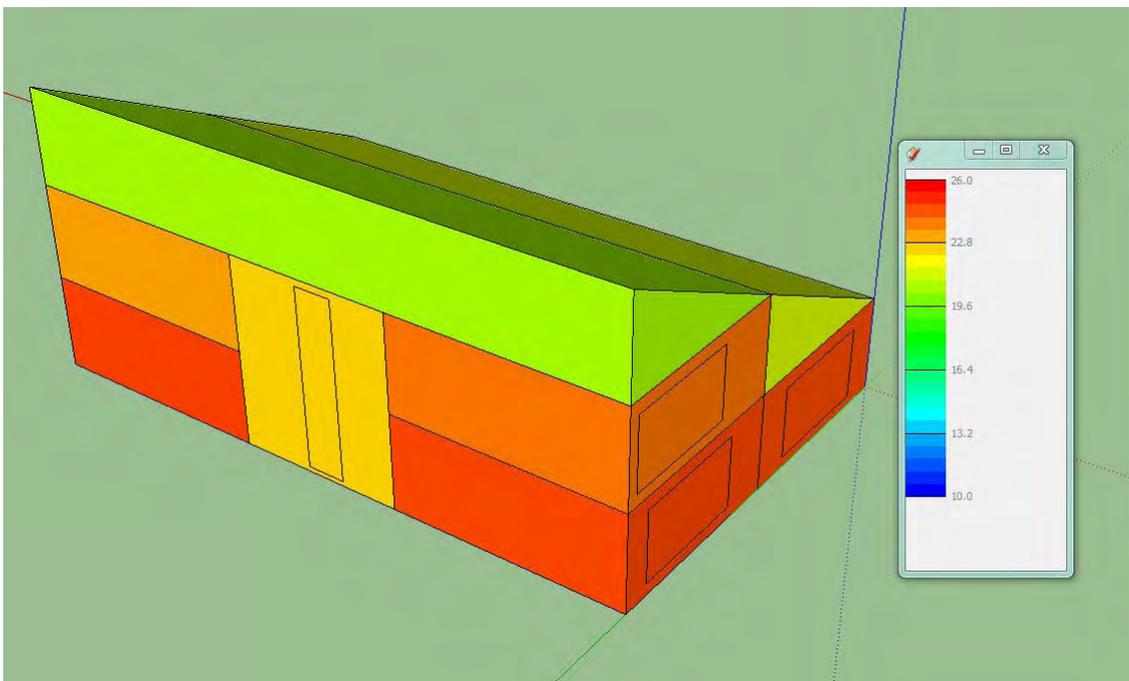


Abbildung 47 22. Juni, 12.00 UHR mittags, ohne Lüftung der Zwischenräume

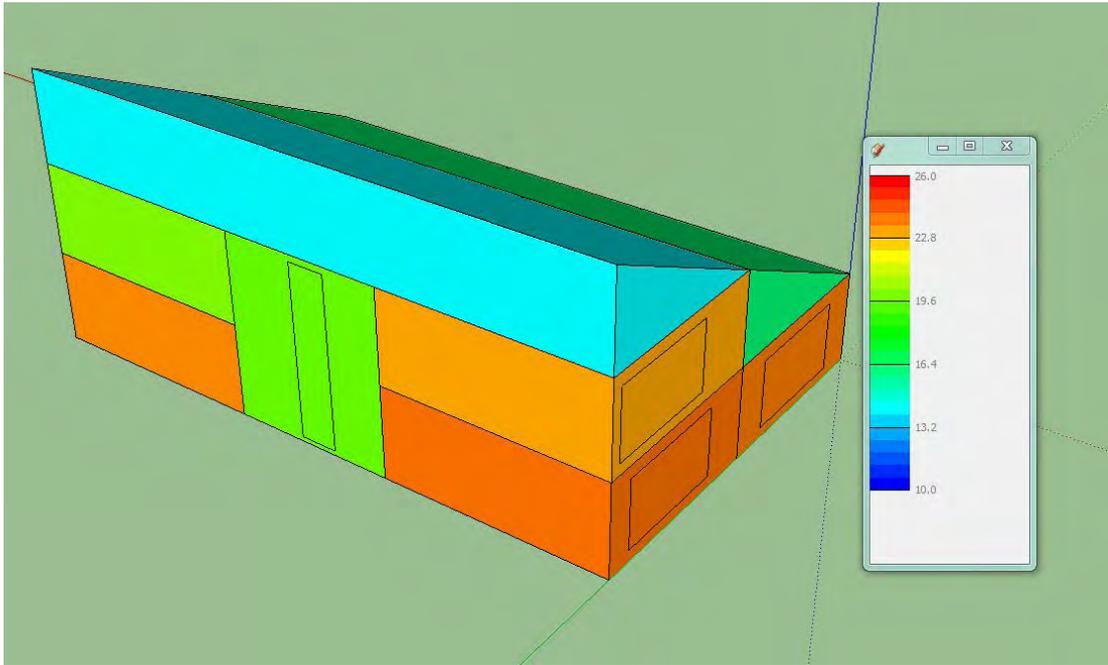


Abbildung 48 22. Juni, 15.00 Uhr Nachmittags, mit Lüftung der Zwischenräume

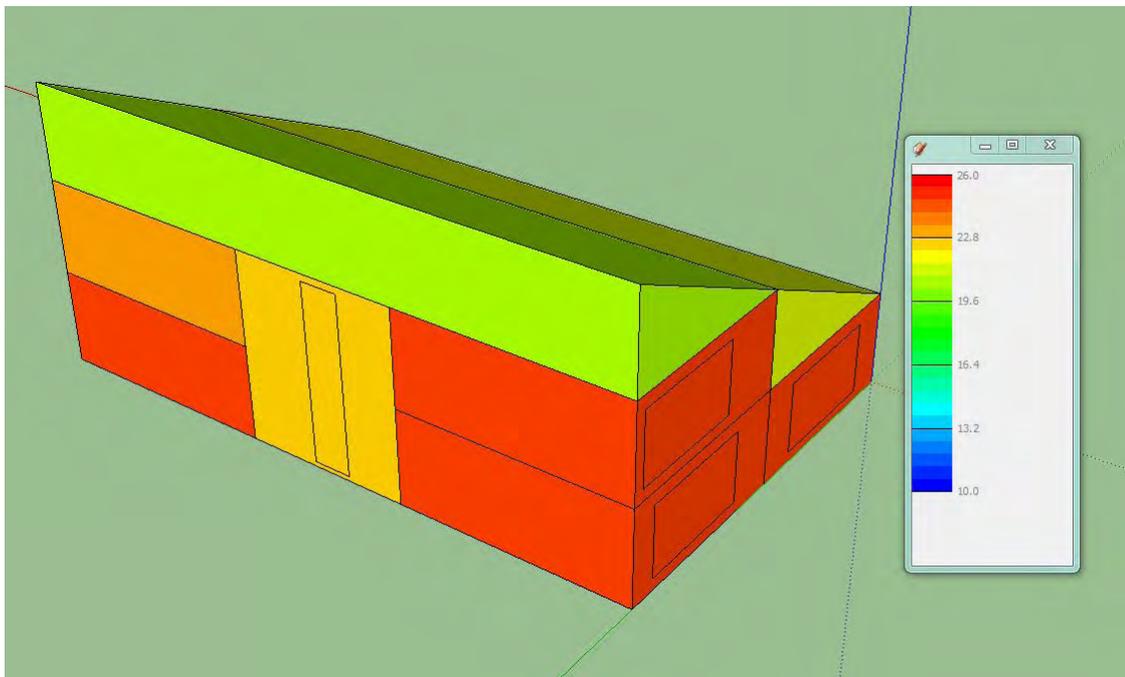


Abbildung 49 22. Juni, 15.00 Uhr Nachmittags, ohne Lüftung der Zwischenräume

3. Fazit

Es wurden thermische Gebäudesimulationen für ein Gebäude mit zwei unterschiedlichen Kubaturen gerechnet. In der ursprünglichen Variante hat das Gebäude ein Flachdach und große Fensterflächen an den Außenwänden der Empfangshalle. Es wurde untersucht, wie sich das Gebäude unter dem Einfluss der internen Lasten und der Lüftung bei unterschiedlichen Ausrichtungen, Fenstern und Standorten verhält. In der weiterentwickelten Variante wurde das Dach als Schrägdach geplant und in das Simulationsprogramm eingelesen. Dadurch entstanden Lufträume zwischen den Räumen und dem Dach, die als Puffer gegen Auskühlung und Überhitzung dienen. Das Volumen der Empfangshalle konnte reduziert werden. Auch die Fensterfläche der Empfangshalle wurde verkleinert. Bei der Weiterentwicklung wurde außerdem ein Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung in das Gebäude eingeplant, um das Gebäude im Winter mit vorgewärmter Frischluft anstatt mit Außenluft zu versorgen. Im Ergebnis kommt die weiterentwickelte Variante dem Ziel eines Gebäudes ohne Heizung deutlich näher. Mit der Weiterentwicklung konnte die Heizarbeit von 18937 kWh auf 2657 kWh und somit um 86 % reduziert werden.

Im Ergebnis zeigt sich, dass durch die Verfolgung eines ganzheitlichen, konzeptionellen Ansatzes bei der Planung ein funktionierendes Gebäude ohne Heizung entstehen kann. Es verbleibt ein geringer Anteil an Heizlast, welcher gedeckt werden muss. Dafür kann im Weiteren die Überlegung für ein Energiekonzept angestellt werden, welches diesen Wärmebedarf regenerativ deckt. Aber nicht nur Neubauten, die sich in einem frühen Planungsstadium befinden, können ohne Heizung geplant werden. Auch für Bestands- und Sanierungsobjekte kann mittels einer dynamischen Systemsimulation ein Konzept zur dezentralen, regenerativen Energieversorgung entwickelt werden. Somit kann ein von fossilen Energien autarkes Gebäude geschaffen werden und ein nachhaltiger Beitrag zum ökologischen Planen, Bauen, Wohnen und Leben geschaffen werden und der Einsatz von Primärenergie zur Gebäudeheizung auf ein Minimum gesenkt werden.

4. Zusammenfassung

Die Bachelorarbeit „Zurück in die Zukunft – Verzicht auf Technik, Ein Beitrag zur Entwicklung eines funktionierenden Gebäudes ohne Heizung durch konzeptionelle Planung mit Hilfe transienter Gebäudesimulation“ ist die schrittweise Darstellung einer Gebäudeplanung mit der Simulationssoftware TRNSYS als Werkzeug. Das Ziel der Planung ist die Minimierung des Heizwärmebedarfs und damit die Senkung des Primärenergiebedarfes, sowie die Schaffung eines behaglichen Raumklimas. Das Beispielprojekt bildet ein Neubau auf einem Hochschulcampus in Lübeck.

Im ersten Abschnitt der Arbeit findet sich eine historische Betrachtung des Themas Bauen, Heizen und Lüften, danach folgt eine Begriffsklärung. Des Weiteren wird das Simulationsprogramm TRNSYS, sowie die Auswertung von Simulationsergebnissen vorgestellt. Es wird auf die Funktionsweise von Gebäuden eingegangen und die Behaglichkeitskriterien erläutert. Dabei wird die Bedeutung der Raumtemperatur, sowie deren Entstehung erläutert.

Für das Gebäude wurden nacheinander die Parameter Wandaufbau, interne Lasten, Lüftung, Ausrichtung, Fenster und Standort festgelegt und anschließend variiert, um das Verhalten der einzelnen Zonen im Gebäude auf Veränderung der Parameter zu ermitteln. Somit konnte mit Hilfe der Simulation festgelegt werden, wo sich die Stellschrauben des Systems befinden. Nicht veränderbare Parameter stellten die internen Lasten und die davon abhängige Luftmenge dar. Da es sich um ein Lerngebäude handelt, muss die Bereitstellung von Frischluft stets gewährleistet sein, um Konzentrationsschwächen durch einen zu hohen CO₂-Gehalt auszuschließen. Es wurde festgestellt, dass dadurch ein durch die Personenanzahl bedingter, hoher Luftwechsel nötig wurde und durch den Eintrag kalter Außenluft ein großer Teil der Heizlast verursacht wird. Die große Empfangshalle stellte sich als Hauptverursacher der Heizarbeit heraus. Das große Volumen und die großen Fensterflächen sind für hohe Wärmeverluste verantwortlich.

Im nächsten Schritt wurde die Kubatur des Gebäudes verändert. Das Volumen der Empfangshalle wurde deutlich verringert und es entstanden durch ein Schrägdach ungenutzte Lufträume. Diese wirken wie ein Wärmespeicher, der als Puffer dem Auskühlen entgegengewirkt. Durch einen erhöhten Luftwechsel im Sommer bei Nacht wird eine Auskühlung erwirkt und ein Überhitzen aller Zonen im Sommer verhindert. Somit sind sie ein wichtiger Bestandteil für die Behaglichkeit des Gebäudes. Durch die Ergänzung eines Lüftungsgerätes mit Wärmerückgewinnung wurde die Heizlast um 86 % gesenkt und das Ziel, ein funktionierendes Gebäude ohne Heizung zu planen, erreicht.

5. Literaturverzeichnis

- Aschaber, J., Hiller, M., & Weber, R. (2008). *TRNSYS 17: Das 3D-Strahlungsmodell*. Stuttgart: TRANSSOLAR Energietechnik GmbH.
- Henke, W. (1999). *Stammesgeschichte des Menschen. Eine Einführung*. Berlin: Springer Verlag.
- Hepper, E. (23. 7 2015). *Deutschland Radio Kultur*. Von http://www.deutschlandradiokultur.de/architektur-bezaubernder-baustoff-beton.1270.de.html?dram:article_id=326201 abgerufen
- Herschberger, B. (2015). *Baubiologie*. Von Baubiologie-umweltanalytik.de: <http://baubiologie-umweltanalytik.de/tag/klassenzimmer/> abgerufen
- Hottgenroth. (kein Datum). *Anlagentechnik für Energieberater Kompendium*. Köln: Hottgenroth Software GmbH & Co. KG ETU Software GmbH.
- InformationsZentrum Beton GmbH. (8. August 2016). *Beton*. Von <https://www.beton.org/wissen/betonbautechnik/geschichte-des-betons/> abgerufen
- Laible, J. (6 2012). Die Geschichte der dezentralen Lüftung. *Sanitär + Heizungstechnik*, S. 38-41.
- Meschede, D. P. (2010). *Gerthsen Physik*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Partsch, S. (1999). *Wie die Häuser in den Himmel wuchsen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Recknagel, Sprenger, & Schamek. (09/10). *Taschenbucht für Heizung + Klimatechnik*. München: Oldenburg Industrieverlag.
- Schulz, H. (8. August 2016). <http://www.schnelle-online.info/>. Von <http://www.schnelle-online.info/Arbeitstage-Lehrer.html?state=HH&arbeitstag=0&arbeitstag=1&arbeitstag=2&arbeitstag=3&arbeitstag=4&ferienfrei=true&verschiebbare=schule&samvorferien=frei&samnachferien=frei&from=01.01.2015&to=31.12.2015#ergebnis> abgerufen
- Specht, P.-I. E. (2005). *Der Mensch als wärmetechnisches System*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik.
- TRNSYS 16 Manual Type 334. (kein Datum). Type 334 - Air handling unit with sensible and latent heat recovery.
- TRNSYS manual. (2014). TRNSYS Manual Volume 1 - Getting started. Wisconsin-Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Willig, H. P. (8. September 08.09.2010). Wie der Mensch die Erde eroberte. *GEO Kompakt*.

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Terra amata: ca. 400000 v.Chr., Rekonstruktionszeichnung (Willig, 08.09.2010)	5
Abbildung 2 Kolosseum, Rom, 80 n.Chr. Abbildung 3 Heydar Aliyev center, baku, 2014 (Hepper, 2015).....	6
Abbildung 4 Rekonstruktion eines römischen Hypokausten (Hottgenroth)	7
Abbildung 5 Google Sketch-Up-Modell des geplanten Neubaus Vorderseite.....	11
Abbildung 6 Sketchup-Modell des geplanten Neubaus, Rückseite	11
Abbildung 7 Anwesenheit (blau) und Außentemperatur (rot) über eine Woche	12
Abbildung 8 Anwesenheit (blau) und Außentemperatur (rot), kritische Phasen (gelb).....	13
Abbildung 9 Wärmeabgabe Mensch (75 Kilo) (Specht, 2005).....	14
Abbildung 10 Vergleich interner Lasten	15
Abbildung 11 Behaglichkeitsfeld empfundene Temperatur in Räumen (Specht, 2005)	17
Abbildung 12 Behaglichkeit Raumlufttemperatur/Luftgeschwindigkeit (Specht, 2005).....	18
Abbildung 13 Behaglichkeitsempfinden relative Raumluftfeuchtigkeit (Specht, 2005).....	18
Abbildung 14 Aussenwandaufbau.....	19
Abbildung 15 Innenwandaufbau	19
Abbildung 16 Aufbau Zwischendecke	19
Abbildung 17 Raumtemperaturen ohne interne Lasten	20
Abbildung 18 Raumtemperaturen mit internen Lasten	22
Abbildung 19 Raumtemperaturen mit internen Lasten und Luftwechsel.....	24
Abbildung 20 Vergleich der Temperaturen unter verschiedenen Lastannahmen	25
Abbildung 21 Temperaturen mit eingeschalteter Heizung	26
Abbildung 22 Heizlast und Heizarbeit	27
Abbildung 23 Heizarbeiten der einzelnen Zonen	28
Abbildung 24 Das Gebäude jeweils um 9.00, 12.00 und 15.00 Uhr am 21. Dezember.....	29
Abbildung 25 Das Gebäude jeweils um 9.00, 12.00 und 15.00 uhr am 21. Juni	29
Abbildung 26 Vergleich Heizarbeiten	30
Abbildung 27 Vergleich unterschiedlicher Verglasungen.....	32
Abbildung 28 Fc-Werte verschiedener Sonnenschutzvorrichtungen [DIN 4108].....	33
Abbildung 29 Vergleich unterschiedlicher externer Verschattungsfaktoren	34

Abbildung 30 Heizlasten nach Anpassung der Fenster	35
Abbildung 31 Temperatur, Wandtemperatur und empfundene Temperatur im Januar in der Empfangshalle ...	37
Abbildung 32 Heizarbeiten an unterschiedlichen Standorten	38
Abbildung 33 Standort Lübeck	39
Abbildung 34 Standort Rom	39
Abbildung 35 Standort Tromsø	39
Abbildung 36 Neue Kubatur, Vorderansicht	42
Abbildung 37 Neue Kubatur, Rückansicht	42
Abbildung 38 Raumtemperaturen beider Kubaturen im Rohgebäude	43
Abbildung 39 Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (TRNSYS 16 Manual Type 334)	44
Abbildung 40 Daten aus dem Lüftungsgerät	45
Abbildung 41 Raumtemperaturen der neuen Kubatur mit internen Lasten und WRG	46
Abbildung 42 Heizlast und Heizarbeit der neuen Kubatur mit internen Lasten und Lüftungsgerät	47
Abbildung 43 Entwicklung der Raumtemperaturen mit sommerlicher Nachtlüftung	48
Abbildung 44 22. Juni, 4.00 Uhr morgens, mit Lüftung der Zwischenräume	50
Abbildung 45 22. Juni, 4.00 Uhr morgens, ohne Lüftung der Zwischenräume	50
Abbildung 46 22. JUNI, 12.00 Uhr mittags, mit Lüftung der Zwischenräume	51
Abbildung 47 22. Juni, 12.00 UHR mittags, ohne Lüftung der Zwischenräume	51
Abbildung 48 22. Juni, 15.00 Uhr Nachmittags, mit Lüftung der Zwischenräume	52
Abbildung 49 22. Juni, 15.00 Uhr Nachmittags, ohne Lüftung der Zwischenräume	52
Tabelle 1 Studienplan der Zonen	21
Tabelle 2 Eingestellter Luftwechsel in den einzelnen Zonen.....	23
Tabelle 3 Eingestellte Heiztemperatur in den einzelnen Zonen.....	26
Tabelle 4 Auflistung der U- und g-Werte der Fenster	31

Eidesstattliche Erklärung zur Bachelorarbeit

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Die vorliegende Bachelorarbeit, darf in der Bibliothek der Fakultät Life Sciences der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg ausgelegt werden, davon ausgenommen ist die CD-Rom, auf der sich die Anhänge befinden. Ich bin damit einverstanden, dass diese Arbeit Interessenten auch auf elektronischem Weg z.B. im Internet zugänglich gemacht wird.

Ort

Datum

Unterschrift