

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Thermische Simulation eines Wohn- und Bürogebäudes als Grundlage für
die Entwicklung eines Energiekonzepts mit Schwerpunkt eines behaglichen
Raumklimas

Bachelorarbeit

Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Dmitriy Pavlov



Abgabedatum: 18.01.2021

1. Gutachterin: Dr.-Ing. Dagmar Rokita (HAW Hamburg)
2. Gutachterin: B. Sc. Martje Peters (Freie Ingenieure Langer Schwerdtfeger Partnerschaft Beratender Ingenieure mbH)

Abstract

Die vorliegende Arbeit „Thermische Gebäudesimulation eines Wohn- und Bürogebäudes als Grundlage für die Entwicklung eines Energiekonzepts mit Schwerpunkt eines behaglichen Raumklimas“ stellt die Gebäudeplanung eines realen Bauvorhabens mithilfe einer TRNSYS-Simulation dar. Das Ziel der Planung ist die Erreichung eines behaglichen Raumklimas und die Minimierung des Energiebedarfs für die Heizung/Kühlung.

Der erste, theoretische Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Begriffsklärung um das Thema Raumklima und Gebäudefunktion. Es wird erläutert, was ein behagliches Raumklima ist und wie das bewertet werden kann. Dabei wird der Einfluss der Raumtemperatur auf das Raumklima verdeutlicht. Als Bewertungskriterium des behaglichen Raumklimas wird in der Arbeit die Anzahl der Übertemperaturgradstunden gewählt. Außerdem wird die Betrachtung des Themas Heizen und Kühlen vorgestellt.

Im nächsten Teil der Arbeit wird das Simulationsprogramm TRNSYS sowie das Gebäude vorgestellt. Als Grundlage für die thermische Simulation wird das 3D-Gebäudemodell, das insgesamt aus 30 thermischen Zonen besteht, verwendet. Die Besonderheit des betrachteten Gebäudes liegt daran, dass das Gebäude drei unterschiedliche Nutzungsbereiche aufweist: Im Erdgeschoss befindet sich der Gastronomiebereich, für das erste und zweite Obergeschoss ist eine Büronutzung geplant und in dem dritten und vierten Obergeschoss befindet sich der Wohnbereich. In der Simulation werden die internen Lasten betrachtet, die für jeden Nutzungstyp einzeln bestimmt werden. Außerdem werden in diesem Teil der Aufbau der Simulation, Nutzungsprofile der Zonen und die Bauteile vorgestellt.

Im letzten Teil der Arbeit werden die unterschiedlichen Varianten zur Minimierung des Primärenergiebedarfs zur Gebäudeheizung und Gebäudekühlung untersucht. Für das Gebäude werden die Lüftung, Fenstertypen, Verschattungsanteil und Heizung variiert, um den Einfluss auf das Gebäudeverhalten zu ermitteln. In der letzten Variante werden die Maßnahmen miteinander kombiniert, um das behagliche Raumklima im Gebäude aufrechtzuerhalten und somit den Energieaufwand zu minimieren.

Danksagung

Zu Beginn möchte ich ganz herzlich Sarah Schwerdtfeger und Franziska Lager dafür danken, dass sie mir die Möglichkeit gegeben haben meine theoretischen Kenntnisse praktisch umzusetzen, für ihre Ideen und ihre Unterstützung.

Des Weiteren möchte ich meine Betreuerin Martje Peters bedanken. Ohne ihre Unterstützung und Hilfsbereitschaft wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen. Außerdem gilt mein Dank meiner Betreuerin Dr.-Ing Dagmar Rokita für die Anmerkungen und Hinweise.

Ich bedanke mich bei meinem Praxisbetreuer Tristan Ahrendt für die hilfreiche Ratschläge und Hilfe während des Praxissemesters und meiner Bachelorarbeit. An dieser Stelle möchte ich dem gesamten Team der Freie Ingenieure für die interessante und vielfältige Aufgaben und für die tolle Zeit mit euch bedanken.

Außerdem möchte ich Teelka Ahrendt für das Korrekturlesen meiner Bachelorarbeit danken.

Noch ein Dankeschön gilt meinen Eltern, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und mich während der Arbeit unterstützt haben.

Abschließend möchte ich bei allen meinen Freunden, die während meiner Arbeit immer für mich da waren, bedanken. Hier gilt mein besonderer Dank Daria und Roman, die mir durch ihren Glauben immer ein gutes Gefühl gegeben haben.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Einleitung.....	10
1 Theoretische Grundlagen.....	11
1.1 Was ist Raumklima?.....	11
1.2 Thermisch behaglicher Raum.....	12
1.3 Operative Temperaturen.....	14
1.4 PMV und PPD-Index.....	16
1.5 Möglichkeiten zur Erreichung eines behaglichen Raumklimas.....	17
1.6 Übertemperaturgradstunden als Bewertungskriterium des behaglichen Raumklimas.....	18
1.7 Heizlast und Heizarbeit.....	19
1.8 Kühllasten und Kühlarbeit.....	20
2 Thermische Gebäudesimulation mit TRNSYS.....	22
2.1 Einführung in das Simulationsprogramm TRNSYS.....	22
2.2 Projektvorstellung.....	23
2.3 Das 3D-SketchUp Modell.....	24
3. Aufbau der Simulation.....	27
3.1 Die Bauteile des Neubaus.....	27
3.2 Interne Lasten.....	29
3.2.1 Bürogebäude.....	29
3.2.2 Wohngebäude.....	32
3.2.3 Gastronomie.....	34
3.3 Aufbau der Simulation in TRNSYS Studio.....	36
4 Auswertung der Ergebnisse.....	39

4.1 Ohne interne Lasten.....	39
4.2 Mit internen Lasten	43
4.3 Gebäudelüftung	43
4.3.1 Szenario 1 (Basisvariante)	44
4.3.2 Szenario 2 (verdoppelte Luftwechselrate)	51
4.3.3 Szenario 3 (sommerliche Nachtlüftung)	55
4.4 g-Wert.....	58
4.5 Außenliegende Verschattung	64
4.6 Heizung mit Nachtabsenkung.....	67
4.7 Kombinationsvariante.....	68
Fazit.....	73
Literaturverzeichnis.....	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Behaglichkeitsfeld empfundene Temperatur im Räumen [14]	15
Abbildung 2. PMV und PPD-Index [16]	17
Abbildung 3. Sommerklimaregionen Deutschland [17, s.21].....	18
Abbildung 4. 3D SketchUp Modell des Neubaus, Westseite.....	26
Abbildung 5. 3D SketchUp Modell des Neubaus, Ostseite	26
Abbildung 6. Aufbau der Außenwand, Wohngebäude [22]	28
Abbildung 7. Aufbau der Außenwand, Nichtwohngebäude [22]	28
Abbildung 8. Aufbau der Innenwand [22]	28
Abbildung 9. Deckenaufbau [22].....	28
Abbildung 10. Dachaufbau [22].....	29
Abbildung 11. Jährlicher Stromverbrauch eines Haushalts im Jahr 2019 nach [25]	34
Abbildung 12. Grafische Simulationsoberfläche in TRNSYS Studio	36
Abbildung 13. Temperaturverlauf im Gastronomiebereich ohne interne Lasten	39
Abbildung 14. Temperaturverlauf im Bürobereich ohne interne Lasten	40
Abbildung 15. Temperaturverlauf im Wohnbereich ohne interne Lasten	41
Abbildung 16. Temperaturverlauf im Wohnbereich ohne interne Lasten mit Kühlung	42
Abbildung 17. Temperaturverlauf im Wohnbereich mit internen Lasten.....	43
Abbildung 18. Temperaturverlauf im Gastronomiebereich mit der angeschalteten Lüftung.....	46
Abbildung 19. Temperaturverlauf im Bürobereich mit der angeschalteten Lüftung.....	46
Abbildung 20. Temperaturverlauf im Wohnbereich mit der angeschalteten Lüftung ...	47
Abbildung 21. Heizlast und Heizarbeit mit der Bestandslüftung	49
Abbildung 22. Kühllast und Kühlarbeit mit der Bestandslüftung	50
Abbildung 23. Heizlast und Heizarbeit mit der verdoppelten Luftwechselrate.....	53
Abbildung 24. Kühllast und Kühlarbeit mit der verdoppelten Luftwechselrate.....	53
Abbildung 25. Gegenüberstellung der Arbeiten bei der verdoppelten Luftwechselrate.	54
Abbildung 26. Temperaturverlauf im Wohnteil mit der sommerlichen Nachtlüftung ...	55
Abbildung 27. Heizlast und Heizarbeit mit der sommerlichen Nachtlüftung.....	57
Abbildung 28. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten bei unterschiedlichen Lüftungsvarianten	58
Abbildung 29. Temperaturverlauf im Büroteil. g-Wert = 0,4.....	59
Abbildung 30. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten bei verschiedenen Fenstertypen	62

Abbildung 31. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten mit zugefügter Verschattung	66
Abbildung 32. Temperaturverlauf im Büroteil innerhalb eines Tages	67
Abbildung 33. Gegenüberstellung der Heizarbeit und Spitzenlast bei verschiedenen Heizungsvarianten.....	68
Abbildung 34. Temperaturverlauf im Wohnteil für die Kombinationsvariante	71
Abbildung 35. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten bei der Basis- und Kombinationsvariante	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Wärmeabgabe des Menschen entsprechend der Raumlufttemperatur und des Aktivitätsgrades nach [12]	13
Tabelle 2. Zuordnung der thermischen Empfindungen zum PMV-Wert nach [15]	16
Tabelle 3. Bezugswerte der operativen Temperatur je Sommerklimaregion nach [17, s. 28]	19
Tabelle 4. Innere und äußere Kühllasten nach VDI 2078 [19]	21
Tabelle 5. Anzahl der Arbeits- und Sitzplätze im Bürobereich	30
Tabelle 6. Belegungsplan der Bürozonen (inkl. Telefonbox)	30
Tabelle 7. Stromverbrauch Büroausstattung [24]	31
Tabelle 8. Anzahl der Personen im Wohnbereich.....	32
Tabelle 9. Belegungsplan Werktag/Wochenende	33
Tabelle 10. Belegungsplan Gastronomie	34
Tabelle 11. Maximale Temperaturen und UTS in einzelnen Wohnzonen.....	41
Tabelle 12. Maximale Temperaturen und UTS in einzelnen Wohnzonen mit Kühlung	42
Tabelle 13. Erforderliche Luftwechselrate nach Zonen.....	45
Tabelle 14. Übertemperaturgradstunden nach Zonen mit der Bestandslüftung.....	48
Tabelle 15. Spitzenlasten und Arbeiten für Basisvariante	50
Tabelle 16. Verdoppelte Luftwechselrate nach Zonen	51
Tabelle 17. Übertemperaturgradstunden mit der verdoppelten Luftwechselrate.....	52
Tabelle 18. Spitzenlasten und Arbeiten mit der verdoppelten Luftwechselrate	54
Tabelle 19. Übertemperaturgradstunden mit der sommerlichen Nachtlüftung. Büro- und Wohnteil.....	56
Tabelle 20. Spitzenlasten und Arbeiten mit der sommerlichen Nachtlüftung	57
Tabelle 21. Auflistung der g-Werte der Fenster.....	59
Tabelle 22. Übertemperaturgradstunden mit verschiedenen Fenster	61
Tabelle 23. Spitzenlasten und Arbeiten mit verschiedenen Fenstertypen.....	62
Tabelle 24. Übertemperaturgradstunden mit Verschattung	65
Tabelle 25. Spitzenlasten und Arbeiten mit Verschattung.....	66
Tabelle 26. Gebäudeeinstellungen für die Kombinationsvariante	69
Tabelle 27. Übertemperaturgradstunden für die Kombinationsvariante.....	70
Tabelle 28. Spitzenlasten und Arbeiten für die Kombinationsvariante	71

Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlendioxid
DE	Deutschland
DIN	Deutsche Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EnEV	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
TRY	Testreferenzjahr
UTS	Übertemperaturgradstunden
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Einleitung

Der Klimawandel ist ein weltweit zentrales Thema, das auch in Deutschland bemerkbar ist. Mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von $10,4^{\circ}\text{C}$ war 2020 das zweiwärmste Jahr in Deutschland seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881 [1]. Insgesamt führt die weltweite Temperatursteigerung zur Erhöhung des Meeresspiegels und zur Gletscherschmelze, welchem entgegengewirkt werden muss. Dafür wurden in Deutschland Klimaschutzziele, um die CO_2 – Emissionen bis 2050 um 80 bis 95 % zu senken, formuliert [2].

In Hinblick auf den Klimawandel und vereinbarte EU-Klimaziele zur Verringerung der CO_2 - Emissionen ist die Bedeutung von nachhaltigem Bauen und Sanieren noch weiter gestiegen [3]. Verbesserte Gebäudedämmung und Klimaveränderungen führen zu dem deutlichen Anstieg der Raumtemperaturen in vielen Gebäudeneubauten. Dabei kann durch eine Reduzierung der Gebäudeluftdurchlässigkeit der Heizenergiebedarf gesenkt werden. Allerdings führt das dazu, dass die Feuchtigkeit und Schadstoffe, wie Kohlenstoffdioxid, in einem Gebäude durch die natürliche Lüftung schlechter abgeführt werden, weil das Gebäude dichter ist. Deswegen gibt es aktuell eine große Nachfrage nach aktiven Kühlsystemen, besonders für die Bürogebäude [4]. Nach Angaben des Umweltbundesamts beträgt der Stromverbrauch für die Gebäudekühlung ca. 4 % des gesamten deutschen Stromverbrauchs [5]. Daraus kann zusammengefasst werden, dass die richtige Gebäudeplanung eine große Rolle für die Klimaziele spielt.

In dieser Arbeit wird die thermische Simulation für ein reales Projekt eines Wohn- und Bürogebäudes in Hamburg durchgeführt. Die Simulation dient in der Arbeit als Werkzeug zur Ermittlung des energetischen Bedarfs. Das Ziel ist, das Gebäude so zu optimieren, dass die Raumtemperaturen unter möglichst geringem Einsatz der Primärenergie für die Gebäudeheizung und Gebäudekühlung behaglich sind. Dafür wird untersucht, wie das Gebäude auf die Veränderung unterschiedlicher Faktoren, wie interne Lasten, Gebäudelüftung, Verschattung etc. reagiert. Außerdem wird betrachtet, welche Maßnahmen der Temperatursenkung in einem Gebäude beitragen, damit das Gebäude möglichst Klimaneutral funktionieren kann.

1 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die Simulation erläutert. Es wird betrachtet, was mit dem behaglichen Raumklima gemeint ist und wie das bewertet werden kann. Außerdem werden die Begriffe um das Thema Gebäude, die in der Simulation verwendet werden, beschrieben.

1.1 Was ist Raumklima?

Um die Frage „Was versteht man eigentlich unter dem Begriff Raumklima“ zu beantworten, muss eine noch größere Frage gestellt werden: Was ist „Klima“? Laut dem Deutschen Wetterdienst [6] ist das Klima als die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den langjährigen Zustand des Wetters an einem bestimmten Ort charakterisieren, definiert. Es wird durch zusammengefasste statistische Merkmale (Mittelwerte, Extreme Werte, etc.) dargestellt. Die wichtigsten Klimaelemente sind Bewölkung, Luftdruck, Luftfeuchte, Lufttemperatur, Niederschlag, Sichtweite, Sonnenscheindauer, Strahlung und Wind [6].

Obwohl der Begriff „Klima“ eine breite Bedeutung hat, können Parallelen zwischen dem allgemeinen Klima und dem Raumklima festgestellt werden. Die oben genannten Klimaelemente spielen auch für das Raumklima eine große Rolle. Das Raumklima wird ebenfalls durch solche Faktoren wie Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte beeinflusst, aber im Unterschied zu dem allgemeinen Klima wird beim Raumklima ein konkreter Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet. Auch wichtig ist, zu verstehen, dass das Erdklima nur teilweise abhängig von der menschlichen Beeinflussung ist, das Innenraumklima aber von Menschen beeinflusst werden kann [7].

Das Innenraumklima ist ein Komplex von physikalischen Faktoren, die den menschlichen Wärmeaustausch beeinflussen und das Wohlbefinden, die Arbeitsfähigkeit, die Gesundheit und die Produktivität bestimmen [8]. Das Raumklima wird durch folgende physikalische Größen gekennzeichnet:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit
- Wärmestrahlung

Neben den physikalischen Größen kann das Raumklima auch durch personenbezogene Faktoren charakterisiert werden. Personenbezogene Faktoren sind:

- Arbeitsaktivität
- Bekleidungssituation
- Akklimatisation
- Alter, Geschlecht, Gesundheitszustand etc.

In den folgenden Kapiteln wird genauer betrachtet, wie die physikalischen Faktoren das Raumklima beeinflussen.

1.2 Thermisch behaglicher Raum

Thermische Behaglichkeit bedeutet der Zustand, wenn ein Mensch sich in einem Raum thermisch neutral fühlt. Das heißt, dass die Person sich weder eine wärmere noch eine kältere Umgebung wünscht. Ein behagliches Raumklima ist subjektiv und hängt von den Nutzungsbereichen des Raums ab. Folgende Nutzungsbereiche mit zugehörigem Raumklima können identifiziert werden [9]:

- Aufenthaltsräume für Menschen (Komfortklima)
- Ställe zur Tierhaltung (Stallklima)
- Lager für Lebensmittel (Kaltlagerraumklima)
- Produktionsräume (Industrieklima)
- Prüf- und Laborräume (Laborklima)

Das Komfortklima gilt für Wohnungen, Büros, Gastronomie etc. Da in dieser Arbeit die Simulation eines Wohn- und Nichtwohngebäudes durchgeführt wird, wird später das Komfortraumklima näher betrachtet.

Wie oben schon beschrieben wird, ist thermische Behaglichkeit ein Zustand, der Zufriedenheit mit dem thermischen Zustand der Umgebung ausdrückt. Die wichtigste Grundbedingung, bei der die thermische Behaglichkeit im Raum erreicht wird, ist die Energiebilanz des Menschen [9]:

$$\text{Energieproduktion} = \text{Energieabgabe}$$

Diese Bedingung muss immer ausgeglichen sein, weil es bei unausgeglichener Energiebilanz unmöglich ist, diese über längeren Zeitraum zu ertragen.

Nach dem Grad des Einflusses auf das thermische Gleichgewicht des Menschen kann das Raumklima in drei Zustände unterteilt werden:

- neutral
- erhitzend
- kühlend

Das neutrale Raumklima ist eine Kombination der Komponenten, die bei Einwirkung auf den Menschen während einer Tätigkeit das thermische Gleichgewicht des Körpers gewährleistet. Der Unterschied zwischen der Größe der Energieproduktion und der gesamten Energieabgabe liegt innerhalb von $\pm 2 \text{ W}$ [10].

Beim erhitzten Raumklima ist die gesamte Energieproduktion des Menschen größer als die Energieabgabe ($>2 \text{ W}$). Außerdem ist beim kühlenden Raumklima die Energieproduktion des Menschen kleiner als die Energieabgabe an die Umgebung ($<2 \text{ W}$) [10].

Die Energieabgabe hängt von der körperlichen Tätigkeit des Menschen ab. Ein Mensch befindet sich mit seiner Umgebung im ständigen Wärmeaustausch und der Körper gibt ca. 63 % seiner gesamten Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion ab. Die Anderen 37 % werden durch Atmung und Verdunstung abgegeben [11]. Wie viel Wärme an die Umgebung abgegeben wird, hängt von dem Aktivitätsgrad der Person ab. Je aktiv ein Mensch sich verhält, desto mehr Wärme wird an die Umgebung übertragen.

Tabelle 1. Wärmeabgabe des Menschen entsprechend der Raumlufttemperatur und des Aktivitätsgrades nach [12]

Tätigkeit	Wärmeabgabe in W	Raumlufttemperatur in °C						
		18	20	22	23	24	25	26
Körperlich nicht tätig bis leichte Arbeit im Stehen (Aktivitätsgrad I und II nach DIN 1946-2)	Gesamt	125	120	120	120	115	115	115
	Trocken	100	95	90	85	75	75	70
	Feucht	25	25	30	35	40	40	45
Mäßig schwere körperliche Tätigkeit (Aktivitätsgrad III nach DIN 1946-2)	Gesamt	190	190	190	190	190	190	190
	Trocken	125	115	105	100	95	90	85
	Feucht	65	75	85	90	95	100	105
Schwere körperliche Tätigkeit (Aktivitätsgrad IV nach DIN 1946-2)	Gesamt	270	270	270	270	270	270	270
	Trocken	155	140	120	125	110	105	95
	Feucht	115	130	150	155	160	165	175

Die Tabelle 1 zeigt, dass sich die Wärmeabgabe des Menschen in trockene Wärme (Energie bei trockener Luft) und feuchte Wärme (im Wasserdampf „gespeicherte“ Energie) unterteilt. Die Gesamtwärmeabgabe (trockene plus feuchte Wärmeabgabe) ist von der Luftfeuchtigkeit abhängig. Gemäß DIN EN ISO 7730 wird die Gesamtwärmeabgabe mit der relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % berechnet [13].

Aus der Tabelle 1 kann abgeleitet werden, dass bei vorwiegender Bürotätigkeit und bei einer Durchschnittstemperatur von 20° C eine Person Wärme von 120 W an die Umgebung abgibt. Für die Wohn- und Gastronomieflächen werden die gleichen Werte angenommen.

1.3 Operative Temperaturen

Die operative Raumtemperatur wird auch als „Empfindungstemperatur“ bezeichnet. Die operative Temperatur ist ein Wert für die Empfindung des thermischen Klimas, definiert als die gleichmäßige Temperatur der Umgebungsluft und mittlere Temperatur der Oberflächen. Die operative Temperatur in einem Raum entspricht der Formel [14]:

$$\theta_{op} = \frac{\theta_L + \theta_U}{2} \quad (1)$$

mit

θ_{op} operative Temperatur in °C

θ_L Lufttemperatur in °C

θ_U mittlere Temperatur der Umschließungsflächen in °C

In einem Raum befindet sich der Mensch im stetigen Strahlungsaustausch mit mehreren Flächen, die in der Regel unterschiedliche Temperaturen haben. Zum Beispiel strahlt der Mensch die Wärme an die Fenster, an die Innenwände und an den Fußboden ab. Je niedriger die Temperatur der Fläche ist, desto mehr Wärme wird abgestrahlt. Um die mittlere Wandtemperatur für den Strahlungsaustausch zu bestimmen, wird die sogenannte Umschließungstemperatur betrachtet, die für die Berechnung der operativen Temperatur genutzt wird (Formel 1). Die Umschließungstemperatur wird durch die folgende Formel berechnet [14].

$$\theta_U = \frac{A_1\theta_1 + A_2\theta_2 + \dots + A_n\theta_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (2)$$

mit

θ_U mittlere Temperatur der Umschliessungsflächen in °C

θ_n einzelne Temperatur des Bauteiles in °C

A_n Fläche des Bauteiles in m²

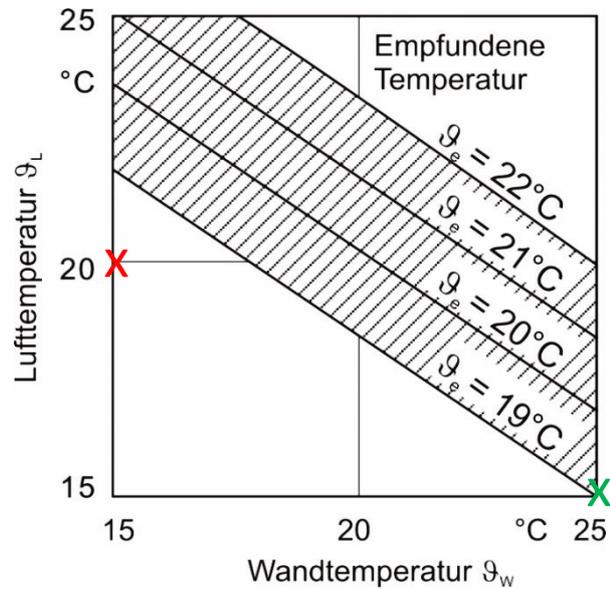


Abbildung 1. Behaglichkeitsfeld empfundene Temperatur im Räumen [14]

In der Abbildung 1 sind die Temperaturbereiche bei verschiedenen Luft- und Wandtemperaturen zu sehen, die noch als behaglich wahrgenommen werden (schraffierter Bereich). Zum Beispiel empfindet eine Person eine Raumtemperatur von 20° C als kalt, wenn die Umschließungstemperatur der Wände nur 15° C beträgt (rotes Kreuz). Allerdings ist die Lufttemperatur von 15° C noch behaglich, wenn die Wandtemperatur 25° C beträgt (grünes Kreuz).

1.4 PMV und PPD-Index

Nach DIN EN ISO 7730 wird die thermische Behaglichkeit mittels PMV (Predicted Mean Vote) und PPD-Index (Predicted Percentage of Dissatisfied) bewertet. Der PMV-Index wird durch die folgenden Faktoren beeinflusst [9]:

- Aktivitätsgrad des Menschen
- Raumlufthtemperatur
- Mittlere Strahlungstemperatur der Raumumschließungswände
- Luftgeschwindigkeit
- Luftfeuchte

Bei dem PMV-Index handelt es sich um eine 7-Punkte-Skala, die die erwartete durchschnittliche Beurteilung des Raumklimas angibt. Mithilfe des Indexes kann vorhergesagt werden, wie die mittlere Beurteilung des Raumklima ist, wenn sich eine große Anzahl Menschen bei gleicher Aktivität und in gleicher Kleidung in einem bestimmten Raumklima befindet [9]. Der PMV-Index kann entweder mithilfe einer Personsumfrage bestimmt oder mit speziellen Programmen berechnet werden. Der Index ist dimensionslos und kann, wie in der Tabelle 2 gezeigt wird, skaliert werden.

Tabelle 2. Zuordnung der thermischen Empfindungen zum PMV-Wert nach [15]

PMV	Empfindung
- 3	kalt
- 2	kühl
- 1	erträglich (leicht) kühl
0	neutral (thermisch behaglich)
1	erträglich (leicht) warm
2	warm
3	heiß

Der PMV-Index kommt immer zusammen mit dem dazugehörigen PPD-Index, der die Prozentanzahl unzufriedener Personen bezeichnet (Abbildung 2).

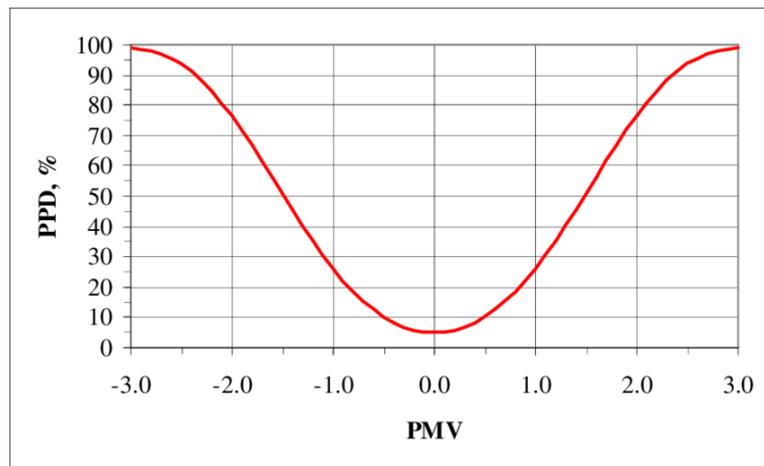


Abbildung 2. PMV und PPD-Index [16]

Aus der Abbildung 2 ist zu sehen, dass bei dem thermischen optimalen Bereich ($PMV = 0$) immer mindestens 5 % der Personen mit dem Raumklima unzufrieden sind. Das bedeutet, dass die empfundenen Temperaturen und das Raumklima subjektive Werte sind und es unmöglich ist, ein Raumklima, mit dem alle zufrieden sind, bereitzustellen.

1.5 Möglichkeiten zur Erreichung eines behaglichen Raumklimas

Die Raumtemperatur kann als zu warm oder zu kalt empfunden werden. Beide Fälle werden als unbehagliches Raumklima betrachtet. Bei kalten Außentemperaturen steigt die Wärmeabgabe eines Raums und dementsprechend führt das zur Reduzierung der Innentemperatur eines Raums. Wenn die Raumtemperatur zu kalt ist, kann mit Hilfe eines Heizsystems die Raumluft und damit auch die Oberflächen erwärmt werden.

Aufgrund der erhöhten Wärmedämmung in Gebäudeneubauten steigt der Eintrag der solaren Gewinne wesentlich. Auch steigt die Bedeutung der internen Lasten in einem Gebäude, da wegen der verbesserten Wärmedämmung das Gebäude dichter ist und die durch elektronische Geräte oder Menschen produzierte Wärme auf dieser Weise im Innenraum bleibt. Das alles führt zu höheren Raumtemperaturen. Im Fall einer zu hohen Raumtemperatur gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die Temperatur zu reduzieren. Zum Beispiel wird eine Sonnenschutzverglasung zur Reduzierung der Innenraumtemperatur eingebaut. Durch die Sonnenschutzverglasung wird das einfallende Sonnenlicht reflektiert. Auch ist es möglich, die Gebäudegestaltung (Fassade, Balkone, Loggien etc.) so zu planen, dass das Gebäude durch bauliche Verschattung weniger von der Sonnenstrahlung beeinflusst wird und die Temperatur

dadurch sinkt. Außerdem kann die Lüftung des Raums über Fenster oder Fassade erhöht werden, was zu einem besseren Luftwechsel führt und dementsprechend die erforderliche Raumtemperatur sicherstellt. Grundsätzlich kann die Raumtemperatur auch mit Hilfe eines Kühlsystems gekühlt werden.

1.6 Übertemperaturgradstunden als Bewertungskriterium des behaglichen Raumklimas

Als Bewertungskriterium der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen werden die Anforderungswerte der Übertemperaturgradstunden (UTS) festgelegt. Nach DIN 4108-2 dürfen diese Werte nicht überschritten werden [17]. Hierbei wird zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden unterschieden.

Die Übertemperaturgradstunden bezeichnen das Zeitintegral, indem die operative Innenraumtemperatur größer als der Bezugswert der operativen Raumtemperatur ist. Die Einheit von Übertemperaturgradstunden ist Kh/a. Die vorgegebenen Bezugswerte der operativen Raumtemperatur gehören zu der jeweiligen Klimaregion. Deutschland ist in drei unterschiedliche Klimaregionen eingeteilt (Abbildung 3).



Abbildung 3. Sommerklimaregionen Deutschland [17, s.21]

Tabelle 3. Bezugswerte der operativen Temperatur je Sommerklimaregion nach [17, s. 28]

Sommerklimaregion	Bezugswert der operativen Temperatur in °C
A	25
B	26
C	27

Da sich das betrachtete Bauprojekt in Hamburg befindet, wird die operative Temperatur von 26° C (Tabelle 3) für die Region B (Abbildung 3, roter Pfeil) als Bezugswert angenommen.

Die Anzahl der zulässigen Übertemperaturgradstunden hängt von der Nutzung des Gebäudes ab. Nach DIN 4108-2 wird hier zwischen zwei Gebäudearten unterschieden [17]:

- Wohngebäuden 1200 Kh/a
- Nichtwohngebäuden 500 Kh/a

In dieser Arbeit handelt es sich sowohl um ein Nichtwohngebäude als auch um ein Wohngebäude, deswegen werden diese zwei Gebäudetypen getrennt mit dem zugehörigen Richtwert der Übertemperaturgradstunden betrachtet.

Die Anzahl der Übertemperaturgradstunden in einem Raum wird mit dem folgenden Prinzip berechnet:

Wenn sich die operative Temperatur um 1 K für die Dauer von einer Stunde erhöht, wird eine Übergradtemperaturstunde berechnet. Bei der Überschreitung des Bezugswertes um 2 K auch für eine Stunde werden zwei Übertemperaturgradstunden berechnet. Dementsprechend werden zum Beispiel bei der Überschreitung von 2 K für die Dauer von 5 Stunden zehn Übertemperaturgradstunden berechnet.

1.7 Heizlast und Heizarbeit

Als Begriff „Heizlast“ wird der erforderliche Wärmestrom, um die benötigte Norm-Innentemperatur unter Norm-Außenbedingungen zu erreichen, bezeichnet [18]. Für Hamburg beträgt die Norm-Außentemperatur -9,6° C [18]. Die Wärmeverluste werden durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen beeinflusst und müssen um

eine bestimmte Raumtemperatur von 20° C zu halten mit Hilfe einer Heizung ausgeglichen werden.

Im Winter, wenn die kalte Außentemperatur vorherrscht und die Wärmeverluste des Gebäudes besonders hoch sind, ist die erforderliche Heizlast am größten. Basierend auf der Berechnung des Wärmebedarfs kann die Heizungsanlage richtig ausgelegt und dimensioniert werden, damit das Gebäude auf die behagliche Temperatur beheizt und ein zu hoher Energieverbrauch durch eine überdimensionierte Heizung vermeiden wird.

Die Heizarbeit beschreibt den Energieverbrauch in einer definierten Zeitperiode. Das heißt, dass die verbrauchte Energie die Multiplikation der Leistung und Zeit ist. Die Einheit der Heizarbeit ist kWh.

1.8 Kühllasten und Kühlarbeit

Als „Kühllast“ wird die Wärmemenge, die von einem Raum abgeführt werden muss, um die erforderliche operative Temperatur in einer Zone zu erreichen, bezeichnet [19]. Da sich Hamburg in Klimaregion B befindet (siehe Abbildung 3), beträgt die erforderliche operative Temperatur 26° C.

In verschiedenen Gebäudetypen werden die internen Lasten abhängig von den Nutzungsprofilen des Gebäudes bestimmt. Zum Beispiel haben die internen Lasten im Bürogebäude eine starke Auswirkung auf das thermische Raumklima, weil im Büro in der Regel viele elektrische Arbeitsmittel (Computer, Bildschirme, etc.) genutzt werden, die bei der Nutzung Wärme an die Umgebung abgeben. Außerdem ist die Personenbelegung in Bürogebäuden in der Regel pro Quadratmeter größer als im Wohngebäude. In der Gastronomiefläche entsteht durch die Zubereitung der Speisen und die hohe Personenbelegung ebenfalls ein höherer Wärmeertrag. Die Kühllasten lassen sich auf innere und äußere aufteilen und werden in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4. Innere und äußere Kühllasten nach VDI 2078 [19]

Innere Kühllasten	Wärmeabgabe des Menschen Q_M
	Beleuchtungswärme Q_B
	Maschinen und Gerätewärme Q_N
Äußere Kühllasten	Transmissionswärme aus nichtklimatisierten Nachbarräumen Q_R
	Wärmedurchgang durch Außenwände und Dächer Q_W
	Wärmedurchgang durch Fenster Q_F

Die gesamte Kühllast (Q_K) wird durch die folgende Formel berechnet:

$$Q_K = Q_M + Q_B + Q_N + Q_R + Q_W + Q_F \quad (3)$$

2 Thermische Gebäudesimulation mit TRNSYS

In diesem Kapitel werden die Funktionsweise des Simulationsprogramms TRNSYS sowie das in der Simulation betrachtete Projekt vorgestellt. Auch wird hier das 3D Gebäudemodell vorgestellt.

2.1 Einführung in das Simulationsprogramm TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation Program) ist eine Open-Source-Software zum Erstellen und Simulieren von Systemen. Das Programm wurde erstmals 1975 als TRNSYS 6.0 an der University of Wisconsin veröffentlicht [20]. Mit TRNSYS kann das Verhalten transienter Systeme simuliert werden. Das Programm bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Kombinationen aus Anlagen und Geräten zu modellieren und danach die Ergebnisse in grafischer oder in zahlenmäßiger Form darzustellen. Die wichtigste Komponente des Programms sind „Types“, die die einzelnen Objekte des gesamten Systems darstellen. Es können einzelne Parameter an jedem „Type“ geändert und diese miteinander über In- und Outputs verknüpft werden. Jede Komponente wird im TRNSYS Studio durch ein Symbol auf der grafischen Benutzeroberfläche dargestellt. Den Symbolen sind Datenblätter des jeweiligen mathematischen Komponentenmodells hinterlegt, deren Variablen in TRNSYS Studio definiert werden.

Mit dem Programm TRNSYS werden die thermischen Gebäudesimulationen durchgeführt. Thermische Gebäudesimulationen dienen für die Berechnung energetischer Funktionsfähigkeiten eines Gebäudes. Das 3D Gebäudemodell, das als Grundlage für die Simulation dient, beschreibt die Geometrie und die Eigenschaften der wichtigen Bauteile. In der Simulation werden auch die internen Lasten, Nutzungsprofile der Zonen sowie die solaren Gewinne berücksichtigt. Auf dieser Weise ermöglicht die thermische Gebäudesimulation, den Energieverbrauch und die Temperaturen in einer bestimmten Zeitperiode darzustellen.

Für den Aufbau eines 3D Gebäudemodells steht dem Benutzer der TRNSYS 18 Version dafür das Plugin zum Google Sketchup zur Verfügung. In Google Sketchup kann das Gebäudemodell gezeichnet und weiterhin über TRNBuild und Type 56 in der Simulation analysiert und berechnet werden. In der Simulation wird das 3D Gebäudemodell auf einzelne thermische Zonen aufgeteilt. Die Räume werden nach der Art der Nutzung und ihrem Standort unterteilt. In den meisten Fällen ist es sinnvoll, die Räume mit gleicher Charakteristik zu einer thermischen Zone zusammenzufassen, damit

der Nutzeraufwand und die Fehleranfälligkeit minimiert werden. Wenn eine detaillierte Berechnung gebraucht wird, ist es notwendig, jeden Raum als eine separate Zone darzustellen. Die Zonen werden miteinander verknüpft und befinden sich im stetigen Wärmeaustausch. In der Simulation wird aber jede Zone separat parametrisiert und berechnet.

Als Grundlage für die Berechnung der Energieströme werden die Wetterdatensätze eines Referenzjahres für verschiedene Standorte verwendet. Nach dem Deutschen Wetterdienst (DWD) ist ein Testreferenzjahr (TRY) ein Datensatz, in dem stündliche meteorologische Daten für ein Jahr dargestellt werden [21]. Die Daten repräsentieren einen mittleren Witterungsverlauf für das Jahr. Das Programm TRNSYS hat die Möglichkeit die Datensätze von verschiedenen Datenbanken, wie DWD oder Meteonorm einzulesen. Alle Wetterdatensätze enthalten verschiedene Parameter, wie direkte und diffuse Strahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Sonnenstand, Luftdruck, Luftfeuchte und Außentemperatur. Die Daten werden aus stündlichen Daten in einem längeren Zeitraum (normalerweise 10 Jahre oder mehr) ausgewählt. Für jeden Monat im Jahr wurden die Daten aus dem Jahr ausgewählt, das für diesen Monat als "typisch" angesehen wurde. In TRNSYS 18 wird die Standardperiode 1996-2015 verwendet.

2.2 Projektvorstellung

Als Grundlage für die nachfolgende Simulation dient ein reales Projekt des Ingenieurbüros „Freie Ingenieure Langer Schwerdtfeger Partnerschaft Beratender Ingenieure mbB“.

Bei dem Projekt handelt es sich um ein Bauvorhaben in Hamburg. Hier soll ein Wohn- und Bürogebäude mit Gastronomiefläche gebaut werden. Das Gebäude besteht aus fünf Geschossen mit einer Tiefgarage und hat die Fläche von 3593,4 m².

Im Erdgeschoss befinden sich drei öffentliche Gewerbeflächen. In der folgenden Simulation wird davon ausgegangen, dass alle drei Gewerbeflächen gleichzeitig für die gastronomische Nutzung verwendet werden. Außerdem befinden sich im Erdgeschoss auch ein Foyer, das zur oberen Bürofläche offen gestaltet ist, und ein Besprechungsraum.

Für das erste und zweite Obergeschoss ist eine Büronutzung geplant. Hier handelt es sich um eine offen gestaltete Bürofläche, in der die Arbeitsplätze nur durch mobile halbhohe Trennwände unterteilt werden. Auf jeder Büroetage sind Besprechungsräume vorhanden. Besonders sind die kleinen Räume auf der Ostseite des Gebäudes interessant, die Telefonboxen genannt werden und als Rückzugsorte für vertrauliche Gespräche oder für ungestörtes Arbeiten dienen. Aufgrund der kleinen Raumfläche und hohen internen Lasten wird erwartet, dass sich sommerliche Temperaturen in diesen Räumen deutlich erhöhen werden, deswegen ist hier die genaue Untersuchung sinnvoll.

In dem dritten und vierten Obergeschoß befindet sich der Wohnbereich, der aus 1-Zimmer- und 2-Zimmerwohnungen besteht. Bei den Wohnungen handelt es sich um klassische Mietwohnungen, in denen durch die Größe der Wohnungen die Zielgruppe meistens 1-Person Haushalte sind. Im 3. Obergeschoss befindet sich außerdem noch ein Besprechungsraum.

2.3 Das 3D-SketchUp Modell

Das in der Simulation abgebildete 3D Gebäudemodell wird mit Hilfe des SketchUp Programms dargestellt. Das 3D Modell ermöglicht die detaillierte Berechnung des lang- und kurzwelligen Strahlungsaustauschs innerhalb einer Zone.

Insgesamt wird das Gebäude in 30 thermische Zonen nach der Art der Nutzung und dem Raumtyp unterteilt. Im Erdgeschoss werden die drei Gastronomief Flächen als einzelne Zonen betrachtet, nämlich GASTRO_N (N – Nord), GASTRO_M (M – Mitte), GASTRO_S (S – Süd). Die zu der Gastronomie zugehörigen Küchen werden auch separat dargestellt, weil in diesen Zonen hohe internen Lasten in Betracht gezogen werden müssen.

Die Büroetagen werden auf vier Zonen (BUERO_N, BUERO_M, BUERO_S, FOYER_LUFTRAUM) nach der Orientierung aufgeteilt. Da die Bürogeschosse zueinander offen gestaltet sind und der freie Luftaustausch dazwischen ermöglicht wird, werden die ersten und zweiten Obergeschosse in einer Zone zusammengefasst. Aus dem gleichen Grund wird das Foyer im Erdgeschoss auch zusammen mit dem oberen Bereich als eine Zone betrachtet. Außerdem wird der Telefonboxraum als eine separate Zone untersucht, der sich in der Ecke der rechten Gebäudeseite befindet (siehe Abbildung 5).

Im Wohnbereich unterscheiden sich die einzelnen Wohneinheiten unerheblich, deswegen werden in der Simulation die meisten Wohneinheiten zusammengefasst. Um das thermische Verhalten einer einzelnen Wohnung zu untersuchen, wird im dritten Obergeschoss eine Wohnung in der Gebäudemitte (WE_MIT_RK) und zwei Wohnungen am Gebäudeende (WE_03_AW und WE_03_RS) als separate Zonen betrachtet (siehe Abbildung 4). Im dritten Obergeschoss ist zu merken, dass ein Schlafzimmer (SCHLAF_3OG, Abbildung 4) auf der südlichen Seite des Gebäudes als separate Zone differenziert wird. Hier wird die genauere Untersuchung gebraucht, weil die eingestrahelte Solarenergie durch das große Fenster ins Zimmer gelangt, was zur Erhöhung der Raumtemperatur führt. Außerdem wird das vierte Obergeschoss vollständig in eine Zone zusammengefasst.

Die Besprechungsräume werden auch als einzelne Zonen betrachtet. Da der Besprechungsraum im dritten Obergeschoss in zwei Räume unterteilt werden kann, wird dieser auf zwei unterschiedliche Zonen aufgeteilt.

Das SketchUp Modell wird auf den Abbildungen 4 und 5 veranschaulicht. Auf den Abbildungen zeigt die rote Linie südliche Himmelsrichtung, während die grüne Linie die östliche Himmelsrichtung darstellt. In lila werden die Verschattungselemente (Balkone, Loggien, Wartungsgänge etc.) dargestellt.

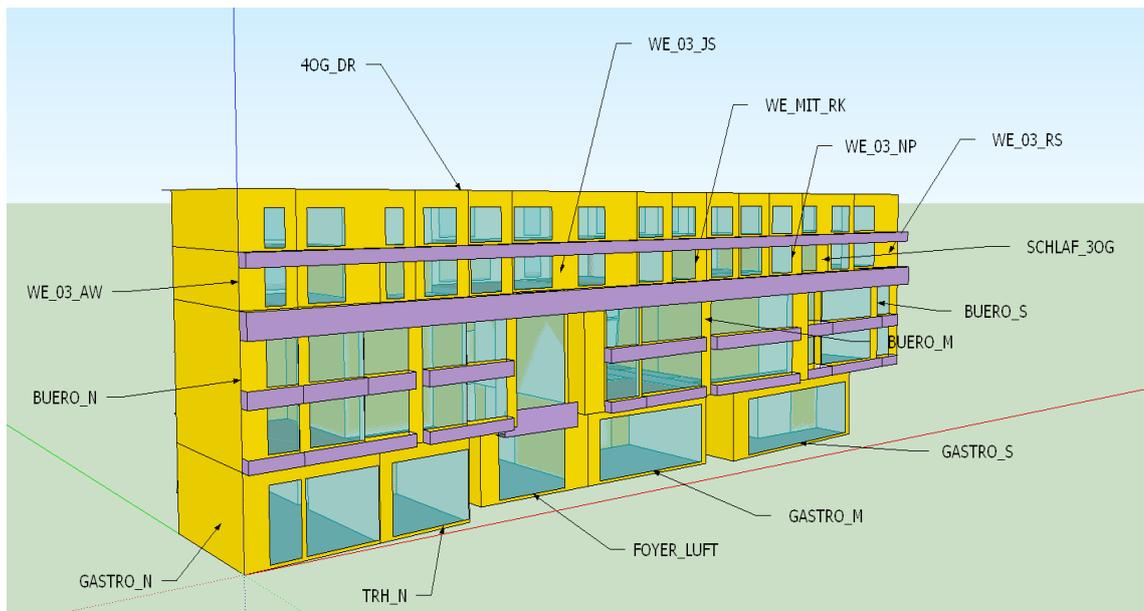


Abbildung 4. 3D SketchUp Modell des Neubaus, Westseite

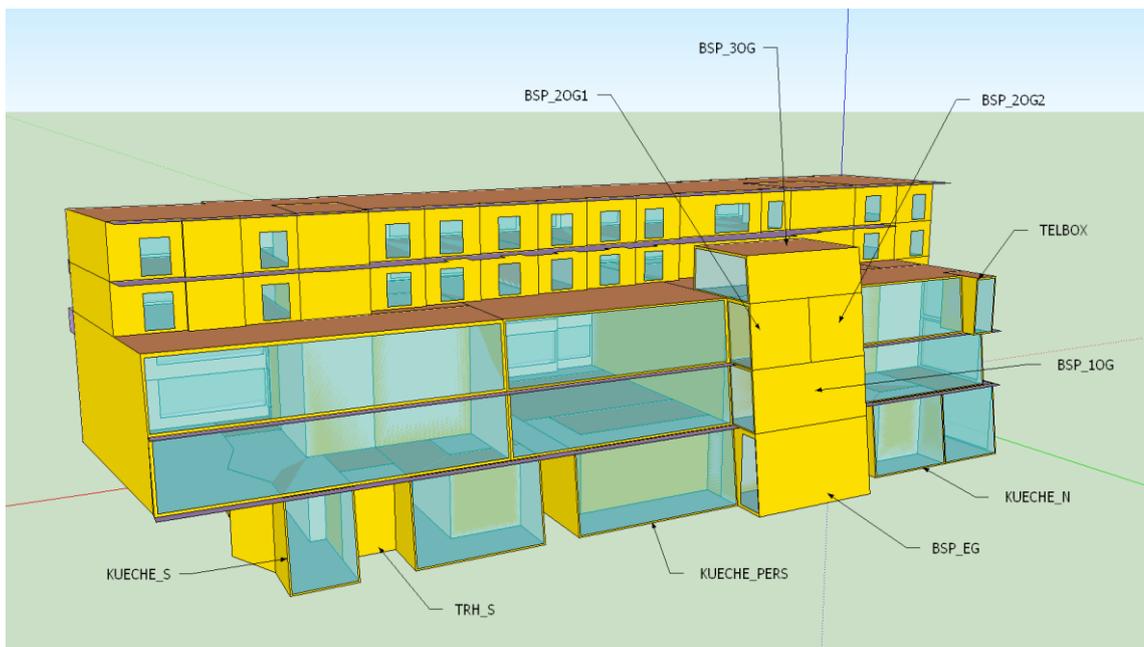


Abbildung 5. 3D SketchUp Modell des Neubaus, Ostseite

3. Aufbau der Simulation

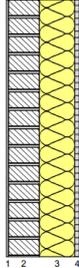
In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise, wie die nachfolgende Simulation parametrisiert wird, erläutert. Das Ziel der vorliegenden Simulation ist, zu untersuchen, wie das Gebäude auf die Veränderung unterschiedlicher Parameter, wie interne Lasten, Wetter, Nutzungsprofile etc. reagiert. Es wird durch die Simulation die erwartete Raumtemperatur für jede Zone des Gebäudes ermittelt sowie der Wärme- und Kältebedarf für das ganze Gebäude und die thermische Behaglichkeit für bestimmte Zonen bewertet.

3.1 Die Bauteile des Neubaus

Nach der Dimensionierung der Gebäudegeometrie wird das Modell in TRNSYS eingelesen. Zunächst werden die Bauteile in TRNBuild eingestellt. Basierend auf von den Projektbeteiligten eingegangenen EnEV-Nachweisen für Wohn- und Nichtwohngebäude wurden die erforderlichen Baumaterialien mit den dazugehörigen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) bestimmt [22].

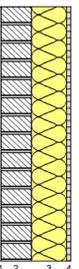
Der Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils ist ein praktisches Maß für seine Wärmedurchlässigkeit auf der Grundlage der Wärmeleitfähigkeit. Der U-Wert bezeichnet, wie viel Wärme durch das Bauelement pro Quadratmeter durchfließt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenfläche einen konstanten Wert von 1 K hat. Die Einheit des U-Wertes ist $W/(m^2K)$.

In TRNBuild werden die Dicke, Wärmeleitfähigkeit und die Dichte des Bauteils eingetragen. Basierend auf diesen Werten wird der gesamte U-Wert des Bauteils berechnet. Für jeden Gebäudetyp wurde der unterschiedliche Aufbau der Außenwand angegeben. Für die Innenwand und Dachaufbau wurden die gleichen Werten angenommen.



Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte
		cm	W/(mK)	kg/m ³
1	Putzmörtel aus Kalkgips, Gips, Anhydrit und Kalkanhydrit	1,00	0,700	1400,0
2	Kalksandstein, NMDM (2000 kg/m ³)	17,50	1,100	2000,0
3	Brillux EPS Prime 3830	20,00	0,031	-
4	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, NMDM (2000kg/m ³)	2,50	0,960	2000,0
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 1,20	
Bauteilfläche	spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit	
728,87 m ²	22,1 %	414,0 kg/m ²	106,86 W/K	15,9 %
			10cm-Regel :	39278 Wh/K
			3cm-Regel :	10933 Wh/K

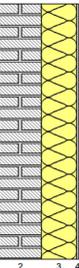
Abbildung 6. Aufbau der Außenwand, Wohngebäude [22]



Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte
		cm	W/(mK)	kg/m ³
1	Putzmörtel aus Kalkgips, Gips, Anhydrit und Kalkanhydrit	1,00	0,700	1400,0
2	Kalksandstein, NMDM (2000 kg/m ³)	17,50	1,100	2000,0
3	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (WLG 035)	20,00	0,035	60,0
4	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, NMDM (2000kg/m ³)	2,50	0,960	2000,0
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 1,20	
Bauteilfläche	spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit	
702,94 m ²	13,0 %	426,0 kg/m ²	115,55 W/K	INF %
			10cm-Regel :	37881 Wh/K
			3cm-Regel :	10544 Wh/K

Abbildung 7. Aufbau der Außenwand, Nichtwohngebäude [22]

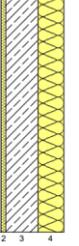
In den Abbildungen 6 und 7 ist zu sehen, dass die Außenwände in Wohn- und Bürobereichen aus Kalksandstein mit Wärmedämmung und Vollklinker bestehen. Der Unterschied zwischen ihnen liegt in der ausgewählten Wärmedämmung. Für die Innenwand wird auch der Kalksandstein als Mauerziegel verwendet (Abbildung 8).



Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte
		cm	W/(mK)	kg/m ³
1	Putzmörtel aus Kalkgips, Gips, Anhydrit und Kalkanhydrit	1,50	0,700	1400,0
2	Kalksandstein, NMDM (2000 kg/m ³)	24,00	1,100	2000,0
3	Heratekta 032	20,00	0,032	60,0
4	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk	1,00	1,000	1800,0
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 1,20	
Bauteilfläche	spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit	
101,76 m ²	3,1 %	531,0 kg/m ²	15,05 W/K	2,2 %
			10cm-Regel :	5399 Wh/K
			3cm-Regel :	1442 Wh/K

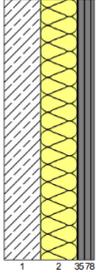
Abbildung 8. Aufbau der Innenwand [22]

Für die Decken und Dach wurden von der Projektbeteiligten folgende Materialien, wie armerter Beton, Hartschaum und Zement, erwünscht (Abbildung 9 und 10)



Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte
		cm	W/(mK)	kg/m ³
1	Zement-Estrich	3,00	1,400	2000,0
2	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (DIN 18165-1 - WLG 040)	3,00	0,040	260,0
3	Beton armiert mit 1% Stahl (DIN 12524)	20,00	2,300	2300,0
4	PUR/PIR-Hartschaum mit gasdiffusionsdichter Schicht (DIN 13165 - WLG 024)	16,00	0,024	30,0
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 1,75	
Bauteilfläche	spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit	
1024,20 m ²	18,9 %	532,6 kg/m ²	132,41 W/K	INF %
			10cm-Regel :	17070 Wh/K
			3cm-Regel :	17070 Wh/K

Abbildung 9. Deckenaufbau [22]



Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte
		cm	W/(mK)	kg/m ³
1	Beton armiert mit 1% Stahl (DIN 12524)	24,00	2,300	2300,0
2	PUR/PIR-Hartschaum mit gasdiffusionsdichter Schicht (DIN 13165 - WLG 024)	24,00	0,024	30,0
3	Polyethylenfolie 0,25 mm (DIN 12524)	0,025	0,330	960,0
4	Faserschutzmatte, z.B. Urbanscape Wurzelschutzfolie von Knauf	0,50	0,330	-
5	Drainageschicht mit Wasserspeicher	4,00	0,330	-
6	Filtervlies	0,50	0,160	-
7	Vegetationstragschicht	4,00	1,500	-
8	Vegetationsmatte	2,00	1,500	-
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!		R_{tot} = 1,20		
	Bauteilfläche	spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit
	771,09 m ²	23,4 %	559,4 kg/m ²	73,77 W/K
			11,0 %	10cm-Regel : 49264 Wh/K
				3cm-Regel : 14779 Wh/K

Abbildung 10. Dachaufbau [22]

Für die Fenster wird ein g-Wert von 0,55 und ein U-Wert von 0,9 W/(m²K) angenommen. Der g-Wert (Energiedurchlassgrad) von einem Fenster bezeichnet, wie viel Sonnenenergie ein Fenster in den Innenraum durchlässt. Nach EnEV 2014 soll der g-Wert eines Fensters in Neubauten maximal 0,6 sein [23]. Das bedeutet, dass maximal 60 % der eingestrahlten Solarenergie durch das Fenster in den Raum gelangen darf.

3.2 Interne Lasten

Im nächsten Schritt werden für jede Zone die internen Lasten hinzugefügt. Da die internen Lasten vom Nutzungsprofil der Zone abhängen, werden diese weiterhin separat für jeden Gebäudetyp betrachtet.

3.2.1 Bürogebäude

Wie im Abschnitt 2.3 gesagt, wird das Bürogebäude auf vier Zonen aufgeteilt. Dazu gehören auch die Besprechungsräume und die Telefonbox, die nach der Art der Nutzung ähnlich wie die Büroräume sind und deshalb zusammen mit ihnen betrachtet werden.

Da die Berechnung der internen Lasten stark von der menschlichen Wärmeabgabe abhängig ist (siehe Kap.1, Abschnitt 8), ist es notwendig, die Anzahl der Menschen in einer Zone zu bestimmen.

In der Tabelle 5 sind die Anzahl der Arbeitsplätze in den Bürozononen und die maximale Anzahl der Sitzplätze in den Besprechungsräumen zu sehen.

Tabelle 5. Anzahl der Arbeits- und Sitzplätze im Bürobereich

Zone	Anzahl der Arbeitsplätze/Sitzplätze
BUERO_N	24
FOYER_LUFTRAUM	15
BUERO_M	45
BUERO_S	30
BSP_EG	20
BSP_1OG	20
BSP_2OG1	10
BSP_2OG2	10
BSP_3OG	16
TELBOX	1

Bei der Berechnung der internen Lasten wird auch die Nutzungszeit eines Raums berücksichtigt. In der Simulation wird davon ausgegangen, dass das Bürogebäude werktags von 07:00 bis 20:00 geöffnet ist. Es ist aber wahrscheinlich, dass die Büroräume während der Arbeitszeiten nicht immer voll belegt sind, deswegen ist es für plausible Ergebnisse wichtig, den Stundenplan der Büronutzung möglichst realistisch anzupassen.

Tabelle 6. Belegungsplan der Bürozonon (inkl. Telefonbox)

Zeit	Belegung in %
00:00 – 07:00	0
07:00 - 09:00	30
09:00 – 12:00	100
12:00 – 13:00	50
13:00 – 14:00	50
14:00 – 16:00	100
16:00 – 18:00	40
18:00 – 20:00	10
20:00 – 23:00	0

Aus der Tabelle 6 kann abgelesen werden, dass die Bürozonon zwischen 09:00 und 12:00 sowie 14:00 und 16:00 maximal belegt sind. Zwischen 12:00 und 14:00 ist die Mittagspause geplant. Hier wird davon ausgegangen, dass die eine Hälfte der Bürobesetzung in der ersten Stunde zum Mittag geht, während die andere Hälfte in der zweiten Stunde die Mittagspause macht. Da aber die Mitarbeiter ihre Arbeitszeit frei gestalten können, muss man während der Gebäudenutzung mit verschiedenen Abweichungen von dem angegebenen Stundenplan rechnen.

Die Besprechungsräume sind nur in der Zeit von 10:00 bis 12:00 und von 14:00 bis 16:00 vollständig belegt. Außerhalb dieser Zeiten werden in den Besprechungsräumen keine internen Lasten berücksichtigt.

Für die Büroausstattung und Beleuchtung werden folgende Werte als innere Kühllasten angenommen (Tabelle 7):

Tabelle 7. Stromverbrauch Büroausstattung [24]

Arbeitshilfen	Stromverbrauch
Tablet-PC	40 W
Computerbildschirm	35 W
Multifunktionsdrucker	350 W
Fernseher	75 W
Beleuchtung (Leuchtstoffröhren)	10 W/m ²

Während des Betriebs der Büroausstattung wird die Wärmeenergie in Form von Strahlung abgegeben. Grundsätzlich kann in der Simulation angenommen werden, dass der Strom, der für ein Gerät verwendet wird, komplett in Wärme umgewandelt wird.

Laut der Tabelle 1 (Abschnitt 1.2) wird bei Personen die Wärme von 120 W an die Umgebung abgegeben. Pro Arbeitsplatz werden zwei Computerbildschirme und ein Tablet-PC vorgesehen. Weiterhin gibt es auf jeder Büroetage einen zentralen Copy-Point mit zwei Multifunktionsdruckern. Im Foyer am Empfang wird es auch ein Multifunktionsdrucker eingegeben. Das bedeutet, dass für die Zone „FOYER_LUFTRAUM“ drei Multifunktionsdrucker als interne Lasten eingerechnet werden. Zudem wird für jeden Besprechungsraum ein Videokonferenzsystem mit Fernseher hinzugefügt. Außerdem wird hier die auf die Fläche bezogene Beleuchtung berücksichtigt, die auch dem Belegungsplan des Bürogebäudes folgt.

In der Simulation wird davon ausgegangen, dass die personenbezogene Büroausstattung (Tablet-PC, Bildschirme) nach der Personenanzahl im Büro während der Arbeitszeit eingeschaltet und nachts ausgeschaltet werden. Die Ausstattung, die von Personen unabhängig ist, wird den ganzen Arbeitstag als eingeschaltet und nachts als ausgeschaltet angenommen.

Für die Berechnung der internen Lasten werden in TRNSYS zwei Skalen verwendet, die miteinander multipliziert werden. Eine Skala kann z.B. für die Anzahl der Personen

im Raum verwendet werden und die andere für den Stundenplan. Es ist anzumerken, dass in TRNSYS die Umrechnung von W in kJ/h erforderlich ist.

Ein Beispiel für die Berechnung der internen Lasten in TRNSYS sieht wie folgt aus:

$$Q_K = \text{Anzahl der Personen} \cdot \text{Belegungsplan (in \%)} \cdot Q_{\text{Pers}} \cdot a \quad (4)$$

Q_{Pers} Wärmeabgabe bei Person in W

a Umrechnungsfaktor in kJ/(hW)

Daraus ergibt sich:

$$Q_K = 45 \cdot 0,3 \cdot 120 \text{ W} \cdot 3,6 \frac{\text{kJ}}{\text{hW}} = 5832 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \quad (5)$$

Hier wird die Wärmeabgabe der Menschen für die Zone „BUERO_M“ mit 45 Arbeitsplätzen in der Zeit, in der die Zone nur zu 30% belegt ist, berechnet. Das bedeutet, dass während dieser Zeit die in der Zone sitzenden Menschen die Wärme von 5832 kJ pro Stunde an die Umgebung abgeben. Weitere Berechnungen werden nach dem identischen Prinzip durchgeführt.

3.2.2 Wohngebäude

Im Wohnbereich des Gebäudes spielt die Anzahl der Bewohner für die Kühllastberechnung eine große Rolle, deswegen wird in der Tabelle 8 die Besetzung der Wohnzonen dargestellt.

Tabelle 8. Anzahl der Personen im Wohnbereich

Zone	Anzahl der Personen
WE_03_AW (Eckwohnung)	2
WE_03_JS (drei 2-Person-Wohnungen)	6
WE_MIT_RK (1-Person-Wohnung)	1
WE_03_NP (1-Person-Wohnung + 2-Person-Wohnung)	3
SCHLAF_3OG	1
WE_03_RS (Eckwohnung)	4
4OG_DR (4 Obergeschoss)	16

In der Berechnung muss berücksichtigt werden, dass im Gegensatz zu dem Bürogebäude der Wohnbereich auch am Wochenende besetzt ist. Es ist aber klar, dass sich die Zonen werktags und am Wochenende unterschiedlich verhalten, weshalb der Belegungsplan angepasst werden muss.

Tabelle 9. Belegungsplan Werktag/Wochenende

Werktag		Wochenende	
Zeit	Belegung in %	Zeit	Belegung in %
00:00 – 08:00	100	00:00 – 10:00	100
08:00 – 12:00	30		
12:00 – 16:00	50	10:00 – 20:00	50
16:00 – 20:00	80		
20:00 – 23:00	100	20:00 – 23:00	100

In der Tabelle 9 wird davon ausgegangen, dass werktags die Wohnzonen nachts voll belegt sind. In der Zeit von 08:00 bis 12:00 befinden sich nur 30 % des Menschen zuhause, weil während dieser Zeiten manche Personen zum Studium oder zur Arbeit gehen. Weiterhin wird festgelegt, dass sich von 16:00 bis 20:00 schon 80 % der Menschen in ihren Wohnungen aufhalten. Ab 20:00 sind die Zonen wieder vollständig belegt.

Die Tabelle 9 zeigt auch den Belegungsplan am Wochenende. Da es schwierig ist, das Verhalten der Menschen am Wochenende vorherzusagen, wird hier angenommen, dass die Hälfte der Menschen von 10:00 bis 20:00 zuhause abwesend ist. Außerhalb dieser Zeiten sind die Wohnungen zu 100% belegt.

Da die Ausstattung einer Wohnung sehr personenbezogen ist, müssen die interne Lasten von elektrischen Geräten anders bestimmt werden. Dafür wird in der Simulation angenommen, dass der Strom, der in einer Wohnung verbraucht wird, komplett in Wärme umgewandelt wird.

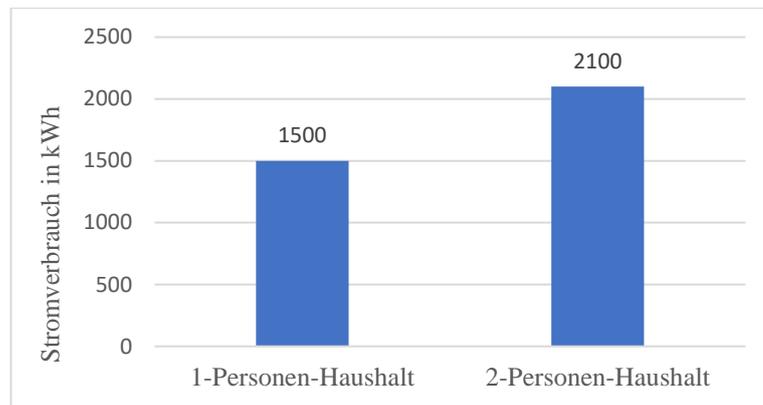


Abbildung 11. Jährlicher Stromverbrauch eines Haushalts im Jahr 2019 nach [25]

Die Abbildung 11 beschreibt den jährlichen Stromverbrauch eines 1-Personen und 2-Personen-Haushalts im Jahr 2019. Weiterhin werden die Angaben in Wh/h umgerechnet und als Ergebnis wird betrachtet, dass in einer 1-Person/2-Person-Wohnung entsprechend 171 bzw. 240 Wh Strom, der weiterhin in Wärme umgewandelt wird, verbraucht wird.

3.2.3 Gastronomie

Der Gastronomiebereich stellt eine besondere Herausforderung in der Planung dar, weil mit erheblichen internen Lasten zu rechnen ist. Laut der Information von der Projektbeteiligten ist der Gastronomiebereich montags bis freitags von 08:00 bis 20:00 geöffnet. Die maximale Anzahl der Sitzplätze in den drei Gastronomiebereichen sieht wie folgt aus:

GASTRO_N – 70 Sitzplätze

GASTRO_M – 56 Sitzplätze

GASTRO_S – 76 Sitzplätze

Für die Gastronomiezone gilt der folgende Belegungsplan:

Tabelle 10. Belegungsplan Gastronomie

Zeit	Belegung in %
00:00 – 08:00	0
08:00 – 09:00	10
09:00 – 12:00	30
12:00 – 14:00	100
14:00 – 16:00	50
16:00 – 20:00	100
20:00 – 23:00	0

In der Tabelle 10 ist zu sehen, dass die Gastronomie während der Mittagszeit (12-14 Uhr) sowie zwischen 16 und 20 Uhr, wenn die meisten Menschen Feierabend haben, am meisten besetzt ist.

Für die Beleuchtung der Gastronomiefläche wird ein Betrag von 10 W/m^2 über die Öffnungszeiten angesetzt.

Da das Projekt sich in einer frühen Planungsphase befindet, sind keine Angaben zur Ausstattung der gewerblichen Küchen verfügbar. Deswegen wird in der Simulation wie schon im Wohnbereich von dem jährlichen durchschnittlichen Stromverbrauch ausgegangen.

Laut der Studie von R. Gloor gehören 30 % des gesamten Stromverbrauchs zur gastronomischen Küche. Der durchschnittliche Stromverbrauch für ein Restaurant mit 80 Sitzplätzen beträgt $600 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [26]. Daraus wurde die Wärmeabgabe in einer gewerblichen Küche von $20,5 \text{ W/m}^2$ berechnet.

Hier muss darauf geachtet werden, dass die Zone „KUECHE_PERS“ nicht als gewerbliche Küche, sondern als Ort, in dem Mitarbeiter das Essen warm machen können, betrachtet werden muss. Deswegen kommt in dieser Zone eine Mikrowelle zum Einsatz, die 600 W Wärme an die Umgebung abgibt. Außerdem wird der Zone „GASTRO_M“ die Wärmeabgabe von 653 W zugerechnet, weil 25% der Zonenfläche als Industrieküche genutzt werden.

Der wichtigste Type für die Simulation ist Type 56, das Multizonengebäude „Multizone Building“ (siehe Abbildung 12), in dem alle Informationen über das Gebäude enthalten sind. Über TRNBuild können die in den vorherigen Abschnitten betrachtete Faktoren, wie Aufbau der Bauteile und interne Lasten, nach ihrer Anzahl, Eigenschaft und Nutzungsdauer festgelegt und weiterhin in das Gebäudemodell integriert werden.

Eine wichtige Rolle spielt in dieser Simulation Type 15 (hier „Weather“ genannt). Aus diesem Type werden die Wetterdaten herausgelesen. Der Type „Weather“ hat beispielsweise die Lufttemperatur als Output-Größe, die weiterhin dem Type 56 als Input-Größe dient. Als Wetterdatensatz wird in der Simulation der Datensatz DE-Hamburg-Fuhlsbüttel verwendet, in dem die stündlich aufgelösten Wetterdaten für die Referenzjahre enthalten sind.

Auf der linken Seite der Simulationsoberfläche befinden sich selbst erstellte Berechnungsmodule, in denen einige Parameter für die Gebäuderegulung geändert werden können. Diese Berechnungsmodule ermöglichen die Einstellung der Parameter nicht in TRNBuild sondern direkt im Studio, was die Simulationsparametrierung wesentlich vereinfacht. In dem Berechnungsmodul „Interne Lasten“ können die Angaben zur Wärmeabgabe von Menschen, Geräten und Beleuchtung variiert werden. Über das Berechnungsmodul „Heizung/Cooling“ lassen sich die erforderlichen Temperaturen für das Heizen und Kühlen einstellen und verändern. Laut Abschnitt 1.7 muss das Gebäude immer auf 20° C geheizt werden. Für die aktive Kühlung wird die maximal zulässige Temperatur von 26° C eingestellt. Außerdem lässt sich über dieses Berechnungsmodul die Heizung/Kühlung an- und ausschalten. Zur Regelung der Luftwechselrate für eine Zone dient das Berechnungsmodul „Lüftung“. Hier kann die Luftwechselrate nach Bedarf erhöht oder reduziert werden.

Auf der rechten Seite der Simulationsoberfläche befinden sich die Elemente, die die Simulationsergebnisse darstellen.

Über das Berechnungsmodul „Übertemperaturgradstunden“ werden nach dem in Abschnitt 1.6 beschriebenen Verfahren die Übertemperaturgradstunden berechnet. Als Bezugswert für die Berechnung wird die operative Temperatur von 26° C angenommen.

Für die Berechnung des Wärme- und Kältebedarfs wird das Berechnungsmodul unten rechts genutzt. Hier werden die Heiz- und Kühllasten einzelner Zonen summiert, um die gesamte Heiz- und Kühllast für das Gebäude zu berechnen. In der Simulation werden

die Ergebnisse zeitlich aufgelöst, deswegen ist es möglich, über die Zeit integriert aus den Heiz- und Kühllasten eine Heiz- und Kühlarbeit zu berechnen.

Um die gewünschten Ergebnisse wie z.B. Temperaturverlauf oder Heiz- und Kühllast im zeitlichen Verlauf grafisch darstellen zu können, werden die sogenannten Types 65 „Online Plotter“ genutzt. Für die Auswertung der Simulationsergebnisse wird das Zeitintervall von 8760 Stunden (1 Jahr) mit einem stündlichen Zeitschritt eingestellt. Auf der Abbildung 12 sind die Verknüpfungen zwischen Output und Online-Plotter in grünen gestrichelten Linie dargestellt.

4 Auswertung der Ergebnisse

Nach der Gebäudeparametrierung wurde die Simulation mit variierenden Einstellungen durchlaufen. Es wurden verschiedene Szenarien untersucht, in denen die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter ausgewertet und verglichen wurden. Letztlich wurde die Kombination der Parameter gefunden, damit das mit möglichst geringem Energieaufwand funktionierende Gebäude geplant werden kann.

Alle in der Simulation dargestellten Temperaturen sind operative Temperaturen. Für alle Varianten werden die internen Lasten, wie im Kapitel 3.2 beschrieben, angenommen.

4.1 Ohne interne Lasten

Zuerst soll festgelegt werden, wie das Gebäude auf die Einflüsse der internen Lasten reagiert. Dafür wurde der Fall untersucht, wenn das Gebäude das ganze Jahr keine internen Lasten hat. In diesem Fall wird das Gebäude nur durch die Außentemperatur beeinflusst.

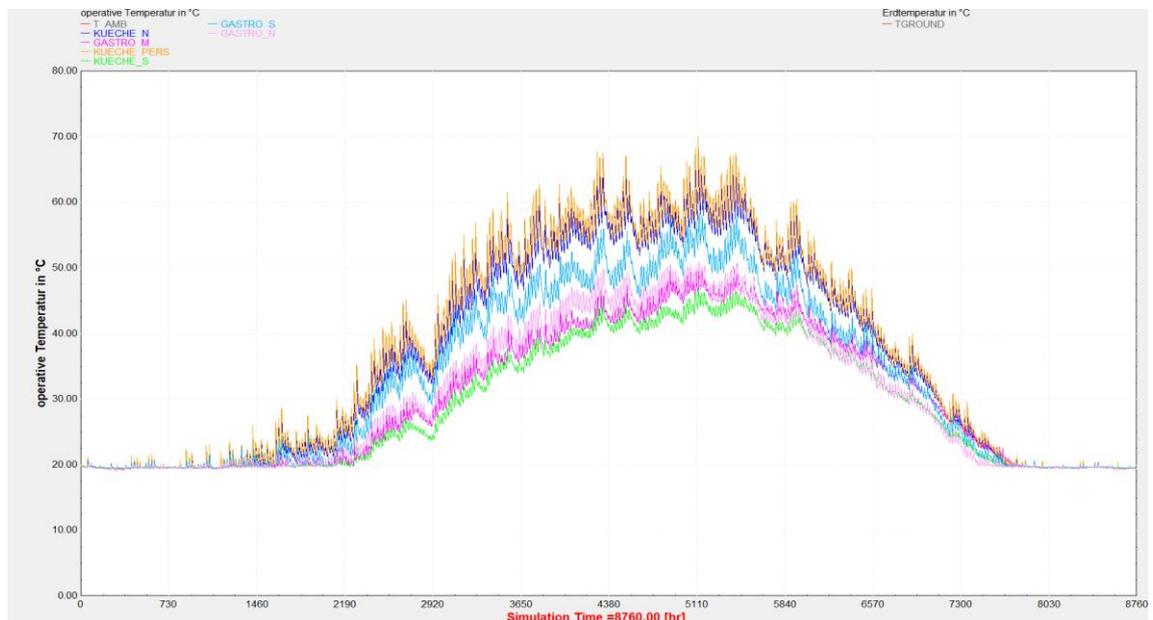


Abbildung 13. Temperaturverlauf im Gastronomiebereich ohne interne Lasten

Die Abbildung 13 zeigt die Entwicklung der Raumtemperaturen im Gastronomiebereich. Während der Simulation wird das Gebäude immer auf 20° C geheizt, deswegen sind die Raumtemperaturen während der Heizperiode immer auf diesem Niveau aufrechterhalten. Es wird deutlich, dass sich das Gebäude im Sommer

durch die Außentemperatur sehr stark erhitzt. Besonders kann das in zwei gastronomischen Küchen („KUECHE_N und „KUECHE_PERS“) beobachtet werden, in denen die Temperaturen bis zu 70° C erreichen. Der erste Grund besteht darin, dass wegen der kleinen Flächen und großen Fenster (siehe Abbildung 5) die Zonen durch die Solarstrahlung sehr stark beeinflusst werden. Der zweite Grund ist, dass in dieser Variante das Gebäude nicht gelüftet wird.

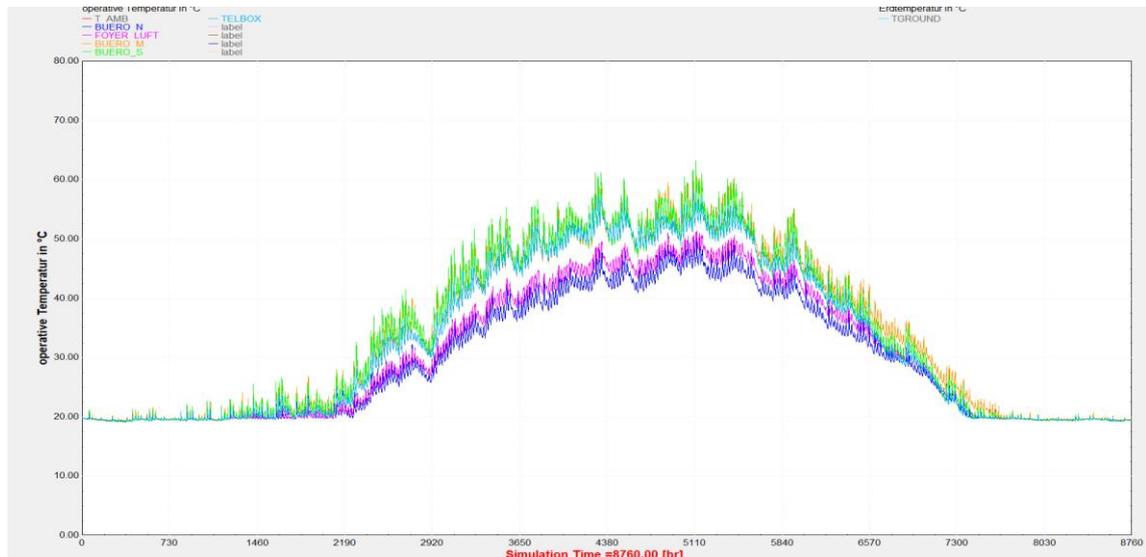


Abbildung 14. Temperaturverlauf im Bürobereich ohne interne Lasten

Auf der Abbildung 14 ist der Temperaturverlauf im Bürobereich zu sehen. Da auf der Ostseite die Bürozonen komplett verglast sind (siehe Abbildung 5), sind hier wie im Gastronomiebereich hohe Temperaturen auftreten.

Die sehr hohen Temperaturen in Gastronomie- und Bürobereichen beeinflussen den Wohnbereich, weil über die Decken der Wärmeaustausch zwischen den Zonen geschieht. Auf der Abbildung 15 sind die Raumtemperaturen im Wohnbereich dargestellt.

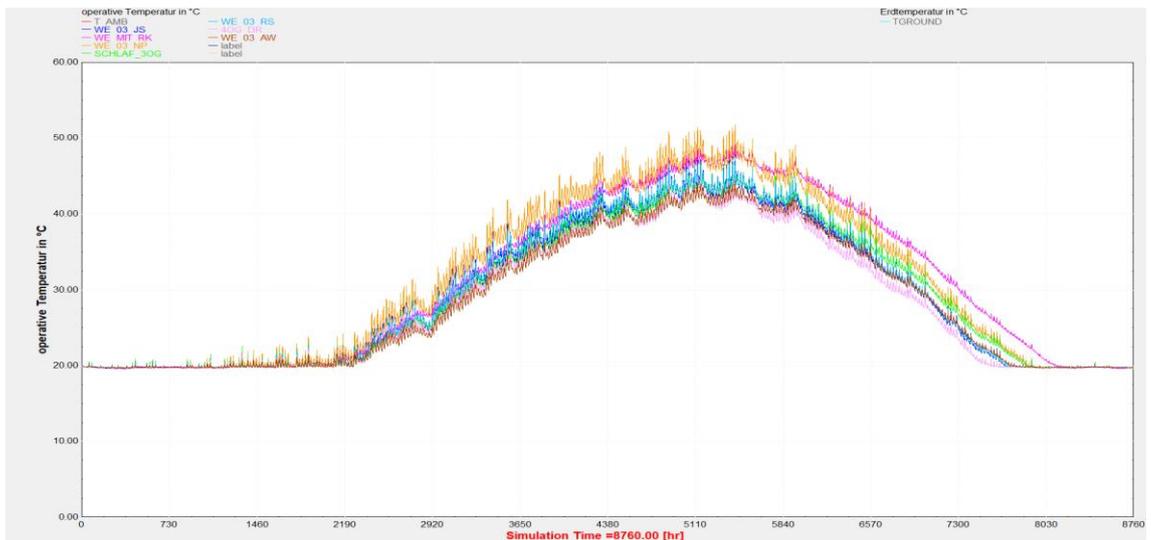


Abbildung 15. Temperaturverlauf im Wohnbereich ohne interne Lasten

Es ist zu sehen, dass die Temperaturen vom April bis Oktober oberhalb von 40° C liegen, obwohl die Wohnungen keine großen Fenster haben. Dies kann sicherlich als unbehaglich betrachtet werden. Um den thermischen Einfluss genauer zu entdecken, wurden zwei Wohnzonen („WE_MIT_RK“ und WE_4OG_DR) als Referenz ausgewählt. Für diese Zonen wurden die maximalen Raumtemperaturen ermittelt und ebenfalls die Übertemperaturgradstunden (UTS) berechnet. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 11 dargestellt:

Tabelle 11. Maximale Temperaturen und UTS in einzelnen Wohnzonen

Zone	T _{max} in °C	UTS
WE_MIT_RK (3OG)	49	63.681
4OG_DR	45	42.659

Um den thermischen Einfluss auf den Wohnbereich zu minimieren, wird im Gastronomie- und Bürobereiche die aktive Kühlung zugeschaltet. Die aktive Kühlung behält die Temperatur in einer Zone auf 26° C und deshalb können keine UTS in der Zone auftreten. Die Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der Raumtemperaturen im Wohnbereich, wenn die Gastronomie- und Bürobereiche gekühlt werden.

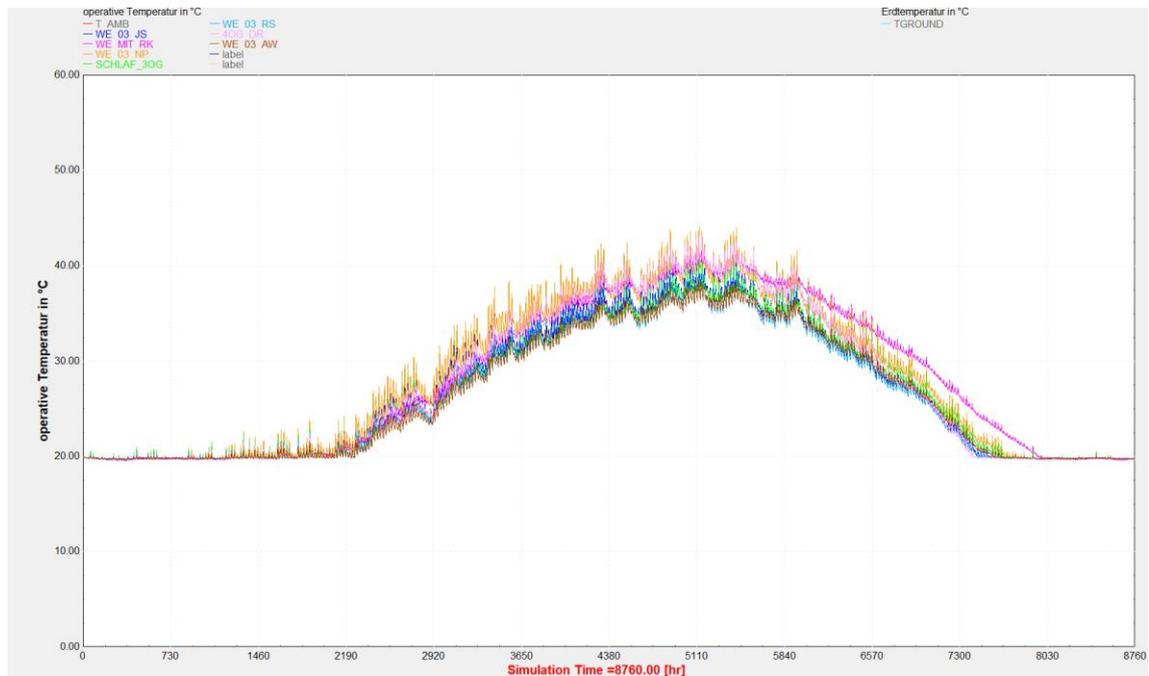


Abbildung 16. Temperaturverlauf im Wohnbereich ohne interne Lasten mit Kühlung

Es wird deutlich, dass im Vergleich zur Abbildung 15 die Temperaturen bei der Abbildung 16 in einem niedrigeren Bereich liegen. Während die Temperaturen bei der Abbildung 15 bis zu 50° C erreichen, sind diese bei der Abbildung 16 um ca. 10° C niedriger. Die Temperaturen und die Anzahl der UTS für Referenzzonen sind in der Tabelle 12 dargestellt:

Tabelle 12. Maximale Temperaturen und UTS in einzelnen Wohnzonen mit Kühlung

Zone	T _{max} in °C	UTS
WE_MIT_RK (3OG)	42	39.627
4OG_DR	43	36.170

Es wird verdeutlicht, dass im Fall, wenn die Gastronomie- und Bürobereiche gekühlt werden, die maximale Raumtemperaturen im Wohnbereich sinken. Die Anzahl der UTS für die Zonen „WE_MIT_RK“ und „4OG_DR“ wurde entsprechend um 24.054 oder 38 % und 6489 oder 15 % verringert. Im 4. Obergeschoß ist die Differenz nicht so groß, weil diese Zone nicht direkt von dem Bürobereich beeinflusst wird, sondern von dem 3 Obergeschoß.

Obwohl die Anzahl der UTS im Wohnbereich immer noch auf hohem Niveau liegt, kann zusammengefasst werden, dass die Gastronomie- und Bürobereiche einen starken Einfluss auf die Raumtemperaturen im Wohnbereich haben. Deswegen wurde entschieden, die weitere Untersuchung des Wohnbereichs mit der in Gastronomie- und

Bürobereiche eingeschalteten Kühlung durchzuführen, was einer realistischen Nutzung vom Gebäude entspricht.

4.2 Mit internen Lasten

Weiterhin werden die in Abschnitt 3.2 definierten internen Lasten dem Gebäude hinzugefügt, um am Beispiel des Wohngebäudes zu untersuchen, wie sich die internen Lasten auf die Raumtemperaturen auswirken. Die operativen Temperaturen werden in der Abbildung 17 dargestellt.

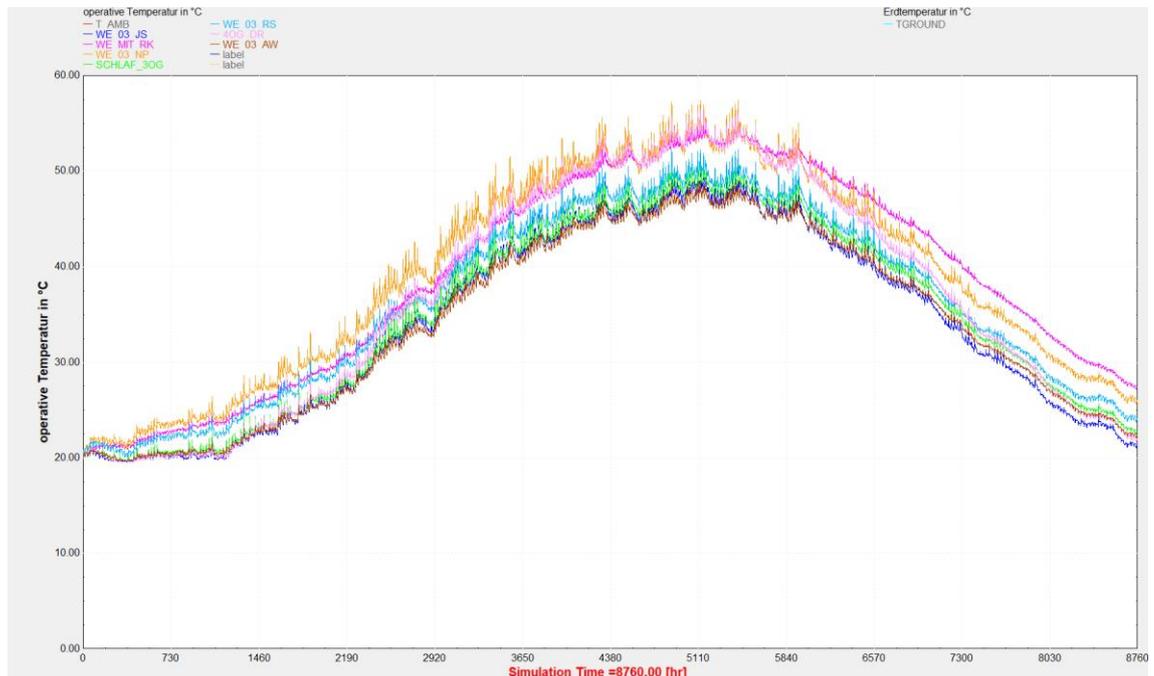


Abbildung 17. Temperaturverlauf im Wohnbereich mit internen Lasten

Im Vergleich zur Abbildung 16 kann gefolgert werden, dass der thermische Einfluss auf den Wohnbereich durch die internen Lasten wieder aufgehoben wird. Wesentlich hohe Temperaturen im Sommer zeigen, dass die abgegebene Wärme vom Gebäude abgeführt werden muss, um das behagliches Raumklima aufrechtzuerhalten. Das muss unbedingt bei der Gebäudeplanung berücksichtigt werden.

4.3 Gebäudelüftung

Eine Möglichkeit, mit der die thermischen Lasten abgeführt werden können, ist die Gebäudelüftung. Mithilfe eines optimierten Lüftungssystems kann der Energieaufwand für die Gebäudeklimatisierung minimiert werden. Eine andere Aufgabe der Luftanlage

besteht darin, eine behagliche Raumlufthqualität sicherzustellen. Über die Atmung des Menschen wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt, der sich weiterhin in einem Raum ansammelt und abgeführt werden muss. Deswegen ist es notwendig, einen Luftwechsel, mit dem die zulässige CO₂-Konzentration in einem Raum eingehalten wird, festzulegen.

In der Simulation werden drei Szenarien untersucht, um zu überprüfen, welchen Einfluss die unterschiedlichen Luftmengen auf die Raumtemperaturen haben und wie der Energieaufwand bei der angepassten Lüftung minimiert werden kann.

4.3.1 Szenario 1 (Basisvariante)

Laut der Arbeitsstättenrichtlinie ASR 5 wird bei überwiegend sitzender Tätigkeit ein Luftvolumenstrom von 30 m³/h pro Person angefordert. Bei der Belastung durch Tabakrauch ist nach ASR 5 der zusätzliche Luftvolumenstrom von 10 m³/h pro Person erforderlich [27]. In dieser Arbeit handelt es sich um nicht tabakbelastete Gebäude, deswegen wird für das erste Szenario ein Luftvolumenstrom von 30 m³/h pro Person angenommen.

Bei den Wohnungen gibt es aber eine Ausnahme, weil für diese innenliegende Bäder geplant sind. Gemäß der DIN 18017-3 „Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Außenfenster“ muss bei den Wohnungen mit innenliegenden Bädern der Luftvolumenstrom von 60 m³/h sichergestellt werden [28].

Für die Lüftungseinstellung wird in TRNSYS eine Luftwechselrate verwendet. Eine Luftwechselrate beschreibt die Häufigkeit des Luftaustauschs in einem Raum innerhalb einer Stunde und definiert das Verhältnis von dem Luftvolumenstrom in m³/h zu dem Volumen eines Raums in m³ [8].

$$n = \frac{\text{Luftvolumenstrom}}{\text{Raumvolumen}}, \text{ 1/h} \quad (5)$$

Ein Luftwechsel von 1 /h bedeutet, dass die gesamte Raumlufth einmal pro Stunde ausgetauscht wird.

Da sich die Anzahl der Personen und dementsprechend der Luftvolumenstrom unterscheiden, muss die Luftwechselrate für jede Zone einzeln berechnet werden. Die Berechnung der Luftwechselrate erfolgt mit der folgenden Formel:

$$n = \frac{NL}{V} \quad (6)$$

mit

n	Luftwechselrate in 1/h
N	Anzahl der Personen
L	Luftvolumenstrom pro Person in m^3/h
V	Raumvolumen in m^3

Nach der Berechnung der Luftwechselrate für einzelne Zonen wurde zur Vereinfachung der Mittelwert der erforderlichen Luftwechselrate für Gebäudebereiche ausgerechnet. Die eingestellten Luftwechselraten nach Zonen werden in der Tabelle 13 dargestellt. Diese wird im weiteren als Bestandslüftung bezeichnet.

Tabelle 13. Erforderliche Luftwechselrate nach Zonen

Zone	Luftwechselrate in 1/h
Gastronomie	2,4
Küche	0,6
Büro	0,4
TELBOX	1,1
WC	0,1
Besprechungsraum	3,3
1-Person-Wohnung	0,4
2-Person-Wohnung	0,4

Nach der Einstellung der Luftwechselrate in TRNSYS wurde die Simulation durchgeführt, um die Entwicklung der Raumtemperaturen mit der angeschalteten Lüftung zu ermitteln. Die internen Lasten wie im Kapitel 3.2 beschrieben sind auch eingeschaltet.

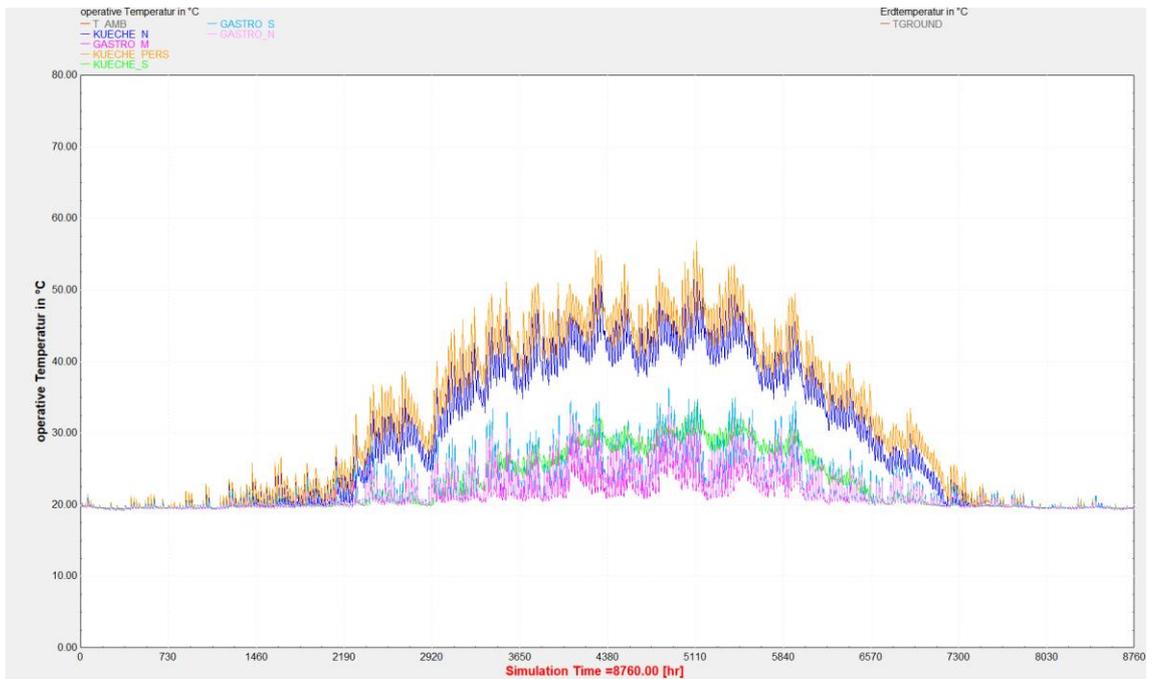


Abbildung 18. Temperaturverlauf im Gastronomiebereich mit der angeschalteten Lüftung

Auf der Abbildung 18 sind wieder zwei kritische Räume („KUECHE_N und „KUECHE_PERS“) gut zu sehen, in denen die Raumtemperaturen oberhalb der anderen Zonen liegen. Es wird aber deutlich, dass beim Vergleich von der Abbildung 13 und Abbildung 18 die Raumtemperaturen auf der Abbildung 18 sich aufgrund der angeschalteten Lüftung in einem niedrigeren Bereich befinden, obwohl bei der Abbildung 13 im Gebäude keine internen Lasten sind.

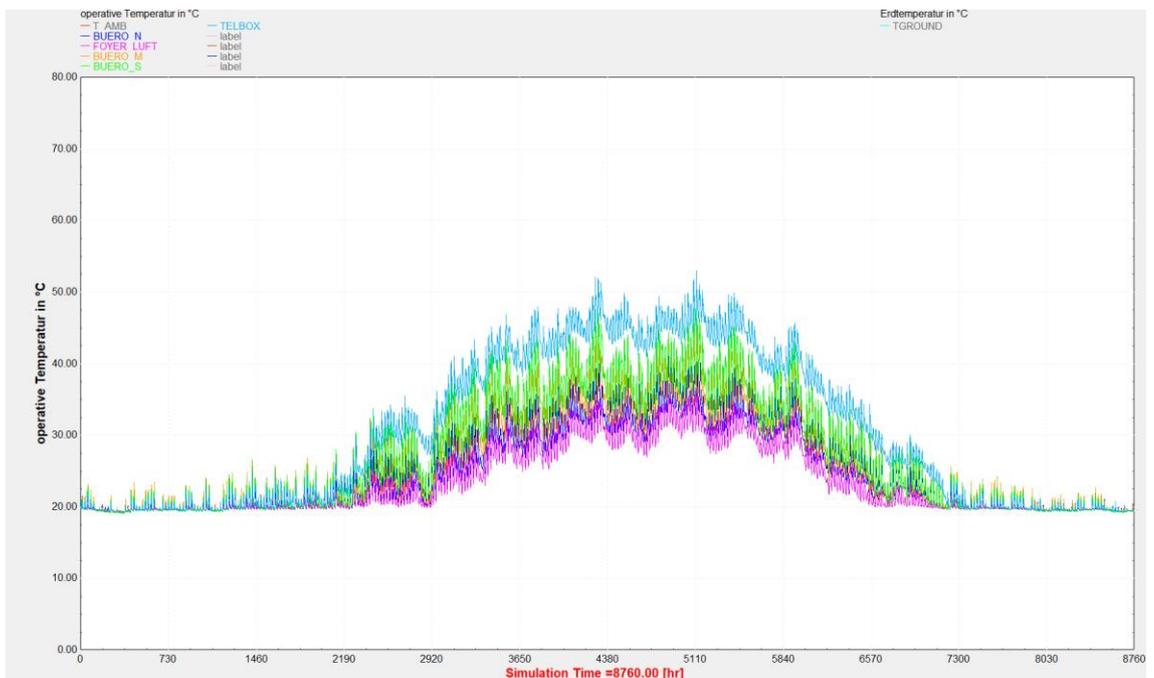


Abbildung 19. Temperaturverlauf im Bürobereich mit der angeschalteten Lüftung

Die Abbildung 19 veranschaulicht die Temperatursenkung im Bürobereich mit der eingeschalteten Lüftung ebenso wie im Gastronomiebereich. Daraus folgt, dass die Lüftung nicht nur die Wärmeabgabe von Menschen und Geräten kompensiert, sondern auch eine Kühlfunktion hat. Bei einer richtig angepassten Lüftung können die sommerlichen Raumtemperaturen deutlich verringert werden und so den Kühlbedarf reduzieren.

Der Temperaturverlauf im Wohnbereich ist in der Abbildung 20 zu sehen.

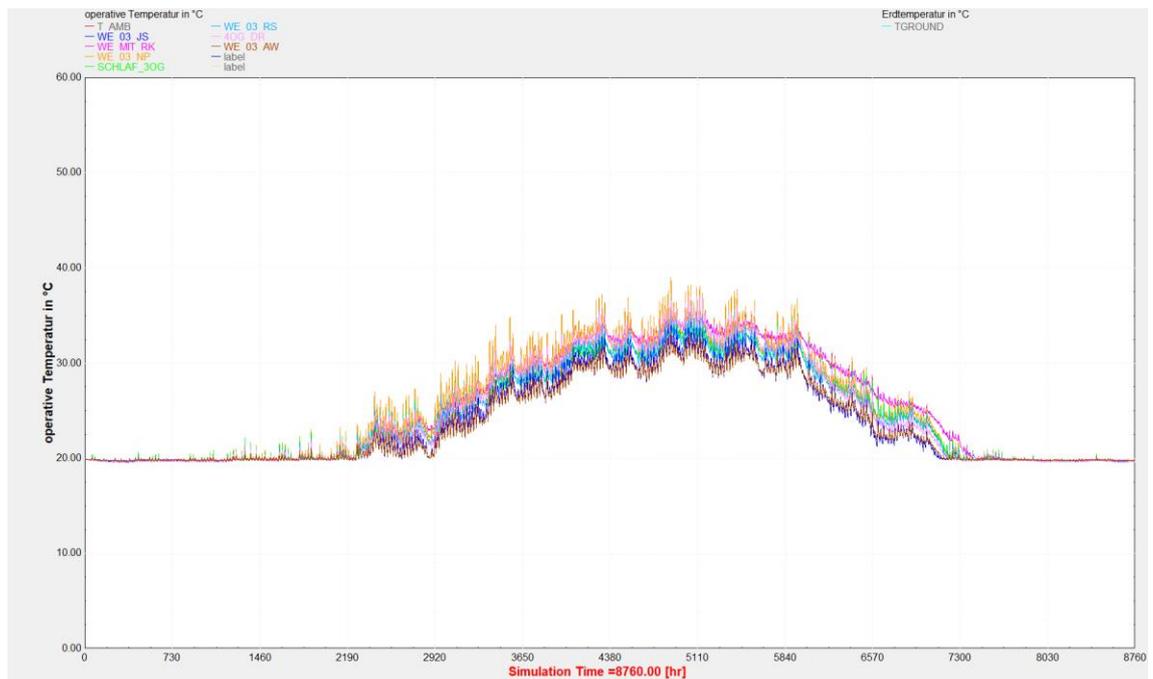


Abbildung 20. Temperaturverlauf im Wohnbereich mit der angeschalteten Lüftung

Obwohl hier die Raumtemperaturen immer noch als unbefriedigend betrachtet werden, kann die positive Einwirkung der Gebäudelüftung auf das Raumklima auch im Wohnbereich beobachtet werden. Da aber in Wohnungen das behagliche Raumklima ohne aktive Kühlung aufrechterhalten werden muss, müssen weitere Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz untersucht werden.

In der Tabelle 14 sind die gerechneten Übertemperaturgradstunden für jede Zone mit der Bestandslüftung dargestellt:

Tabelle 14. Übertemperaturgradstunden nach Zonen mit der Bestandslüftung

Gebäudetyp	Zone	UTS	Grenzwert überschritten?
Gastronomie	GASTRO_N	2295	ja
	GASTRO_M	1396	ja
	GASTRO_S	3995	ja
	KUECHE_N	52.751	ja
	KUECHE_PERS	67.528	ja
	KUECHE_S	7633	ja
Büro	BUERO_N	18.866	ja
	FOYER_LUFT	11.140	ja
	BUERO_M	28.250	ja
	BUERO_S	35.614	ja
	TELBOX	59.961	ja
Besprechungsräumen	BSP_EG	10	nein
	BSP_1OG	371	nein
	BSP_2OG1	982	ja
	BSP_2OG2	245	nein
	BSP_3OG	585	ja
Wohngebäude	WE_03_AW	9313	ja
	WE_03_JS	10.800	ja
	WE_MIT_RK	19.732	ja
	WE_03_NP	19.680	ja
	WE_SCHLAF	15.360	ja
	WE_03_RS	15.015	ja
	4OG_DR	17.038	ja

In der Tabelle 14 ist zu sehen, dass fast bei jeder Zone die Anzahl der Übertemperaturgradstunden den Grenzwert überschreitet. In Rot sind die Räume mit der höchsten Anzahl an UTS dargestellt. In Grün markiert sind die Zonen, die schon bei der Bestandslüftung das Bewertungskriterium erfüllen. Es handelt sich hierbei um die Besprechungsräume, in denen wegen der hohen Anzahl der Personen in einem kleinen Raumvolumen die hohe Luftwechselrate erforderlich ist.

Um beurteilen zu können, wie in der Simulation untersuchte Maßnahmen zur Energieoptimierung wirklich den Energieaufwand des Gebäudes beeinflussen, wurde hier auch die Heiz- und Kühllast berechnet.

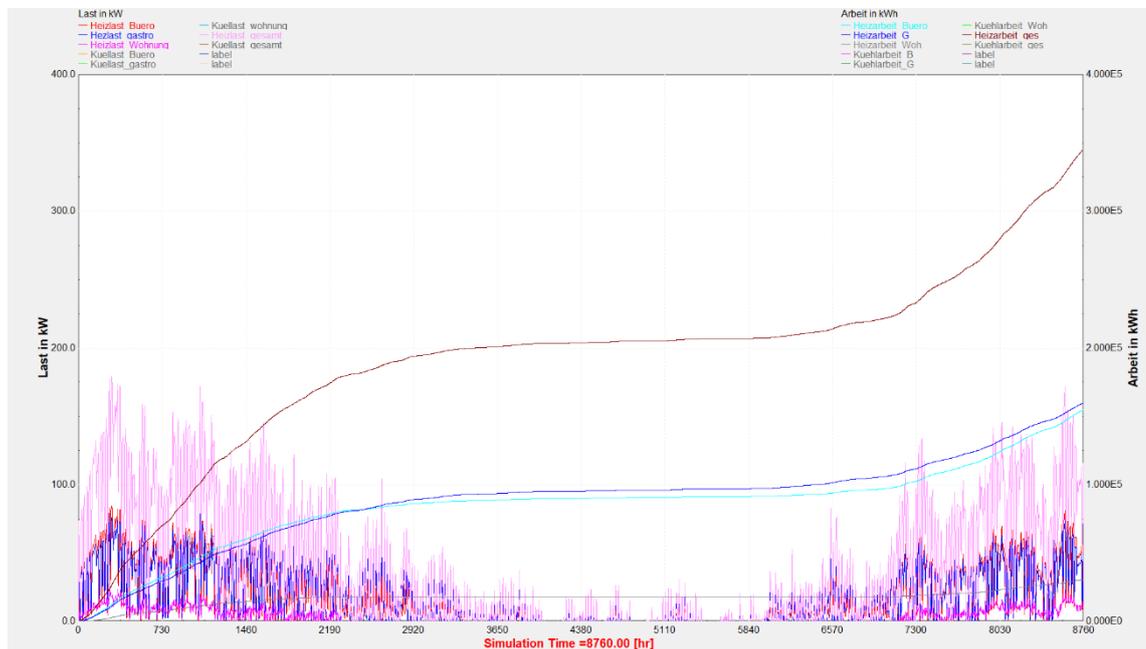


Abbildung 21. Heizlast und Heizarbeit mit der Bestandslüftung

In hellem Pink ist in der Abbildung 21 die Heizlast des gesamten Gebäudes dargestellt. Die gesamte Heizarbeit ist in braun abgebildet. Die Heizlast im Gastronomiebereich ist in Blau, im Büro in Rot und in Wohnungen in dunklerem Pink gekennzeichnet. Die Heizarbeiten der Büro- und Gastronomiebereiche sowie des Wohnbereiches sind entsprechend in Blau, Hellblau und in Grau abgebildet. Die Gesamtheizarbeit ist in Braun dargestellt. Auf der Abbildung 21 ist die Heizperiode von etwa Mitte September bis April gut erkennbar. Im Vergleich zum Wohnbereich haben die Gastronomie- und Bürobereiche eine viel höhere Heizarbeit, weil diese Zonen einen viel größeren Flächenanteil und entsprechend höhere Wärmeverluste haben.

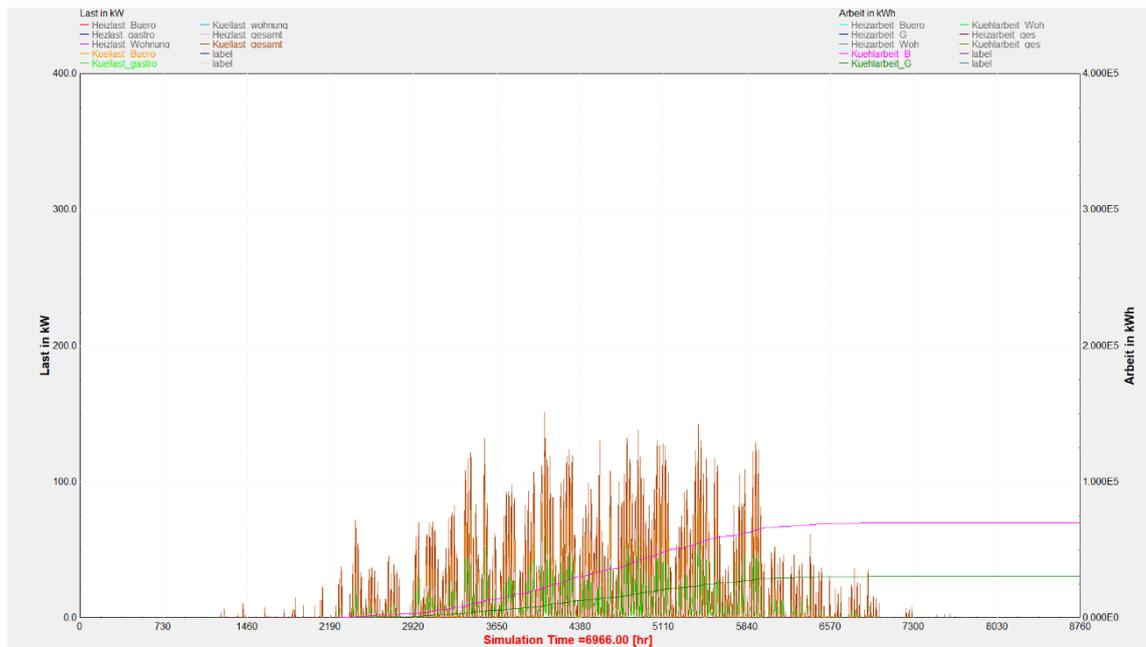


Abbildung 22. Kühllast und Kühlarbeit mit der Bestandslüftung

Auf der Abbildung 22 wird die Kühllast und Kühlarbeit dargestellt. Die gesamte Kühllast erstreckt sich über die Periode von April bis September und erreicht ihr Maximum Mitte Juni. Die Kühlarbeit zeigt in dieser Periode einen steigenden Verlauf und bleibt bis zum Jahresende konstant.

Für die Gegenüberstellung unterschiedlicher Varianten ist die grafische Darstellung der Simulationsergebnisse allein nicht ausreichend, deswegen wurden die einzelnen Größen auch quantitativ genau bestimmt. In der Tabelle 15 sind die Spitzenlasten für Heizung und Kühlung sowie die Heiz- und Kühlarbeit nach Gebäudebereichen und insgesamt dargestellt:

Tabelle 15. Spitzenlasten und Arbeiten für Basisvariante

	Spitzenlast Heizung in kW	Spitzenlast Kühlung in kW	Jährliche Heizarbeit in kWh	Jährliche Kühlarbeit in kWh
Gastronomie	77,8	59,6	159.864	30.862
Büro	84,7	104,1	154.984	70.373
Wohnung	24,9	-	30.651	-
Gesamt	187,4	163,7	345.499	101.235

In der Arbeit wird dieses Szenario als Basisvariante betrachtet, deswegen werden im Folgenden alle Simulationsergebnisse mit dieser Variante verglichen.

4.3.2 Szenario 2 (verdoppelte Luftwechselrate)

In diesem Szenario wird untersucht, wie sich eine erhöhte Luftwechselrate auf das thermische Gebäudeverhalten auswirkt. Hier wurde für die Gebäudelüftung die doppelte Luftwechselrate eingestellt. Die in dieser Variante eingestellte Luftwechselrate wird in der Tabelle 16 dargestellt:

Tabelle 16. Verdoppelte Luftwechselrate nach Zonen

Zone	Luftwechselrate in 1/h
Gastronomie	4,8
Küche	1,2
Büro	0,8
TELBOX	2,2
WC	0,2
Besprechungsraum	6,6
1-Person-Wohnung	0,8
2-Person-Wohnung	0,8

Da die Gebäudelüftung auch eine kühlende Funktion hat, führt die erhöhte Luftwechselrate zur deutlichen Raumtemperatursenkung und somit zur Verringerung der UTS in den Zonen. Die gerechneten Übertemperaturgradstunden sind in der Tabelle 17 zu sehen. Im Vergleich zu der Tabelle 14 wird in der Tabelle 17 noch eine Spalte „Differenz zur Basisvariante“ hinzugefügt, die zeigt, wie die Anzahl der Übertemperaturgradstunden sich im Vergleich zur Basisvariante unterscheidet. Es wird deutlich, dass mit der verdoppelten Lüftung mehr Zonen im grünen Bereich liegen und die Anzahl der Übertemperaturgradstunden nach Zonen im Durchschnitt um 77% reduziert wurde. In kritischen Räumen wurden die Übertemperaturgradstunden wegen der geringen Fläche und dementsprechend kleinen Luftvolumenstrom am wenigsten verringert.

Tabelle 17. Übertemperaturgradstunden mit der verdoppelten Luftwechselrate

Gebäudetyp	Zone	UTS	UTS>Grenzwert?	Differenz zur Basisvariante in %
Gastronomie	GASTRO_N	505	ja	-78,0
	GASTRO_M	313	nein	-77,6
	GASTRO_S	891	ja	-77,7
	KUECHE_N	26.707	ja	-49,4
	KUECHE_PERS	34.417	ja	-49,0
	KUECHE_S	467	nein	-93,9
Büro	BUERO_N	4490	ja	-76,2
	FOYER_LUFT	1455	ja	-86,9
	BUERO_M	8132	ja	-71,2
	BUERO_S	13.147	ja	-63,1
	TELBOX	38.231	ja	-36,2
Besprechungsräume	BSP_EG	1	nein	-90,0
	BSP_1OG	76	nein	-79,5
	BSP_2OG1	197	nein	-79,9
	BSP_2OG2	36	nein	-85,3
	BSP_3OG	150	nein	-74,4
Wohngebäude	WE_03_AW	497	nein	-94,7
	WE_03_JS	1118	nein	-89,6
	WE_MIT_RK	3448	ja	-82,5
	WE_03_NP	3624	ja	-81,6
	WE_SCHLAF	2547	ja	-83,4
	WE_03_RS	2094	ja	-86,1
	4OG_DR	2699	ja	-84,2

Die grafische Darstellung der Heiz- und Kühllastberechnung für die Variante mit der verdoppelten Luftwechselrate ist den Abbildungen 23 und 24 zu entnehmen.

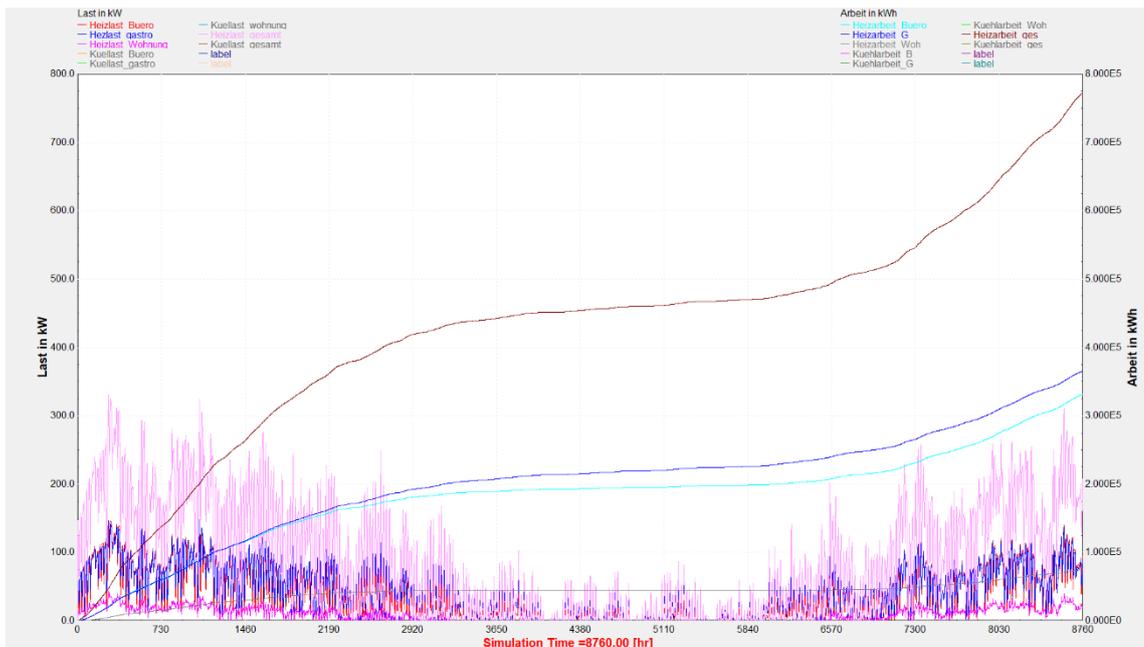


Abbildung 23. Heizlast und Heizarbeit mit der verdoppelten Luftwechselrate

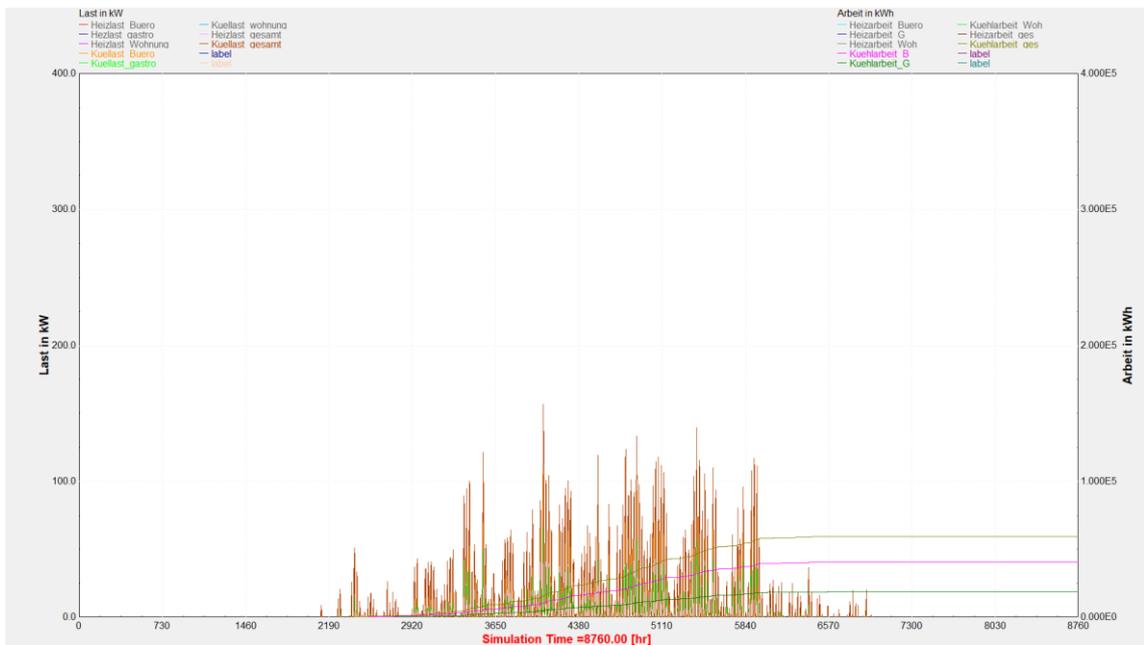


Abbildung 24. Kühllast und Kühlarbeit mit der verdoppelten Luftwechselrate

In der Abbildung 23 ist zu erkennen, dass die Heizlast und Heizarbeit in einem höheren Bereich liegen und die Heizperiode sich verlängert hat. Sogar Mitte August lässt sich die Spitzenlast für die Heizung von ca. 85,6 kW feststellen. Das liegt daran, dass sowohl in Gastronomiezone als auch in Besprechungsräumen durch die hohe Luftwechselrate viel Außenluft in den Raum gelangen wird. Anders herum zeigt die Abbildung 24, dass die Spitzenlast für Kühlung fast unverändert bleibt. Die Kühlarbeit hat sich reduziert, weil die Periode, in der das Gebäude gekühlt werden muss, sich verkürzt hat. Die quantitative Simulationsergebnisse sind in der Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18. Spitzenlasten und Arbeiten mit der verdoppelten Luftwechselrate

	Spitzenlast Heizung in kW	Spitzenlast Kühlung in kW	Jährliche Heizarbeit in kWh	Jährliche Kühlarbeit in kWh
Gastronomie	147,3	62,6	365.504	18.960
Büro	147	104,0	331.697	40.801
Wohnung	42,4	-	75.420	-
Gesamt	336,7	166,6	772.621	59.761

Da durch die hohe Luftwechselrate viel kalte Außenluft in die Zone gelangt, kann in dieser Variante ein deutlicher Anstieg des Heizbedarfs berücksichtigt werden, was die Abbildung 26 zeigt.

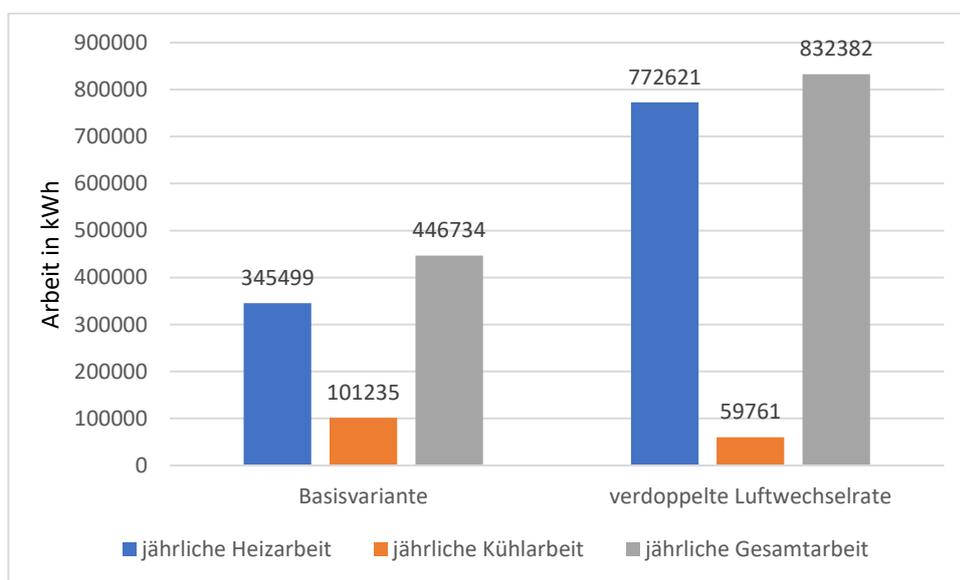


Abbildung 25. Gegenüberstellung der Arbeiten bei der verdoppelten Luftwechselrate

Aus der Abbildung 25 wird deutlich, dass sich die Heizarbeit bei der verdoppelten Luftwechselrate ebenfalls verdoppelt hat. Obwohl die Kühlarbeit bei der erhöhten Luftwechselrate auch um ca. 41 % gesunken ist, wird in dieser Variante betrachtet, dass das Gebäude das ganze Jahr durch die verdoppelte Luftwechselrate gelüftet wird. Aufgrund der Tatsache, dass die Raumtemperaturen sogar im Sommer wegen der erhöhten Lüftung unter 20° C liegen, muss das Gebäude auch im Sommer nachts geheizt und tagsüber wieder gekühlt werden, was nicht sinnvoll ist. Deswegen muss die Lüftung so angepasst werden, dass der Heizbedarf geringstmöglich geändert wird, aber die Raumtemperaturen im Sommer gesenkt werden. Dafür wird die sogenannte sommerliche Nachtlüftung verwendet.

4.3.3 Szenario 3 (sommerliche Nachtlüftung)

In dieser Variante wird untersucht, wie die sommerliche Nachtlüftung die Raumtemperaturen im Gebäude beeinflusst. Bei der sommerlichen Nachtlüftung wird die kühle Nachtluft genutzt, um das Gebäude während der Nacht zu kühlen. In der Simulation wird für die sommerliche Nachtlüftung die in der Tabelle 17 festgelegte Luftwechselrate angenommen. Es ist wichtig, dass das Gebäude im Sommer nicht unnötig beheizt wird, deswegen wird in der Simulation ausgegangen, dass die zusätzliche Lüftung nur ab 23° C erfolgt. Die Absenkung der Raumtemperatur durch die Lüftung kann nur dann funktionieren, wenn die Außentemperatur niedriger ist als die Raumtemperatur. Das wird in den sommerlichen Lüftungseinstellungen auch berücksichtigt.

Die sommerliche Nachtlüftung nur in Wohn- und Büroteil des Gebäudes. In dem Gastronomiebereich wurde auf Grund der Umsetzbarkeit auf die sommerliche Nachtlüftung verzichtet.

Zuerst sollte ermittelt werden, ob die sommerliche Nachtlüftung einen erheblichen Einfluss auf die Raumtemperaturen hat. In der Abbildung 26 wird der Temperaturverlauf im Wohnbereich dargestellt.

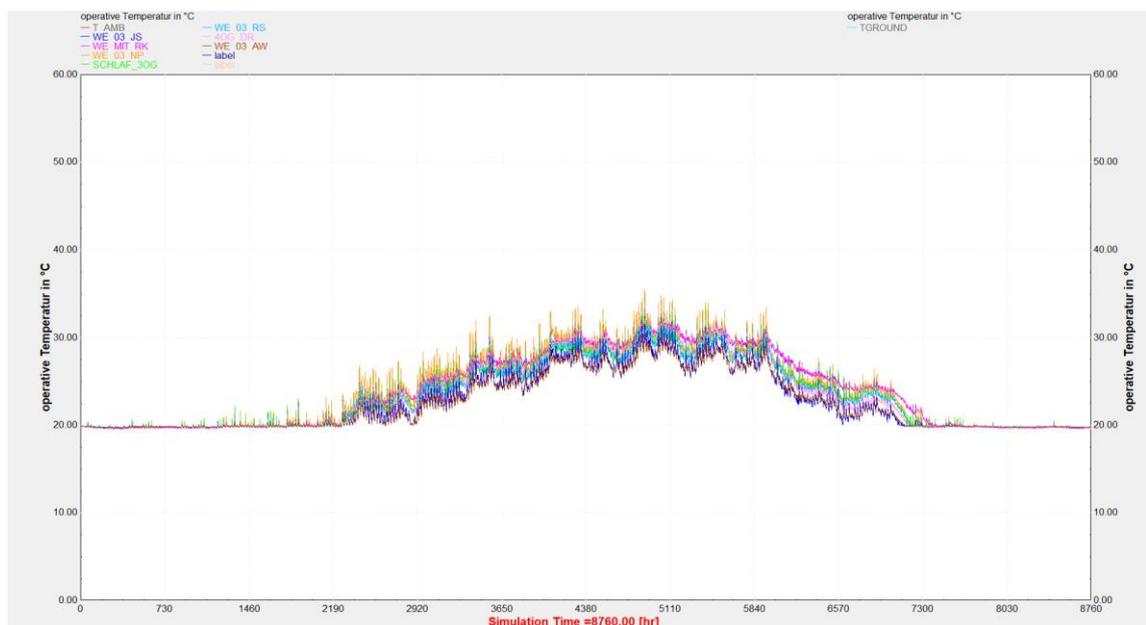


Abbildung 26. Temperaturverlauf im Wohnteil mit der sommerlichen Nachtlüftung

Aus der Abbildung 26 ist zu sehen, dass beim Vergleich mit der Abbildung 20 die sommerlichen Raumtemperaturen auf einem niedrigeren Niveau liegen. Für die genaue Betrachtung wurden die Übertemperaturgradstunden berechnet. Da die sommerliche

Nachtlüftung nur im Büro- und Wohnteil verwendet wird, werden die Übertemperaturgradstunden nur für diese Teile ausgewertet. Die berechnete Übertemperaturgradstunden sind in der Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19. Übertemperaturgradstunden mit der sommerlichen Nachtlüftung. Büro- und Wohnteil

Gebäudetyp	Zone	UTS	UTS>Grenzwert?	Differenz zur Basisvariante
Büro	BUERO_N	9176	ja	-51,4
	FOYER_LUFT	4065	ja	-63,5
	BUERO_M	15.024	ja	-46,8
	BUERO_S	21.788	ja	-38,8
	TELBOX	18.257	ja	-69,6
Wohnung	WE_03_AW	3106	ja	-66,6
	WE_03_JS	4083	ja	-62,2
	WE_MIT_RK	9797	ja	-50,3
	WE_03_NP	9633	ja	-51,1
	WE_SCHLAF	7382	ja	-51,9
	WE_03_RS	6740	ja	-55,1
	4OG_DR	7954	ja	-53,3

Aus der Tabelle 20 geht hervor, dass die Anzahl der Übertemperaturgradstunden im Büro- und Wohnteil mithilfe der sommerlichen Nachtlüftung insgesamt verringert wurde. Im Durchschnitt wurde die Anzahl der UTS um 55 % verringert, was als eine positive Einwirkung betrachtet werden kann. Die grafische Darstellung der Heizlast ist in der Abbildung 27 zu entnehmen.

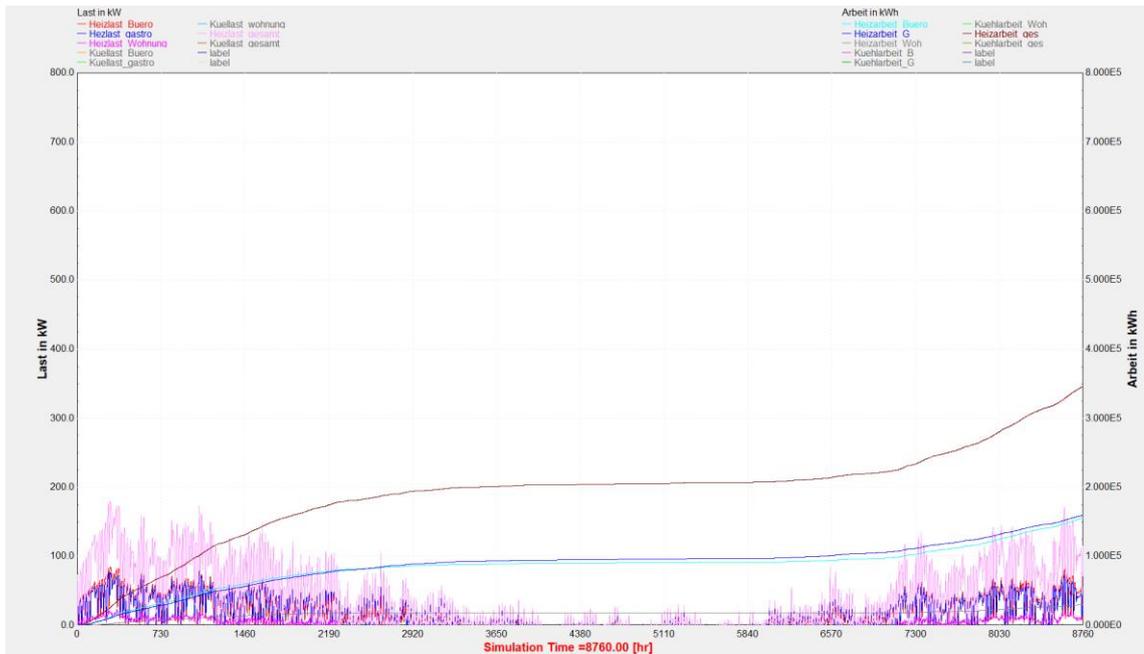


Abbildung 27. Heizlast und Heizarbeit mit der sommerlichen Nachtlüftung

Um Szenario 2 und Szenario 3 besser vergleichen zu können, wird in der Abbildung 27 die gleiche Skalierung wie in der Abbildung 23 gewählt. Beim Vergleich mit der Abbildung 23 hat sich der Heizbedarf mit der sommerlichen Nachtlüftung insgesamt reduziert. Die geringe Heizlast in den Sommermonaten, die in der Abbildung 27 deutlich wird, ist auf die hohe Luftwechselrate in den Besprechungsräumen zurückzuführen.

Die quantitativen Ergebnisse zur Heiz- und Kühllastberechnung sind in der Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20. Spitzenlasten und Arbeiten mit der sommerlichen Nachtlüftung

	Spitzenlast Heizung in kW	Spitzenlast Kühlung in kW	Jährliche Heizarbeit in kWh	Jährliche Kühlarbeit in kWh
Gastronomie	77,9	60,3	159.925	30.811
Büro	84,9	103,7	155.771	55.518
Wohnung	24,9	-	30.762	-
Gesamt	187,7	164,0	346.458	86.330

In der Abbildung 28 werden die Heiz- und Kühlarbeit sowie die Gesamtarbeit bei der untersuchten Lüftungsvarianten verglichen.

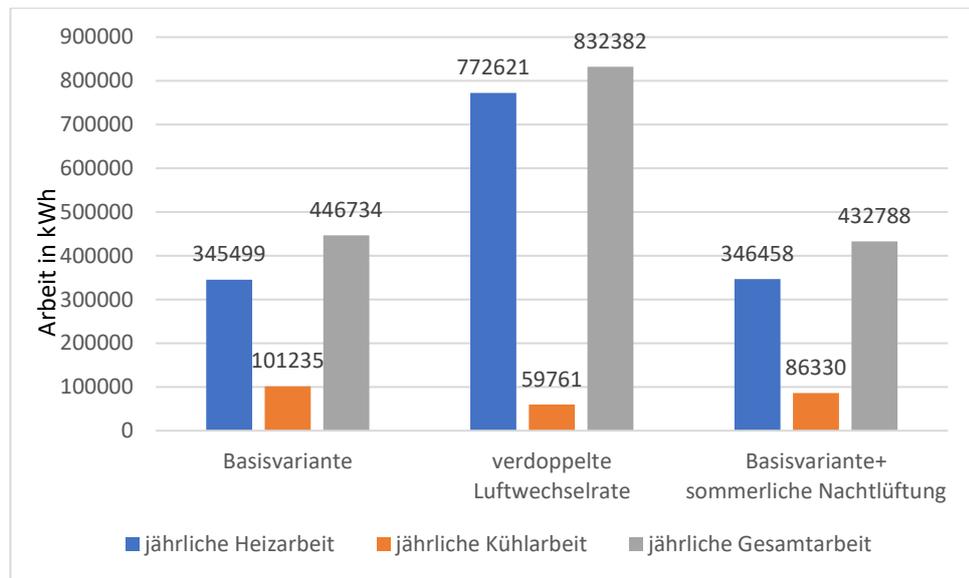


Abbildung 28. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten bei unterschiedlichen Lüftungsvarianten

Aus der Abbildung 28 wird ersichtlich, dass die Heizarbeit sich durch die sommerliche Nachtlüftung im Vergleich zur Basisvariante nur geringfügig ändert. Die Kühlarbeit ist jedoch um 14.905 kWh verringert. Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass das Szenario mit der sommerlichen Nachtlüftung zur Gebäudekühlung und somit zur Senkung der Übertemperaturgradstunden führt ohne die Steigerung des Energieaufwands, wie bei der einfach verdoppelten Lüftung passierte. Deswegen wird die sommerliche Nachtlüftung als eine gute Maßnahme für die Senkung der Raumtemperaturen im Sommer betrachtet.

4.4 g-Wert

Aus vorherigen Untersuchungen wird es deutlich, dass richtig angepasste Lüftung für das Aufrechterhalten des behaglichen Raumklimas nicht ausreichend ist. Der größte Teil der Solarenergie gelangt durch das Fenster in den Raum und dadurch erwärmt sich dieser. Wie im Abschnitt 3.1 beschrieben, hängt der Anteil der durchgelassenen Strahlung von dem g-Wert ab. Je höher der g-Wert eines Fensters ist, desto mehr Solarstrahlung wird in einen Raum durchgelassen. Das Fenster mit einem hohen g-Wert kann im Winter günstig sein, weil mehr Solarstrahlung den Raum erwärmen kann und somit der Heizbedarf reduziert wird. Da die vorherigen Simulationen gezeigt haben, dass das Gebäude im Sommer stark überhitzt, ist es sinnvoll durch einen niedrigeren g-Wert die eintretende solare Strahlung zu minimieren. Deswegen werden in der Simulation zwei Arten von Fenstern mit einem geringen g-Wert untersucht. Um die

Wärmeverluste zwischen innen und außen nicht zu verändert, werden in der Simulation die Fenster mit dem gleichen U-Wert eingestellt. In der Tabelle 21 sind die g-Werte der Fenster dargestellt.

Tabelle 21. Auflistung der g-Werte der Fenster

	g-Wert
Standardverglasung	0,55
3-fach-Verglasung	0,40
Sonnenschutzverglasung	0,20

Zuerst wurde an Hand der Simulationsergebnisse analysiert, ob die Veränderung des g-Wertes einen offensichtlichen Einfluss auf das Gebäude hat. Dafür wurde der Temperaturverlauf im Büroteil, in dem es einen großen Anteil der Verglasung gibt, mit dem g-Wert von 0,4 ermittelt und mit dem Verlauf aus der Basisvariante verglichen.

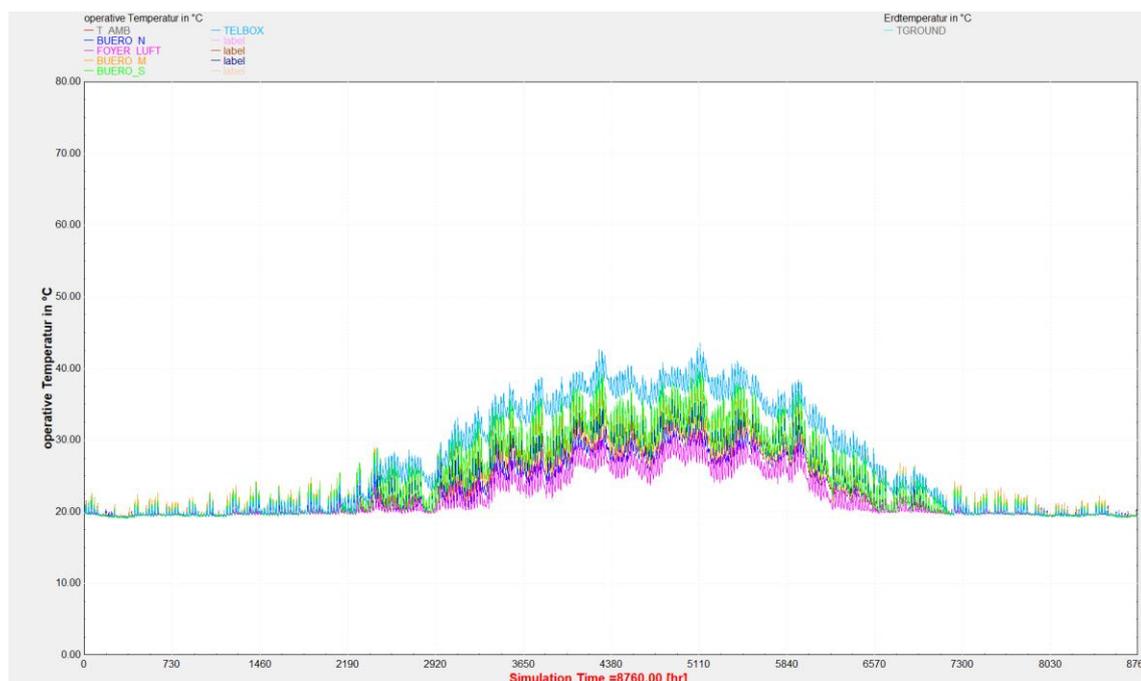


Abbildung 29. Temperaturverlauf im Büroteil. g-Wert = 0,4

Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zur Abbildung 20 die Raumtemperaturen in der Abbildung 29 in einem niedrigeren Bereich liegen. Die Reduzierung der durchgelassenen Solarstrahlung führt zur Temperatursenkung um 10° C. Mit der 3-fach Verglasung steigt die maximale Temperatur im Sommer auf 40° C, während mit der Standardverglasung ein Maximalwert von 50° C erreicht wird.

Daraus kann zusammengefasst werden, dass die Auswahl eines Fensters mit dem geringen g-Wert zur deutlichen Temperatursenkung im Gebäude führt und ein gutes Potenzial hat den Kühlbedarf des Gebäudes zu minimieren.

Es ist wichtig zu analysieren, ob der Heizbedarf auch durch die Veränderung des g-Wertes beeinflusst wird. Es wird weiterhin auch untersucht, wie sich die Übertemperaturgradstunden durch die Änderung des g-Wertes verändern. Dafür wurden für die 3-fach-Verglasung und Sonnenschutzverglasung die Übertemperaturgradstunden sowie der Heiz- und Kühlbedarf berechnet. Die berechneten Übertemperaturgradstunden mit unterschiedlichen g-Werte sind in der Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22. Übertemperaturgradstunden mit verschiedenen Fenster

Gebäude typ	Zone	3-fach-Verglasung			Sonnenschutzverglasung		
		UTS	Diff. zur Basis in %	UTS> Grenz wert?	UTS	Diff. zur Basis in %	UTS> Grenz wert?
Gastronomie	GASTRO_N	790	-65,6	ja	164	-92,9	nein
	GASTRO_M	640	-54,2	ja	237	-83,0	nein
	GASTRO_S	1472	-63,2	ja	364	-90,9	nein
	KUECHE_N	26.499	-49,8	ja	5453	-89,7	ja
	KUECHE_PERS	38.201	-43,4	ja	13.134	-80,6	ja
	KUECHE_S	1290	-83,1	ja	0	-100,0	nein
Büro	BUERO_N	8464	-55,1	ja	1707	-91,0	ja
	FOYER_LUFT	2727	-75,5	ja	24	-99,8	nein
	BUERO_M	13.321	-52,8	ja	3023	-89,3	ja
	BUERO_S	17.235	-51,6	ja	3828	-89,3	ja
	TELBOX	32.368	-46,0	ja	9667	-83,9	ja
BSP-Raum	BSP_EG	0	-100,0	nein	0	-100,0	nein
	BSP_1OG	145	-60,9	nein	49	-86,8	nein
	BSP_2OG1	270	-72,5	nein	58	-94,1	nein
	BSP_2OG2	89	-63,7	nein	24	-90,2	nein
	BSP_3OG	127	-78,3	nein	13	-97,8	nein
Wohnung	WE_03_AW	3359	-63,9	ja	114	-98,8	nein
	WE_03_JS	3957	-63,4	ja	230	-97,9	nein
	WE_MIT_RK	10.067	-49,0	ja	2646	-86,6	ja
	WE_03_NP	10.151	-48,4	ja	2878	-85,4	ja
	WE_SCHLAF	6824	-55,6	ja	945	-93,8	nein
	WE_03_RS	7470	-50,2	ja	1881	-87,5	ja
	4OG_DR	8015	-53,0	ja	1584	-90,7	ja

Aus der Tabelle 22 geht hervor, dass die Übertemperaturgradstunden bei niedrigen g-Werte insgesamt gesunken sind. Obwohl bei der 3-fach-Verglasung im Gegensatz zur

Basisvariante fast keine Zonen in grünen Bereich übergegangen sind, wurde die Anzahl der Übertemperaturgradstunden durchschnittlich um ca. 61 % verringert. Es ist aber zu sehen, dass bei der 3-fach-Verglasung alle Besprechungsräumen jetzt das Bewertungskriterium erfüllen. Bei der Sonnenschutzverglasung kann beobachtet werden, dass im Vergleich zur Basisvariante die drei Gastronomiezone, eine Küche, ein Büroraum und drei Wohnzonen in den grünen Bereich gesprungen sind und die durchschnittliche Senkung der Übertemperaturgradstunden ca. 91% beträgt. Hieraus wird ersichtlich, dass Fenster mit geringen g-Wert vor der Überhitzung des Gebäudes mit einem großen Fensterflächenanteil im Sommer schützen können.

Die quantitativen Daten zur Heiz- und Kühllastberechnung sind in der Tabelle 23 vorgelegt.

Tabelle 23. Spitzenlasten und Arbeiten mit verschiedenen Fenstertypen

Fenstertyp		Spitzenlast Heizung	Spitzenlast Kühlung	Heizarbeit	Kühlarbeit
3-fach-Verglasung	Gastronomie	78,6	49	170.540	18.666
	Büro	85,0	81,4	169.150	38.403
	Wohnung	25,0	-	33.960	-
	Gesamt	188,6	130,4	373.650	57.069
Sonnenschutzverglasung	Gastronomie	79,1	37,0	183.231	9282
	Büro	85,7	54,7	187.844	15.654
	Wohnung	25,2	-	38.452	-
	Gesamt	190,0	91,7	409.527	24.935

Um die Differenz zwischen verschiedenen Verglasungen besser darstellen zu können, werden die Heiz- und Kühlarbeiten in der Abbildung 30 zusammengefasst und miteinander verglichen.

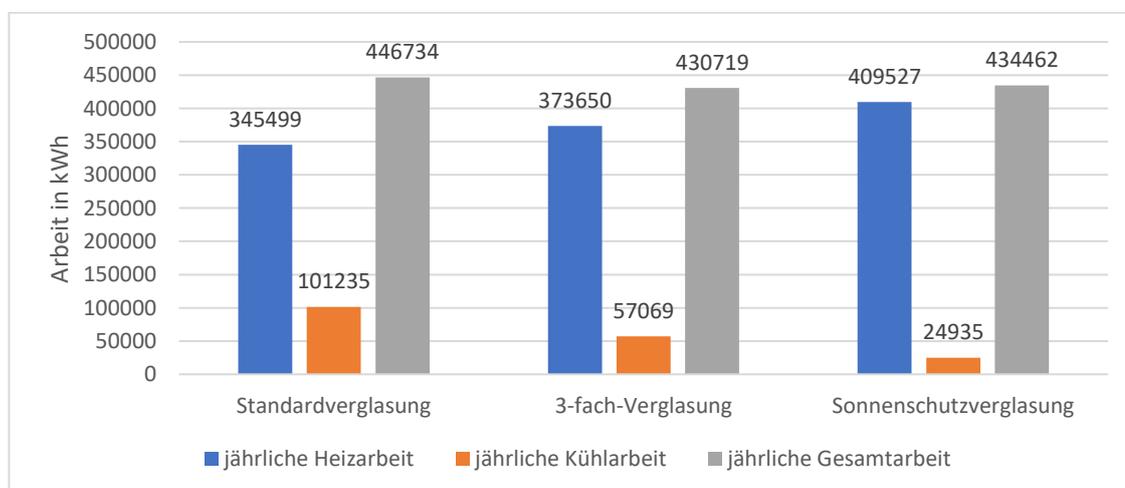


Abbildung 30. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten bei verschiedenen Fenstertypen

Die Abbildung 30 zeigt, dass bei den Fenstern mit niedrigen g-Werte auch der Kühlbedarf reduziert werden kann. An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass bei der 3-fach-Verglasung und Sonnenschutzverglasung die Kühlarbeit um ca. 44 % und 75% gesunken wurde. Andersherum hat die Heizarbeit sich bei den gleichen Fenstertypen nur um 8 % und 18 % entsprechend erhöht, was im Vergleich zum Szenario 2 (Abschnitt 4.3.2) als nicht expliziter Anstieg betrachtet werden kann. Aus der Abbildung 30 wird auch deutlich, dass die jährliche Gesamtarbeit bei der Verglasung mit den niedrigen g-Werten um ca. 3,6 % bei der 3-fach-Verglasung und um 2,7 % bei der Sonnenschutzverglasung reduziert wird. In der Abbildung 30 wird deutlich, dass die Gesamtarbeit bei der 3-fach-Verglasung etwas weniger als bei der Sonnenschutzverglasung ist. Es muss aber drauf geachtet werden, dass in der Regel das Kühlen wesentlich aufwendiger als Heizen ist, deswegen hat die Minimierung der Kühllast eine höhere Priorität als Heizlast.

Bei der Auswahl des g-Wertes gilt es jedoch auch zu beachten, dass je niedriger der g-Wert ist, desto geringer ist auch der Anteil des Tageslichts, der in einen Raum gelangt, was zur Minderung des Komforts führt. Der Anteil der sichtbaren Strahlung, die durch eine Verglasung durchgelassen werden kann, wird durch den Lichttransmissionsgrad beziffert [28]. Um den Zusammenhang zwischen g-Wert und Lichttransmissionsgrad anzugeben, wird ein Verhältnis von Lichttransmissionsgrad zum g-Wert dieser Verglasung eingegeben. Zum Beispiel ergibt sich dieses Verhältnis bei der Wärmeschutzverglasung, zu der die Standardverglasung und 3-fach-Verglasung gehören, 1,3:1. Das heißt, dass die Standard- und 3-fach-Verglasung ein Lichttransmissionsgrad von 0,72 (72%) und 0,52 (52%) haben. Bei der Sonnenschutzverglasung ist das Verhältnis 2:1. Dementsprechend beträgt der Lichttransmissionsgrad 0,4 oder 40% [28].

Da die Sonnenschutzverglasung eine niedrige Lichtdurchlässigkeit hat, sind diese Fenster für das Gebäude nicht geeignet, damit die Energiekosten für den künstlichen Licht nicht erhöht werden.

4.5 Außenliegende Verschattung

In dieser Variante wird ermittelt, welchen Einfluss die außenliegende Verschattung auf das Gebäude hat. Dafür wurde den Gebäudeeinstellungen aus der Basisvariante die Verschattung der Fenster um 25 % und 50 % hinzugefügt, um zu prüfen, ob diese Maßnahme zur Senkung der Raumtemperaturen und damit zur Senkung der Übertemperaturgradstunden sinnvoll ist.

Die außenliegende Verschattung wird in der Simulation bei einer bestimmten Bestrahlungsstärke an- und ausgeschaltet. In der Simulation wird der konstante Verschattungsanteil eingestellt und es wird davon ausgegangen, dass die Verschattung bei einer Bestrahlungsstärke von 120 W/m^2 an und von 90 W/m^2 ausgeschaltet ist.

Die für 25 und 50 %ige Verschattung berechneten Übertemperaturgradstunden sind in der Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24. Übertemperaturgradstunden mit Verschattung

Gebäudetyp	Zone	25 %iger Verschattung			50 %iger Verschattung		
		UTS	Diff. zur Basis in %	UTS > Grenzwert?	UTS	Diff. zur Basis in %	UTS > Grenzwert?
Gastronomie	GASTRO_N	1148	-50,0	ja	473	-79,4	nein
	GASTRO_M	833	-40,3	ja	441	-68,4	nein
	GASTRO_S	2037	-49,0	ja	837	-79,0	ja
	KUECHE_N	33.187	-37,1	ja	15.692	-70,3	ja
	KUECHE_PERS	45.899	-32,0	ja	25.861	-61,7	ja
	KUECHE_S	2643	-65,4	ja	153	-98,0	nein
Büro	BUERO_N	11.736	-37,8	ja	5696	-69,8	ja
	FOYER_LUFT	6316	-43,3	ja	2557	-77,0	ja
	BUERO_M	20.373	-27,9	ja	13.195	-53,3	ja
	BUERO_S	22.824	-35,9	ja	11.556	-67,6	ja
	TELBOX	40.014	-33,3	ja	21.919	-63,4	ja
BSP-Raum	BSP_EG	2	-80,0	nein	0	-100,0	nein
	BSP_1OG	198	-46,6	nein	100	-73,0	nein
	BSP_2OG1	415	-57,7	nein	145	-85,2	nein
	BSP_2OG2	129	-47,3	nein	61	-75,1	nein
	BSP_3OG	221	-62,2	nein	58	-90,1	nein
Wohnung	WE_03_AW	5078	-45,5	ja	1665	-82,1	ja
	WE_03_JS	5942	-45,0	ja	2091	-80,6	ja
	WE_MIT_RK	12.906	-34,6	ja	6789	-65,6	ja
	WE_03_NP	12.897	-34,5	ja	6868	-65,1	ja
	WE_SCHLAF	9195	-40,1	ja	4203	-72,6	ja
	WE_03_RS	9600	-36,1	ja	4969	-66,9	ja
	4OG_DR	10.965	-35,6	ja	5696	-66,6	ja

In der Tabelle 24 wird ersichtlich, dass die zugefügte Verschattung insgesamt einen großen Einfluss auf die Anzahl der Übertemperaturgradstunden hat und grundsätzlich

vor äußeren Wärmeeinträgen schützt. Die Anzahl der UTS wurde bei der 25 % und 50 %iger Verschattung durchschnittlich um 44 % und 74 % verringert.

Tabelle 25. Spitzenlasten und Arbeiten mit Verschattung

Verschattung		Spitzenlast Heizung	Spitzenlast Kühlung	Heizarbeit	Kühlarbeit
25 %	Gastronomie	78,2	52,0	166.084	21.929
	Büro	84,8	85,4	161.460	51.222
	Wohnung	25,1	-	32.242	-
	Gesamt	188,1	137,4	359.296	73.152
50 %	Gastronomie	78,3	41,6	173.177	14.082
	Büro	85,0	76,6	169.095	34.064
	Wohnung	25,1	-	34.346	-
	Gesamt	188,4	118,2	376.618	48.146

Die quantitativen Ergebnisse der Heiz- und Kühllastberechnung mit der zugefügten Verschattung sind in der Tabelle 25 abgebildet. Die Heiz- und Kühlarbeiten werden in der Abbildung 31 mit der Bestandsvariante verglichen.

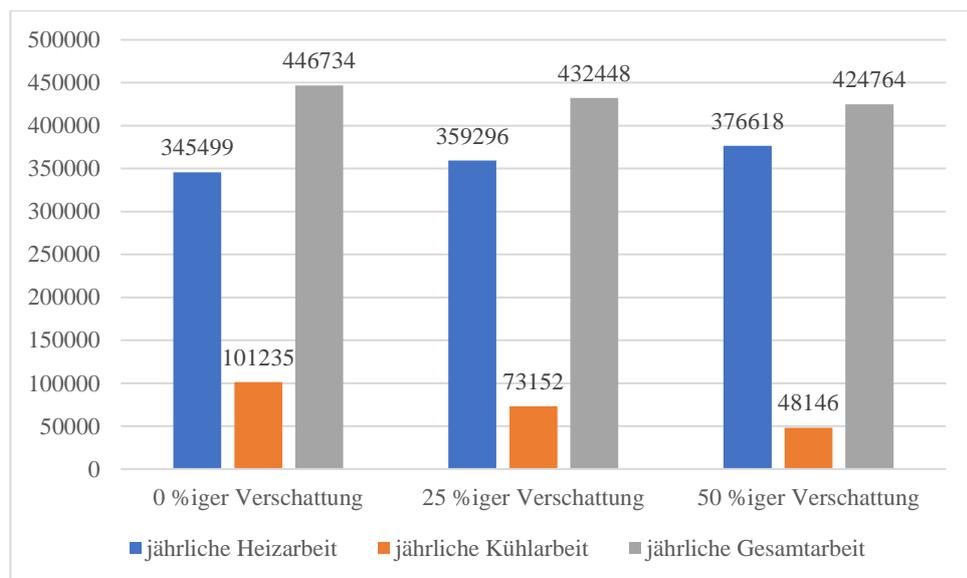


Abbildung 31. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten mit zugefügter Verschattung

In der Abbildung 31 ist zu sehen, dass bei dem hohen Verschattungsanteil die Heizarbeit geringfügig ansteigt. Gleichzeitig wurde bei der 25 % und 50 %iger Verschattung die Kühlarbeit um ca. 28 % und 52 % gesenkt. Zusammenfassend wird deutlich, dass je höher der Verschattungsanteil ist, desto größer ist auch der Einfluss der Verschattung auf das Raumklima. In der Praxis bedeutet das aber, dass über die Fenster mit Verschattung neben der Wärme auch weniger Sonnenlicht in den Raum durchgelassen werden kann, was den Komfort minimiert. Daraus kann zusammengefasst werden, dass für das in der Arbeit beschriebenen Gebäude die 25

%iger Verschattung empfehlenswert ist und zusammen mit anderen Maßnahmen zum Aufrechterhalten des behaglichen Raumklimas führen kann.

4.6 Heizung mit Nachtabsenkung

In vorherigen Varianten wurde davon ausgegangen, dass das Gebäude während des ganzen Tages immer auf 20° C beheizt wird. In dieser Variante wird die Heizung in Büro- und Gastronomieteil so eingestellt, dass nur während der Arbeits- und Öffnungszeiten die Raumtemperatur auf 20° C aufrechterhalten wird. Außerhalb dieser Zeiten wird das Gebäude nur auf 17° C beheizt. Auf solcher Weise kann der Energiebedarf für die Heizung verringert werden.



Abbildung 32. Temperaturverlauf im Büroteil innerhalb eines Tages

Die Abbildung 32 zeigt der Temperaturverlauf im Büroteil innerhalb eines Tages. Es ist zu sehen, dass von 00:00 bis 07:00, wenn das Büro leer ist, die Raumtemperatur auf 17° C aufrechterhalten wird. Um 07:00, wenn die erste Person ins Büro kommt, hat die Temperatur 20° C erreicht. In der Simulation wird von der unbegrenzten Leistung der Heizungsanlage ausgegangen, deswegen steigt die Raumtemperatur unmittelbar bei Beginn der Nutzung auf 20° C. Nach 20:00 wird die Temperatur wieder auf 17° C abgesenkt.

Das Hauptziel dieser Variante war es, den Heizbedarf zu verringern, deswegen wird die Heizlast mit der angepassten Heizung berechnet und mit der Bestandsvariante verglichen.

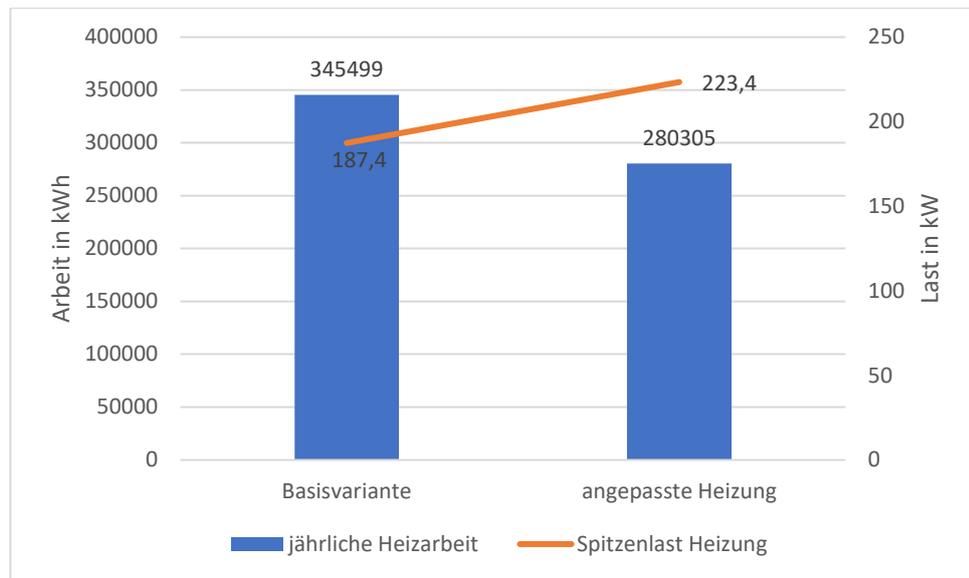


Abbildung 33. Gegenüberstellung der Heizarbeit und Spitzenlast bei verschiedenen Heizungsvarianten

Die Abbildung 33 zeigt, dass bei der angepassten Heizung die Spitzenlast mit 223,4 kW etwa 20 % größer als bei der Basisvariante ist. Gleichzeitig hat sich bei der angepassten Heizung die Heizarbeit um ca. 19 % reduziert. Das kann als ein positives Ergebnis betrachtet werden, weil mit der Heizarbeitssenkung auch die Heizkosten gesunken und weniger CO₂ – Emissionen ausgestoßen werden.

4.7 Kombinationsvariante

In den vorherigen Varianten wurde untersucht, welchen Einfluss einzelne Maßnahmen auf die Behaglichkeit im Gebäude haben. Es wird deutlich, dass es unmöglich ist, nur mit einer Maßnahme z.B. durch Lüftung das behaglichen Raumklima effizient aufrechtzuerhalten. Deswegen wird in der letzten Variante die Kombination aus unterschiedlichen Varianten, die in vorherigen Untersuchungen als am sinnvollsten erachtet wurden, untersucht.

In der Kombinationsvariante werden der Büro- und Wohnteil zusätzlich nachts gelüftet, weil diese Maßnahme, wie im Abschnitt 4.3 beschrieben, das beste Verhältnis zwischen der Minimierung der Raumtemperaturen und dem Energieaufwand hat. Für die Fenster wird die 3-fach-Verglasung gewählt. Obwohl mit der Sonnenschutzverglasung die Raumtemperaturen deutlich gesenkt wird, tritt der Wohnkomfort bei der Simulation nicht in den Hintergrund. Wie im Abschnitt 4.4 beschrieben gelangt durch die Sonnenschutzverglasung weniger Helligkeit in den Raum. Daher wurde die 3-fach-Verglasung gewählt. Zusätzlich werden das Gebäude mit der 25 % iger Verschattung vor

äußeren Wärmeeinträgen geschützt. Im Büro- und Gastronomieteil wird die Heizung mit Nachtabsenkung eingestellt. Der Wohnteil wird auf 20° C beheizt. Außerdem wird die aktive Kühlung im Gebäude ab 26° C eingeschaltet.

In der Tabelle 26 sind die Gebäudeeinstellungen für die Kombinationsvariante dargestellt.

Tabelle 26. Gebäudeeinstellungen für die Kombinationsvariante

Gebäudetyp	Lüftung	Fenster	Verschattung	Heizung	Kühlung
Gastronomie	Bestandslüftung	3-fach- Verglasung g-Wert = 0,4	25 %	tagsüber auf 20° C nachts auf 17° C	ab 26° C
Büro	Bestandslüftung +sommerliche Nachtlüftung (Luftwechselrate = 0,4)	3-fach- Verglasung g-Wert = 0,4	25 %	tagsüber auf 20° C nachts auf 17° C	ab 26° C
Wohnung	Bestandslüftung +sommerliche Nachtlüftung (Luftwechselrate = 0,4)	3-fach- Verglasung g-Wert = 0,4	25 %	20° C	ohne

In der Tabelle 26 wird ersichtlich, wie das Gebäude in der Kombinationsvariante eingestellt wird. Die vorherigen Ergebnisse zeigen, dass in Besprechungsräumen wegen der hohen Luftwechselrate keine aktive Kühlung erforderlich ist. Deswegen wurde in diesen Zonen auf die Kühlung verzichtet.

Die Ergebnisse dieser Variante zeigen, dass bei zwei Wohnzonen („WE_03_NP“ und „WE_MIT_RK“) die Anzahl der Übertemperaturgradstunden den Grenzwert überschreitet. Deswegen wurde die Luftwechselrate für die sommerliche Nachtlüftung in Wohnungen von 0,4 auf 0,8 erhöht. Besonders im Wohnbereich ist die sommerliche Nachtlüftung durch das Öffnen der Fenster durch die Nutzer mit geringem Aufwand realisierbar.

Die Anzahl der Übertemperaturgradstunden ist in der Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27. Übertemperaturgradstunden für die Kombinationsvariante

Gebäudetyp	Zone	UTS	UTS>Grenzwert?	Differenz zur Basisvariante in %
Gastronomie	GASTRO_N	286	nein	-87,5
	GASTRO_M	271	nein	-80,6
	GASTRO_S	631	ja	-84,2
	KUECHE_N	14.448	ja	-72,6
	KUECHE_PERS	24.193	ja	-64,2
	KUECHE_S	65	nein	-99,1
Büro	BUERO_N	1513	ja	-92,0
	FOYER_LUFT	129	nein	-98,8
	BUERO_M	3809	ja	-86,5
	BUERO_S	4861	ja	-86,4
	TELBOX	2343	ja	-96,1
Besprechungsräumen	BSP_EG	0	nein	-100,0
	BSP_1OG	43	nein	-88,4
	BSP_2OG1	83	nein	-91,5
	BSP_2OG2	27	nein	-89,0
	BSP_3OG	20	nein	-96,6
Wohngebäude	WE_03_AW	4	nein	-99,9
	WE_03_JS	45	nein	-99,6
	WE_MIT_RK	370	nein	-98,1
	WE_03_NP	681	nein	-96,5
	WE_SCHLAF	168	nein	-98,9
	WE_03_RS	306	nein	-98,0
	4OG_DR	247	nein	-98,6

Aus der Tabelle 27 wird ersichtlich, dass insgesamt mit Hilfe der kombinierten Maßnahmen die Anzahl der Übertemperaturgradstunden um ca. 90 % gesunken wurde. Die Zonen, in denen die Anzahl der UTS immer noch auf dem hohen Niveau liegt, werden mit einer aktiven Kühlung auf die erforderliche Temperatur gekühlt werden.

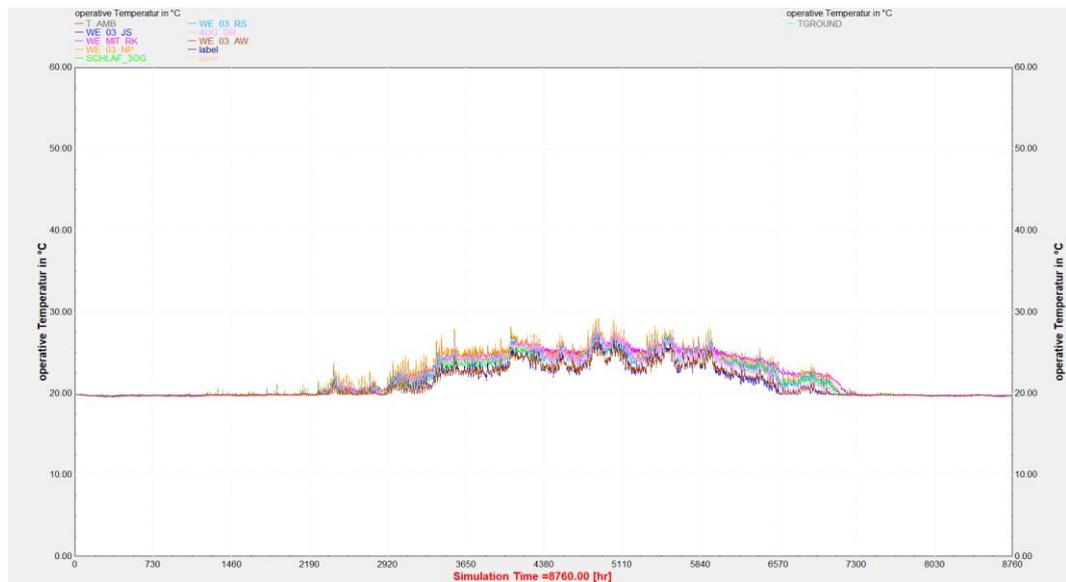


Abbildung 34. Temperaturverlauf im Wohnteil für die Kombinationsvariante

Auf der Abbildung 34 wird dargestellt, wie der Temperaturverlauf mit der Kombination unterschiedlicher Maßnahmen aussieht. Es wird ersichtlich, dass die Raumtemperaturen in den Wohnungen insgesamt in einem behaglichen Bereich liegen. Im Sommer erreicht die Temperatur den Maximalwert von 29° C. Trotzdem entspricht die Anzahl der Übertemperaturgradstunden dem Bewertungskriterium des behaglichen Raumklimas, was die Tabelle 27 zeigt. Somit ist mit den gewählten Maßnahmen eine Auskühlung des Gebäudes sichergestellt.

Ein weiteres Ziel der Simulation war es, den Einsatz von Primärenergie zur Gebäudeheizung- und Kühlung auf ein Minimum zu senken. Dafür wurden für die letzte Variante auch der Heiz- und Kühlbedarf berechnet. Die quantitativen Ergebnisse der Berechnung sind in der Tabelle 28 abgebildet. Die jährlichen Arbeiten werden in der Abbildung 36 verglichen.

Tabelle 28. Spitzenlasten und Arbeiten für die Kombinationsvariante

	Spitzenlast Heizung in kW	Spitzenlast Kühlung in kW	Jährliche Heizarbeit in kWh	Jährliche Kühlarbeit in kWh
Gastronomie	92,4	40,0	138.643	11.798
Büro	106,3	57,2	139.140	19.195
Wohnung	25,2	-	36.304	-
Gesamt	223,9	97,2	314.088	30.993

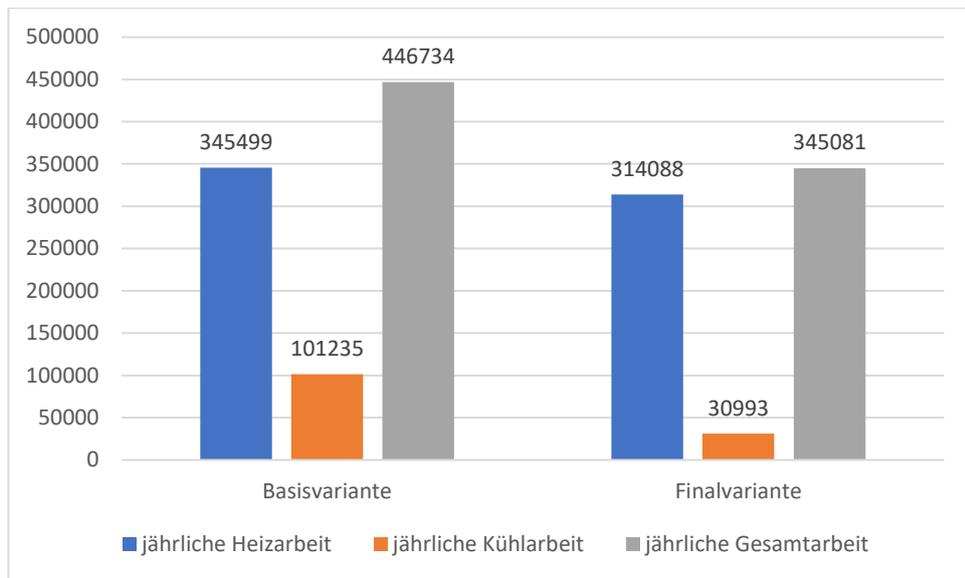


Abbildung 35. Gegenüberstellung der jährlichen Arbeiten bei der Basis- und Kombinationsvariante

Aus der Abbildung 35 wird deutlich, dass im Vergleich zur Basisvariante die Heizarbeit um 9 % und die Kühlarbeit um ca. 69 % entsprechend gesenkt ist. Die deutliche Senkung der Kühlarbeit liegt daran, dass der große Anteil der inneren und äußeren Wärmeeinträge durch die anderen Maßnahmen abgeführt wird. Aus den Berechnungen der Simulation lässt sich die Heiz- und Kühlarbeit für die Kombinationsvariante von 314.088 kWh und 30.993 kWh ermitteln.

Fazit

Mithilfe der thermischen Simulation wurde untersucht, welchen Einfluss die unterschiedlichen Maßnahmen zur Gebäudeoptimierung auf das thermische Gebäudeverhalten haben. In der ursprünglichen Variante (Basisvariante) haben die Raumtemperaturen extrem hohen Werte erreicht, was zur Unbehaglichkeit im Gebäude führte. Deswegen wurden verschiedene Maßnahmen, wie zum Beispiel der Einsatz von Sonnenschutzverglasung, nicht nur auf die Möglichkeit zur Minimierung des Primärenergieeinsatzes sondern auch auf die Wärmeschutzfähigkeiten geprüft. In der Weiterentwicklung wurden die einzelnen Varianten miteinander kombiniert, um das Gebäude hinsichtlich Behaglichkeit und Primärenergieeinsatz zu optimieren.

Durch die Einbindung von sommerlicher Nachtlüftung, Veränderung der Fenstertypen von Standardverglasung zu 3-fach-Verglasung und einer außenliegenden Verschattung von 25 % konnten in den Wohnbereichen die behaglichen Raumtemperaturen ohne aktive Kühlung erreicht werden. Im Gastronomie- und Büroteil wurden die Raumtemperaturen deutlich verringert. Durch diese Maßnahmen und die Heizung mit Nachtabsenkung konnte der Einsatz von Primärenergie für Gebäudeheizung und Gebäudekühlung gesenkt werden. Die Simulationsergebnisse dienen nun als Grundlage für die Auslegung der Heiz- und Kühltechnik.

Aus dieser Arbeit kann zusammengefasst werden, dass die TRNSYS-Simulation ein geeignetes Werkzeug zur Ermittlung des energetischen Bedarfs des Gebäudes ist. Da die Möglichkeit in der Parametrierung groß ist, kann die Simulation bei jeder Änderung der Bedingungen angepasst werden.

Die Gebäudesimulation mit TRNSYS hat gezeigt, dass bereits bei der Planung die Nutzung des Gebäudes mit berücksichtigt werden muss um ein behagliches Raumklima zu gewährleisten. Durch eine sinnvolle Gestaltung des Gebäudes kann somit der Einsatz von Primärenergie minimiert werden und damit CO₂ Emissionen eingespart werden.

Literaturverzeichnis

1. F. Imbery et al. *Klimatologischer Rückblick auf 2020: Eines der wärmsten Jahre in Deutschland und Ende des bisher wärmsten Jahrzehnts*, Offenbach: Deutscher Wetterdienst, 2021.
2. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Klimaschutz*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Industrie/klimaschutz.html>. Zugriff am: 05.01.2021.
3. Helmut Melzer, *Die nachhaltigen Gebäude-Konzepte*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.nachhaltiges-bauen.jetzt/die-nachhaltigen-gebaeude-konzepte/>. Zugriff am: 05.01.2021.
4. Ecofys Germany GmbH, *Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung*, Köln: Umweltbundesamt, 2011.
5. Umweltbundesamt, *Kühl durch den Sommer – auch ohne Klimaanlage*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/kuehl-durch-den-sommer-auch-ohne-klimaanlage>. Zugriff am: 06.01.2021.
6. Deutscher Wetterdienst, *Wetterlexikon*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102936&lv3=103132>. Zugriff am: 06.11.2020
7. G. Roland, *Was versteht man unter dem Begriff „Raumklima“*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/bauphysik/was-versteht-man-unter-dem-begriff-innenraumklima/>. Zugriff am: 06.11.2020
8. H. Recknagel, E. Sprenger und E.-R. Schramek, *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, 69. Aufl. München, Wien: Oldenbourg, 1999.
9. M. Schmidt, *Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude. Grundlagen, Lösungseinsätze, Beispiele*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
10. Суворов Г.А., *Микроклимат промышленных и гражданских зданий. Эколого-гигиенические аспекты. Нормативные требования*. - М., ЗАО Редакция журнала «Охрана труда и социальное страхование», 1999.
Suworow G.A. *Raumklima von industriellen und zivilen Gebäuden. Ökologisch-hygienische Aspekte. Regulatorische Anforderungen*, Moskau: Arbeitsschutz und Sozialversicherung, 1999.

11. D. Bohne, *Technischer Ausbau von Gebäuden - und nachhaltige Gebäudetechnik*. 11. Auflage Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
12. N. Nadler, *Zur Personenwärme bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.cse-nadler.de/Personenwaerme.pdf>. Zugriff am: 08.11.2020.
13. DIN EN ISO 7730 - *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, 2006
14. P.-I. E. Sprecht, *Der Mensch als wärmetechnisches System*, Otto-von-Guerike Universität Magdeburg: Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik, 2005.
15. W. Richter, *Handbuch der thermischen Behaglichkeit*. [Online] Verfügbar unter: https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2071.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am: 08.11.2020
16. D. Markov, *Predicted Percentage dissatisfied (PPD) as a function of Predicted Mean Vote (PMV)*. [Online] Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/figure/Predicted-percentage-dissatisfied-PPD-as-a-function-of-predicted-mean-vote-PMV_fig1_305755583. Zugriff am: 11.11.2020
17. DIN 4108-2: 2013-02 – *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, 2013.
18. DIN EN 12831, *Verfahren zur Berechnung der Normheizlast*, 2003.
19. VDI 2078, *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen*, 2015.
20. The Board of Regents of the University of Wisconsin System, 2017. *TRaNsient SYstems Simulation Program*. [Online] Verfügbar unter: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>. Zugriff am: 14.11.2020
21. Deutscher Wetterdienst, *Testreferenzjahre*, [Online] Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>. Zugriff am: 16.12.2020.
22. FRANK ECOzwei GmbH, *DIN 18599 Berechnungsunterlagen für EnEV Bauantrag*, 2020.
23. Energieeinsparverordnung, *EnEV 2014*, 2014.
24. Stromverbrauchinfo, *Tipps und Informationen zum Stromverbrauch*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.stromverbrauchinfo.de/>. Zugriff am: 18.11.2020.

25. Statista, *Jährlicher Stromverbrauch eines 1 und 2-Personen Haushalts in Deutschland im Jahr 2019*. [Online] Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/558239/umfrage/stromverbrauch-einen-1-personen-haushalts-in-deutschland/>. Zugriff am: 04.12.2020.
26. R. Gloor, *Energieeffizienz in der Gastronomie*. [Online] Verfügbar unter: <https://energie.ch/gastro/>. Zugriff am: 16.12.2020.
27. C. Schinkel, *Wie viel Frischluft braucht der Mensch*. [Online] Verfügbar unter: http://www.bosy-online.de/Lueftungsnormen/Wieviel_Frischluft.pdf. Zugriff am: 17.12.2020.
28. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, *Sonnenschutz im Büro Hilfen für die Auswahl von geeigneten Blend- und Wärmeschutzvorrichtungen an Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.arbeitssicherheit.de/schriften/dokument/0%3A5004999%2C5.html>. Zugriff am: 26.12.2020