

Einfluss des Klimawandels auf die sommerliche Überhitzung bei Wohngebäuden anhand eines Referenzgebäudes bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science in Engineering

Fachhochschule Vorarlberg
Nachhaltige Energiesysteme

Betreut von
Dr. Ing. Tobias Hatt

Vorgelegt von
Lucian Armin Mikio Kellner, BA

Dornbirn, 01.08.2023

Kurzreferat

Der Klimawandel und der damit einhergehende Temperaturanstieg stellen den Gebäudesektor in Bezug auf die sommerliche Überhitzung vor erhebliche Herausforderungen. Zur Abschätzung der Auswirkungen ist es relevant, Klimadaten für einen angemessenen Zeitraum zu verwenden, um geeignete Maßnahmen zur Hitzeminderung ergreifen zu können. Die sommerliche Überhitzung variiert je nach Gebäudetyp, Standort und örtlichen Gegebenheiten. Aus diesem Grund werden in dieser wissenschaftlichen Untersuchung Wohngebäude mit mehr als zehn Wohneinheiten für das Klimaszenario *RCP4.5* im Jahr 2060 in Österreich analysiert. Zur Beurteilung des Wohnkomforts wurden umfangreiche Messungen im Rahmen einer Studie des Energieinstituts Vorarlberg an einem repräsentativen Gebäude über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Basierend auf den gewonnenen Messwerten wird ein Referenzgebäude im Gebäudesimulationsprogramm *IDA ICE* konstruiert und simuliert. Um verschiedene Klimazonen angemessen abzubilden, werden die Standorte Bregenz, Klagenfurt und Wien für das Gebäude im Jahr 2022 betrachtet. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage, um den Einfluss des Klimawandels auf die sommerliche Überhitzung abschätzen zu können.

Im nächsten Schritt werden die neuen Klimadatensätze für das Klimaszenario *RCP4.5* im Jahr 2060 für dieselben Standorte implementiert und mit den Ergebnissen von 2022 verglichen. Dadurch können verschiedene Kennziffern wie maximale Temperaturen, Stundenanzahl mit Temperaturen über 25 °C bzw. 27 °C und die Häufigkeit von Übertemperaturgradstunden herangezogen werden, um die zukünftige Hitzebelastung zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer Erhöhung der maximalen Temperatur, der mittleren Temperatur zwischen Mai und September sowie der Stundenanzahl mit Temperaturen über 25 °C bzw. 27 °C zu rechnen ist. Der Grenzwert von 25 °C wird dabei um 12 bis 29 Prozent überschritten. Die Maximaltemperatur steigt um vier bis neun Prozent, während sich der Wert für die mittlere Temperatur um zwei bis drei Prozent erhöht. Besonders stark nimmt die Häufigkeit von Übertemperaturen über einen längeren Zeitraum zu.

Für die Umsetzung passiver Maßnahmen zeigt sich, dass diese zu einer signifikanten Reduktion der Stundenanzahl mit Temperaturen über den Grenzwerten führen können. Auch durch simple Maßnahmen, wie die Integration einer Nachtlüftung, kann eine Absenkung der Temperaturen und folglich der Stundenanzahl über den Grenzwerten erreicht werden. Ein thermischer Komfort basierend ausschließlich auf passiven Maßnahmen kann nicht für sämtliche Standorte in der Zukunft gewährleistet werden.

Schlagwörter: Klimawandel, Mikroklima, sommerliche Überhitzung, passive Sonnenschutzmaßnahmen, IDA ICE und thermische Gebäudesimulation

Abstract

Climate change and the resulting temperature increase pose significant challenges to the building sector regarding summer overheating. To estimate the impacts, it is crucial to use climate data for an appropriate period to implement suitable measures for heat mitigation. Summer overheating varies depending on the building type, location, and local conditions. Therefore, this scientific study analyzes residential buildings with more than ten units for the RCP4.5 climate scenario in Austria in the year 2060. Extensive measurements were conducted over an extended period at a representative building as part of a study by the Vorarlberg Energy Institute to assess residential comfort. Based on the collected data, a reference building is constructed and simulated using the building simulation program *IDA ICE*. To adequately represent different climate zones, the locations Bregenz, Klagenfurt, and Vienna for the year 2022 are considered for the building. These results serve as the basis for estimating the influence of climate change on summer overheating.

In the next step, the new climate datasets for the *RCP4.5* climate scenario in the year 2060 are implemented for the same locations and compared to the results from 2022. Various indicators, such as maximum temperatures, the number of hours with temperatures above 25 °C or 27 °C, and the frequency of overheating events, are used to evaluate future heat stress.

The findings indicate that an increase in maximum temperatures, mean temperatures between May and September, and the number of hours with temperatures above 25 °C or 27 °C can be expected. The threshold of 25 °C is exceeded by 12 to 29 percent. The maximum temperature rises by four to nine percent, while the mean temperature increases by two to three percent. The frequency of overheating events over an extended period also significantly increases.

For implementing passive measures, it is evident that they can lead to a significant reduction in the number of hours with temperatures above the threshold values. Even simple measures like incorporating nighttime ventilation can lower temperatures and, consequently, the number of hours exceeding the thresholds. However, relying solely on passive measures for thermal comfort may not be feasible for all locations in the future.

Keywords: Climate change, microclimate, summer overheating, passive solar protection measures, *IDA ICE*, and thermal building simulation.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation der Arbeit	2
1.2 Problemstellung der Arbeit	3
1.3 Fragestellung der Arbeit	4
1.4 Ziel der Arbeit	4
1.5 Stand der Wissenschaft	5
2 Methodik	9
2.1 Referenzgebäude	9
2.2 Modellierung des Gebäudes	11
2.3 Auswertung der Realtemperaturdaten und Vergleich der Simulationsergebnisse	11
2.4 Untersuchung der Diskrepanz im Vergleich mit den Zukunftsdaten	12
2.5 Betrachtung des Referenzgebäudes an anderen Standorten	13
2.5.1 Ausgewählten Standortklimaregionen	13
2.5.2 Klimaentwicklung Vorarlberg	14
2.5.3 Klimaentwicklung Kärnten	15
2.5.4 Klimaentwicklung Wien	16
2.6 Passive Maßnahmen zur Vermeidung von sommerlicher Überhitzung	17
3 Grundlagen	18
3.1 Begriff Klimawandel	18
3.1.1 Treibhausgas-Konzentration	20
3.2 Mikroklima	22
3.3 Außentemperatur	24
3.4 Klimaszenarien	29
3.4.1 SSP-Szenarien	31
3.4.2 RCP-Szenarien	32

3.5	Einflussgrößen für die Überhitzung von Gebäuden	37
3.5.1	Gebäudehülle	40
3.5.2	Nutzerverhalten	41
3.5.3	Transparente Bauteile	41
3.5.4	Sonnenschutzvorrichtung	42
3.5.5	Passive Kühlung	44
4	Durchführung der Methodik	46
4.1	Ausgangssituation der Realtemperaturdaten	46
4.2	Auswertung der Klimadatenätze	47
4.2.1	Analyse Messaufzeichnungen Wolfurt	48
4.2.2	Klimadaten Standorte aktuell	49
4.2.3	Klimadaten Standorte RCP4.5 im Jahr 2060	52
4.3	Auswertung der Messaufzeichnungen des Wohngebäudes	54
4.3.1	Ermittlung der kritischsten Nutzereinheit	56
4.3.2	Betrachtung der heißesten Woche in der kritischen Nutzereinheit	60
4.4	Modellierung des Gebäudes und Vergleich mit den Realmessdaten	62
4.4.1	Modellparameter und Annahmen	63
4.4.1.1	Nutzungsprofil	63
4.4.1.2	Lüftungsanlage	64
4.4.1.3	Wärmebrücken	65
4.4.1.4	Fenster und Verglasung	66
4.4.2	Resultate der Modellsimulation in Bregenz	67
4.5	Durchführung der passiven Sonnenschutzmaßnahmen	71
5	Ergebnisse	72
6	Diskussion, Fazit und Ausblick	82
	Literaturverzeichnis	87
	Eidesstattliche Erklärung	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klimainformationen zu den ausgewählten Standorten [47]	14
Tabelle 2: Klimadaten für die Standorte Bregenz, Klagenfurt und Wien im Jahr 2022	50
Tabelle 3: Klimadaten für die Standorte Bregenz, Klagenfurt und Wien im Jahr 2060 mit <i>RCP4.5</i>	52
Tabelle 4: Bewertungsvariante zur Ermittlung der kritischsten Nutzeinheit.....	58
Tabelle 5: Vergleich kritischste Nutzeinheit gemessene Werte im Vergleich zu den Simulationen	68
Tabelle 6: Vergleich kritischste Nutzeinheit gemessene Werte im Vergleich zu den Simulationen mit Wolfurt Außentemperaturen.....	69
Tabelle 7: Resultate der Simulation 2022	72
Tabelle 8: Resultate der Simulation 2060 mit <i>RCP4.5</i>	74
Tabelle 9: Klimadaten für den Standort Wien im Jahr 2060 mit <i>RCP8.5</i>	76
Tabelle 10: Resultate der Simulation 2060 mit <i>RCP8.5</i> in Wien	77
Tabelle 11: Resultate Maßnahmenpaket 1 für <i>RCP4.5</i> im Jahr 2060	79
Tabelle 12: Resultate Maßnahmenpaket 2 für <i>RCP4.5</i> im Jahr 2060	79
Tabelle 13: Resultate Maßnahmenpaket 3 für <i>RCP4.5</i> im Jahr 2060	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ost-Ansicht des Referenzgebäudes in Wolfurt	10
Abbildung 2: Prognose für die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Vorarlberg [47]	15
Abbildung 3: Prognose für die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Kärnten [47]	16
Abbildung 4: Prognose für die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Wien [47]	17
Abbildung 5: Darstellung der globalen Wärmeströme der Erde [53]	19
Abbildung 6: Entwicklung der CO ₂ -Konzentration von 1957 bis 2023 mittels Monatsmittelwerte [60]	21
Abbildung 7: Prognose für die zukünftige Wärmebelastung in Wien (links RCP8.5 und rechts RCP4.5) [66]	22
Abbildung 8: Lufttemperaturen in Österreich im Jahr 2021 [68]	23
Abbildung 9: Jahresverlauf der Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenstunden in Österreich 2021 [70]	26
Abbildung 10: Entwicklung der Luftmitteltemperatur, Niederschlag und Sonnenscheinstunden [70] ..	28
Abbildung 11: Mittlere Lufttemperatur in der Alpenregion im Winterhalbjahr 2022/23 [73]	29
Abbildung 12: Darstellung der unterschiedlichen sozioökonomischen Pfade [75]	30
Abbildung 13: Matrix zur Machbarkeit von RCP und SSP-Szenarien [78]	33
Abbildung 14: Entwicklung der unterschiedlichen Klimaszenarien gemessen an den jährlichen Emissionen Gt CO ₂ /Jahr [80]	34
Abbildung 15: Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen bis 2100 [82]	35
Abbildung 16: Prognose für die Aussichten in der Zukunft für RCP4.5 und RCP 8.5 [85]	36
Abbildung 17: Einflussfaktoren für die Raumtemperatur in einem Wohngebäude [41]	39
Abbildung 18: Veränderung der Lufttemperatur bei Nachtlüftung anhand unterschiedlicher Bauarten [89]	45
Abbildung 19: Gemessene Temperaturdaten vor Ort mit Darstellung der Messfehler	47
Abbildung 20: Jahremesswerte 2022 in Wolfurt	48
Abbildung 21: Vergleich von Minimum,- Mittel,- und Maximumtemperatur an den drei Standorten	50
Abbildung 22: Jahrestemperaturkurve im Jahr 2022	51
Abbildung 23: Vergleich von Minimum,- Mittel,- und Maximumtemperatur an den drei Standorten mit RCP4.5 im Jahr 2060	52
Abbildung 24: Vergleich der Jahrestemperaturkurven von 2022 mit 2060	53

Abbildung 25: Jahresauswertung der Messaufzeichnungen von 2022 der einzelnen Wohnungen	54
Abbildung 26: Auswertung der Messdaten nach Anforderungen der <i>OIB-Richtlinie 6 2023</i>	56
Abbildung 27: Mittel, Minimal- und Maximaltemperaturen der einzelnen Wohnungen zwischen Mai und August 2022	57
Abbildung 28: Überhitzungsstunden der einzelnen Wohneinheiten im Zeitraum zwischen Mai und August 2022	60
Abbildung 29: Temperaturverlauf der heißesten Woche der Messaufzeichnungen	61
Abbildung 30: Heatmap über die 24 Stunden in den Sommermonaten	61
Abbildung 31: Modellierung des Referenzgebäudes in Wolfurt	62
Abbildung 32: Grundrissmodell einer Wohneinheit	63
Abbildung 33: Infiltrationsrate "semi exposed"	65
Abbildung 34: Wärmebrücken im Referenzgebäude	66
Abbildung 35: Zeitplaneinstellung der Sonnenschutzvorrichtung [93]	67
Abbildung 36: Messaufzeichnungen der Außentemperatur in Wolfurt 25.07-31.07.2022	68
Abbildung 37: Messwerte von Meteonorm für Bregenz 23.07-29.07.2022	69
Abbildung 38: Vergleich von Top_N real gemessen und simuliert im Jahr 2022	70
Abbildung 39: Entwicklung der KPI im Vergleich von 2022 und 2060	75

Abkürzungsverzeichnis

CCCA	Climate Change Centre Austria
CO ₂ -Äqui.	CO ₂ - Äquivalente
DSY	Design Summer Year
GWP	Global Warming Potential
HI	Hitze-Index
IDA ICE	IDA Indoor Climate and Energy
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KPI	Key performance indicator
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
PDH	Hours of dissatisfied People
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of dissatisfied
ppm	Parts per million
RCP	Representative Concentration Pathways
RMSE	Root Mean Square Error
SRY	Summer Reference Year
TRY	Test Reference Year
WRG	Wärmerückgewinnung
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

1 Einleitung

Mit dem Paket *Fit for 55* hat die *EU-Kommission* im Jahr 2021 die Ziele für die zukünftige Energiepolitik in den Bereichen Klima, Energie, Landnutzung, Gebäude, Verkehr und Steuern vorgestellt und definiert. Dabei sollen die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 Prozent im Vergleich zu dem Jahr 1990 gesenkt werden. Österreich verzeichnet im Jahr 2021 einen Treibhausgasausstoß von rund 77.5 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid-Äquivalent [1]. Trotz einer Reduktion von circa fünf Millionen Tonnen CO_{2eq.} verglichen mit 1990, verursacht der Gebäudesektor noch neun Millionen Tonnen CO_{2eq.} [1]. Entsprechend dieser Erkenntnis kommt der Weltklimarat *Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC* zu dem Fazit, dass aufgrund dieses Anstieges auch die Oberflächentemperatur zunehmen wird [2].

Die Zunahme der Oberflächentemperatur stellt auch eine Herausforderung für den Gebäudesektor dar. Seit dem Beginn der Industrialisierung in den 1980er Jahren ist die mittlere Oberflächentemperatur, laut dem Umweltkontrollbericht des *Umweltbundesamtes*, um rund zwei Grad Celsius in Österreich gestiegen. Auch weltweit gesehen hat sich die Situation ähnlich verhalten. Dort wurde in den letzten Jahren ein durchschnittlicher Temperaturanstieg zwischen 1 °C und 1.5 °C verzeichnet [3]. Kritisch wird diese Prognose speziell für urbanen Raum aus, da sich die Umgebungsluft über dem Festland schneller erwärmt als über Gewässern [1]. Das Kalenderjahr 2022 zählt im Jahresmittel zu einem der drei Wärmsten der Messgeschichte. Bei Betrachtung einzelner Monate an bestimmten Messstationen in Österreich war es sogar das wärmste Jahr [4].

Besonders problematisch ist der Anstieg der sogenannten *Hitzetage*. Diese sind so definiert, dass Temperaturen im Schatten über 30 °C durch geeichte Messgeräte erfasst werden [5]. Ein Studienbericht der *Universität Graz* zeigt auf, dass es im Zeitraum von 1971 bis 2000 im Schnitt vier bis fünf Hitzetage gab. Weiters wird davon ausgegangen, dass sich diese Anzahl für die Jahre 2071 bis 2100 auf 30 bis 35 Hitzetage erhöhen wird.

Damit es zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich kommt, ist in den letzten Jahren die Energieeffizienz mit Maßnahmen wie der thermischer Sanierung oder Austausch der bestehenden Heizungsanlage verbessert worden [3]. Für dieses Vorhaben liegt der Fokus gegenwärtig, wie in der Vergangenheit, primär auf der energetischen Verbesserung der Gebäudehülle und damit eingehend, auf der Reduzierung des Heizwärmebedarfes. Dabei sollte dieser Aspekt in der Gebäudebetrachtung auch während der Sommerperiode nicht außer Acht gelassen werden [4]. Aus dem Endbericht für den *Masterplan Wärme* des *Amtes der Vorarlberger Landesregierung* geht hervor, dass der Kühlbedarf in den kommenden Jahren zunehmen wird. Dem entgegenwirkend sollen bauliche Maßnahmen durchgeführt

werden, die den Kühlbedarf senken und den Einsatz von raumluftechnischen Anlagen weitestgehend vermeiden [5]. Analysen der *Agora Energiewende* schätzen den Energieverbrauch für die Kühlung von Gebäuden in Deutschland im Jahr 2030 auf 5.3 Terawattstunden und für das Jahr 2050 sogar auf das Doppelte [8].

1.1 Motivation der Arbeit

Aufgrund der Prognose, dass die Kühlleistung in Gebäuden zunehmen muss, um eine Überhitzung zu verhindern, besteht Bedarf, bereits bei der Planung darauf Rücksicht zu nehmen und entsprechende Maßnahmen frühzeitig in Betracht zu ziehen. Prinzipiell besteht der Anspruch, bereits während der Planungsphase von Wohngebäuden, in Zusammenarbeit mit den Architekten, den zuständigen Bauherrn und dem ausführenden Bauunternehmen, sämtliche energetischen Faktoren zu berücksichtigen. Meist liegt die Problematik darin, dass erst bei der Einreichung der Pläne ein Energieausweis erstellt wird und die sommerliche Überwärmung nur anhand von Normen abgeschätzt wird [6]. Rahif et al. kommen in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass Entscheidungen von Baufachleuten während der frühen Entwurfsphase zu Komfortvorteilen unter anderem auch bezüglich sommerlicher Überhitzung in Gebäuden führt [7].

Somit soll der Fokus nicht nur auf der Reduzierung der kurzfristigen Investitionskosten liegen, sondern auch langfristig auf der Einsparung von Energie und daraus resultierender Senkung der Betriebskosten. Mit den gesparten Kosten besteht die Möglichkeit diese in die Integrierung von passiven Maßnahmen zu investieren. Zu den passiven Maßnahmen zählen beispielsweise die natürliche Lüftung, Sonnenschutzvorrichtungen, bestimmte Sonnenschutzgläser wie Elektrochromes Glas und Überdachungen [11]. Auch simple Vorhaben, wie eine Dachbegrünung können einen positiven Einfluss auf die Innentemperatur eines Gebäudes haben, wie der Leitfaden zur Dachbegrünung der Stadt Wien zeigt [8].

In dieser Arbeit wird untersucht, ob mit Sonnenschutzmaßnahmen Temperaturen, die den Regularien der Bautechnik entsprechen, eingehalten werden können. Dort sind für alle Wohnbereiche eine maximale Temperatur von 25 °C vorgeschrieben und zwar ohne aktive Kühlung nur mit Passiver [7].

Beim Energieausweis für Wohngebäude spielt der Punkt der sommerlichen Überhitzung keine allzu große Rolle und sollte um ein paar Kennzahlen wie vergleichsweise den Hitzegradtagen oder Kühlbedarf wie bei den Nicht-Wohngebäuden ergänzt werden. Außerdem wäre es vorteilhaft, für jedes Bauvorhaben eine thermische Gebäudesimulation vorzuschreiben, um unerwünschte Auffälligkeiten im Vorhinein entgegenwirken.

1.2 Problemstellung der Arbeit

Im Gegensatz zu Punkt 4.9.1 der *OIB 6 2019* wird nach der Bautechnikverordnung der Vorarlberger Landesregierung der sommerliche Wärmeschutz erfüllt, wenn eine außenliegende Vorrichtung wie Jalousien, Raffstoren, Roll- oder Fensterläden vorhanden ist [13]. Dadurch ist der sommerliche Wärmeschutz in der Bautechnikverordnung wesentlich einfacher zu erreichen als in der *OIB- Richtlinie 6* des *österreichischen Bautechnik Institutes* von 2019. In dieser gilt der sommerliche Wärmeschutz als gegeben, wenn die sommerliche Überwärmung vermieden wird oder wenn kein außeninduzierter Kühlbedarf für die kritischste Nutzeinheit vorhanden ist. Laut *OIB6-2019* gilt:

„die sommerliche Überwärmung als vermieden, wenn die operative Temperatur im Raum bei einem sich täglich periodisch wiederholenden Außenklima mit dem standortabhängigen Tagesmittelwert $T_{NAT,13}$ den Wert von $1/3 \cdot T_{NAT,13} + 21,8$ °C nicht überschreitet“ [10].

Abweichend von den bundesweiten und den landesspezifischen Vorgaben in Vorarlberg, genügt es in Niederösterreich und Salzburg über eine ausreichende Speichermasse des Gebäudes zu verfügen. Diese sind in der alten Fassung der OIB von 2015 verankert. Das Baugesetz des Bundeslandes Burgenland weist hingegen nur die Anforderungen an ein Niedrigenergiegebäude auf. Wie bereits oben beschrieben, sind in Vorarlberg diese Vorgaben durch ein Landesgesetz geregelt, was einen Sonderfall darstellt. Bei den übrigen fünf Bundesländern sind die Vorgaben der *OIB6-2019* einzuhalten und müssen nur eine der zwei Varianten erfüllen.

Bei der Betrachtung der Vorgaben fällt auf, dass weitere wesentliche Aspekte keine Relevanz besitzen. Zum Beispiel werden Maßnahmen, wie das Öffnen von Fenstern über Nacht oder Alternativlüftungsmöglichkeiten nicht beachtet. Außerdem werden innere Wärmegewinne nicht in Kalkulationen inkludiert und wirken sich somit nicht auf die operative Temperatur im Gebäude aus. Zu den inneren Gewinnen zählen Menschen, die je nach Tätigkeit und Anzahl einen verschieden großen Einfluss haben können. Hinzu kommen noch die Einträge von technischen Geräten und der Wärmeverlust von thermischen Speichern. Zwar werden die solaren Gewinne mit einkalkuliert, jedoch wird dieses Problem meist mit einer raumluftechnischen Anlage gelöst und auf eine außenliegende Sonnenschutzvorrichtung verzichtet.

Ganzheitlich ergibt sich die Problematik, dass trotz geltenden Vorgaben sämtliche Richtlinien eingehalten werden, aber aufgrund häufiger auftretender Hitzetage und dem zukünftig wärmeren Klima, sowohl Gebäude als auch deren Bewohnenden häufiger mit hohen Temperaturen konfrontiert werden.

1.3 Fragestellung der Arbeit

Folgende Forschungsfragen sollen basierend auf dem derzeitigen Forschungsstand in den Resultaten der vorliegenden Masterarbeit beantwortet werden:

Forschungsfrage 1:

„Wie ändert sich der Überhitzungsgrad von Wohngebäuden bei Betrachtung des zukünftigen Klimas?“

Forschungsfrage 2:

„Kann mit passiven Sonnenschutzmaßnahmen künftig ein sommerlicher Wärmeschutz gewährleistet werden?“

1.4 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es zu analysieren, welchen Einfluss das zukünftige Klima auf das Überhitzungsproblem von Wohngebäuden haben wird. Dafür wird als Referenzgebäude ein Wohnbauprojekt von der *Rhomberg Bau Gruppe* in Wolfurt gewählt, welches einen typischen Neubau in Massivbauweise von Mehrwohngebäuden abbildet. Dieses Gebäude wird als Referenz genommen, da es den zukünftigen Anspruchskriterien nach OIB 6-2023 entspricht [15]. So weist der Massivbau zum Beispiel einen niedrigen Heizwärmebedarf von circa 15 kWh/m²a auf, verfügt einen Primärenergiebedarf ohne Haushaltstrom von 20 kWh pro Quadratmeter im Jahr und hat einen CO₂- Emissionswert von 3 bis 3.5 kg/m²a [16].

Zusätzlich ist dieses Objekt ein Forschungsprojekt des *Landes Vorarlbergs* in Kooperation mit dem *Energieinstitut Vorarlberg*. Damit steht eine gute Datenbasis zur Verfügung. In den jeweiligen Wohnungen werden Temperaturen gemessen und bilden somit ein Temperaturverlauf ab, welcher mit der dynamischen thermischen Simulation verglichen werden kann. Damit kann abgeschätzt werden, wie gut eine Simulation die Realität abbildet und welchen Einfluss das Nutzerverhalten auf das Gebäude hat. Dieser Aspekt wurde in der Forschung oft außen vorgelassen, da er schwer zu beziffern ist und bietet daher eine gute Möglichkeit, die bestehenden Ansätze zu erweitern. Für die Bewertung des Einflusses des zukünftigen Klimas müssen Kennwerte analysiert werden. Es gilt Kenngrößen wie die Anzahl der Hitzetage, die Überhitzungsstunden und die operativen Temperaturen in den jeweiligen Wohnungen betrachten. Als Basis für die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, wird das Gebäude mit dem zukünftigen Klima simuliert und passive Maßnahmen umgesetzt, wobei auf die Einhaltung des gesetzlichen sommerlichen Wärmeschutzes geachtet wird. Hinsichtlich dieses Zieles soll die

Arbeit herausfinden, ob es überhaupt möglich ist, ohne aktive Kühlung einen angenehmen Wohnkomfort zu gewährleisten.

1.5 Stand der Wissenschaft

Die zukünftige Hitzebelastungen in Gebäuden wird maßgeblich vom Klimawandel beeinflusst [17]. Weiters wirkt sich der Hitzeinseleffekt auf den benötigten Energieverbrauch für Kühlen aus und trägt dazu bei, dass die Luftqualität leidet und erhöht die thermische Belastung der Menschen. Forscher prognostizieren aufgrund des Klimawandels für den Bausektor in Griechenland einen Rückgang des Energiebedarfes von 50 Prozent für Gebäude, während der Kühlenergieverbrauch um rund 250 Prozent steigen soll [18]. Noch höher ist die Schätzung mit 223 bis 1050 Prozent von Frank T. [19] für die Entwicklung des Kühlbedarfs von Bürogebäuden mit internen Gewinnen von 20 bis 30 W/m² in der Schweiz. Die Vereinbarkeit von Reduktion des Energiebedarfes von Gebäuden gleichzeitig mit der Vermeidung von sommerlicher Überhitzung führt laut Mulville und Stravoravdis [20] zu einem Anstieg der Überhitzungsrate. Bezüglich des steigenden Kühlbedarfs in Verbindung mit dem Klimawandel sind ausreichend Studien in der Forschung vorhanden.

Larsen et al. [21] untersucht anhand der Klimaszenarien *RCP2.6* und *RCP4.5* die Entwicklung der Heizgrad- und Kühlgradtage unter dem Einfluss des Klimawandels in Europa. Dabei werden für die unterschiedlichen Länder in Europa Trendanalysen durchgeführt und anhand dieser eine Prognose auf den Heiz- und Kühlbedarf getroffen. Für die Bergregionen sind höhere Abweichungen zu beobachten, da Prognosen zur Erwärmung in Abhängigkeit der Meereshöhe und Entfernung zu großen Gewässern schwieriger durchzuführen sind. Die Alpenregion und andere höher gelegene Standorte erwartet, je nach des zu beobachten Zeitraums und dem eintreffenden Szenario, eine höhere Temperaturbelastung [22].

Zur Betrachtung der sommerlichen Überhitzung liegen mehr Studien zu Bürogebäuden vor als zu Wohngebäuden. Dabei sind einige Erkenntnisse zu gewinnen, die jedoch nicht ohne Anpassung des Systems auf Wohngebäude übernommen werden können. So ist die Fassadenausrichtung des Gebäudes, bezogen auf die Überhitzungsstunden, weniger von Relevanz als die Wärmeeinträge von internen Gewinnen. So können Diskrepanzen aufgrund von Variation der Wärmegewinne von Bürogeräten oder künstlichem Licht vom Faktor zwei bei den Überhitzungsstunden entstehen [23]. Außerdem liegt der Fokus der Forschung bei der Entwicklung des Kühlbedarfs unter dem Einfluss des Klimawandels und weniger bei den Auswirkungen für die Menschen in Wohngebäuden.

Zur Bewertung der Überhitzungsproblematiken in Wohngebäuden liegen in Europa unterschiedlichste Berechnungsansätze vor. Dabei werden von den Ländern verschiedene Aspekte ungleichmäßig stark gewichtet. Attia et al. [24] untersucht in ihrer Studie dabei die diversen Berechnungsmethoden anhand der Regularien und Interviews von Experten, um einheitliches Bewertungsschema zu konstruieren. Die Methoden, die von den Ländern verwendet werden, um die Überhitzungsproblematik zu bewerten, sind sehr divers. Der Studie zur Folge gilt Frankreich als Vorreiter zur Einschätzung der sommerlichen Überhitzung. Dort fokussiert man sich dabei auf eine komfortbasierte Variante entgegen der wärmebilanzbasierten Variante und betrachtet zeitintegriert ein Mehrzonenmodell anstelle von Einzelzonenmodellen. Die Studie basiert auf der aktuellen Temperaturlage und beinhaltet nicht die Prognose für die Zukunft. Auffällig ist, dass Bauvorschriften in Ländern wie Deutschland und den Niederlanden, bei der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes, persönliche Faktoren wie Kleidung, Stoffwechselrate und Umgebungsparameter wie Luftgeschwindigkeit und Strahlungstemperatur nicht berücksichtigen [25]. Die unterschiedlichen Länder beinhalten die verschiedensten Gebäudetypen und Gebäudequalitätsstandards. Daher ist es sinnvoll zu untersuchen, inwiefern sich energieeffiziente Gebäude im Wandel des Klimas im Vergleich zu Altbauten eignen.

Diese Betrachtung wird in der Studie von Baba et al. [26] anhand eines typischen Einfamilienhauses in Kanada durchgeführt. Die Quantifizierung wird auf Grundlage von RCP4.5 und RCP8.5 für die Zeiträume von 2026 bis 2045 und von 2080 bis 2099 durchgeführt. Das Resultat zeigt, dass energieeffizientere Gebäude besser gegen den Klimawandel geeignet sind. Allerdings gilt diese These nur unter der Berücksichtigung einer ausreichenden Belüftung. Ansonsten würden die Gebäude suboptimaler abschneiden, da die Wärme schlechter nach außen dringt. Zudem kann gezeigt werden, dass ein hoher Grad an natürlicher Belüftung ausreicht, um die Komfortansprüche zu gewährleisten. Außerdem erfordert die Erhöhung der Außentemperaturen die Integration von Innen- und Außenbeschattungen. Dass besser isolierte Gebäude ohne unzureichenden Sonnenschutz ein höheres Hitzerrisiko aufweisen als Altbauwerke, zeigt die Studie von Hamdy et al. [27]. Dabei wurden Simulationen von über 36.000 Gebäuden in den Niederlanden erstellt. Eine weitere Erkenntnis ist, dass Wohnungen im Mittelgeschoss oder Dachgeschoss empfindlicher auf globale Erwärmung reagieren. Morgan et al. [28] verdeutlicht in seiner Studie die Hitzebelastung für Neubauten in Gewässerregionen. Dabei sind in Schottland 54 Prozent der untersuchten Gebäude über sechs Monate im Jahr überhitzt, während davon wiederum nur 27 Prozent weniger als zehn Prozent von der Problematik betroffen sind.

Eine wichtige Gegenmaßnahme für die sommerliche Überhitzung ist die Vermeidung von einem zu hohen Anteil an solaren Einträgen und internen Gewinnen. Daher werden Betrachtungen benötigt, die zeigen welche Parameter ausschlaggebend für die Reduktion des

Komforts des Menschen sind. So zeigen die Untersuchungen von Alrasheed und Mourshed [29] stärkere Überhitzungsausmaße bei ungünstigem Verhalten der Bewohnenden aufgrund von erhöhten internen Gewinnen. Zudem neigen Wohnungen mit offenem Grundriss beziehungsweise offenem Küche- und Wohnbereich tendenziell eher dazu die internen Gewinne zu erhöhen und damit die Überhitzung in Wohnungen zu verstärken. Breesch und Janssens [30] kommen zum Fazit, dass die internen Gewinne, die Lüftungsdurchflussraten sowie die Solartransmissionskoeffizienten den größten Einfluss auf den thermischen Komfort haben. Außerdem benötigt es gezielte Strategien, um die überschüssige Wärmeenergie aus dem Gebäude zu transportieren. Dies kann mittels passiven Kühlungssystemen geschehen.

Eine passive Kühlung ermöglicht, den thermischen Komfort und Raumluftqualität zu verbessern. Dies geschieht in der Regel aufgrund der Verhinderung von Wärmegewinnen, die Steuerung oder Anpassung der Wärmemenge und die Abfuhr unerwünschter Wärme. Santamouris und Kolokotsa [18] schätzen das Potential zur Reduzierung des Energieverbrauchs der Nachtlüftung, je nach Standort und Parametern des Gebäudes bei 20 bis 25 Prozent. Außerdem sind am Folgetag der Nachtbelüftung Innentemperaturreduktionen von bis zu drei Kelvin möglich. Zu dieser Erkenntnis kommen auch Kaddour et al. [31] in ihrer Untersuchung der natürlichen Lüftung in trockenen Regionen im Fall Ghardaia, bei der je nach Infiltrationsrate zwei bis drei Kelvin Temperaturreduzierung möglich ist. Allerdings fungiert die natürliche Nachtlüftung in warmen und feuchten Gebieten weniger optimal. Das Feuchtigkeitsverhältnis zwischen trockener Luft und der Außenluft sollte die Grenze von 15 Gramm pro Kilogramm nicht überschreiten [32]. Eine weitere Passivmaßnahme, die weniger abhängig vom Feuchtegrad der Luft ist, ist der Erd-Luft-Wärmetauscher.

Studien zu Erd-Luft-Wärmetauschern wie die von Santamouris und Kolokotsa verdeutlichen die Machbarkeit der vollständigen Deckung des Kühlbedarfs in unterschiedlichen Gebäudenutzungstypen. Dabei konnten zwei Bildungsgebäude vollständig mittels Kühlung aus dem Erdreich versorgt werden. In der Schweiz konnten mit Hilfe von 43 Rohren in sechs Meter Tiefe der Kühlbedarf eines Gewerbegebäudes um ein Drittel reduziert werden [33].

Alrasheed und Mourshed [29] verdeutlichen die vehemente Reduzierung der Hitzebelastung in Gebäuden mit Anwendung von Kombinationen an passiven Kühlstrategien anstelle einer einzigen Maßnahme. Bereits im Jahr 2000 befasste man sich mit der Bekämpfung von überhitzten Gebäuden und erkannte das Potential von passiven Strategien wie die Implementierung von Gründächern oder das bewusste Pflanzen von Bäumen zur Maximierung der Verschattung [34].

Abschließend ist es wichtig zu erwähnen, dass die Bekämpfung gegen die Hitzebelastung von immenser Dringlichkeit sein wird, da Studien von Linares et al. [35] zufolge je nach

Klimaszenario und Zeitraum die zurechenbare Sterblichkeit aufgrund von Hitzeperioden oder Hitzewellen bei dem 1.8-fachen bis 7.2-fachen liegen wird.

2 Methodik

Für die Betrachtung der Gebäude wird die thermische Simulationssoftware *IDA Indoor Climate and Energy*, besser bekannt als *IDA ICE* von *EQUA* mit der Version 4.9.9 verwendet. *IDA ICE* wird als Simulationsprogramm ausgewählt, da mit diesem Programm in der *Fachhochschule Vorarlberg* gelehrt wird und da dieses in der Untersuchung von Crawley et al. zur Validierung von Gebäudesimulationsprogrammen eine gute Bewertung aufweist [36] [37]. Mit Hilfe der Software werden die Referenzgebäude abgebildet und es können verschiedene Parameter hinzugefügt, entfernt oder geändert werden. Zudem bietet *IDA ICE* die Möglichkeit, Parameteranalysen durchzuführen. Für die Betrachtung der Auswirkung von Menschen können Geräte, Personen und noch wichtige andere Komponenten mit angepassten Betriebs- und Anwesenheitszeiten implementiert werden. Von Bedeutung für diese Arbeit ist auch, dass Klimadatensätze von *der GeoSphere Austria* oder *Meteornorm* eingelesen werden können [38] [39]. Mittels prognostizierten Datensätzen für das Jahr 2060 an den Standorten Bregenz, Klagenfurt und Wien wird der Einfluss des künftigen Klimas auf das Referenzgebäude untersucht. Damit es auch eine gewisse Repräsentanz für andere Objekte hat, wird nicht nur Vorarlberg betrachtet, sondern auch Standorte im Süden und Osten Österreichs. Somit werden nicht nur ländliche Gegebenheiten untersucht, sondern auch städtische Einflüsse berücksichtigt.

Sämtliche benötigten Daten wie die Baupläne, Temperaturmessungen zum Gebäude, Anzahl an Personen oder sonstige relevanten Informationen werden unter Einhaltung des Datenschutzes vom *Energieinstitut Vorarlberg* zur Verfügung gestellt [40].

Im Zuge der Recherche wurde eine Studie seitens des *Umweltbundesamtes Deutschland* gefunden, die sich mit einer ähnlichen Thematik beschäftigt. Allerdings bezog sich das Hauptaugenmerk auf einer Parameterstudie, die die sommerliche Überhitzung unterschiedlicher Gebäudetypen analysiert und sich auf das Gebiet Deutschland bezieht [41]. Zudem wurden in der vorliegenden Arbeit Standorte in der Alpenregion gewählt, um Abweichungen aufzuzeigen. Dem *ÖKS 15 Endbericht* für Österreich kann entnommen werden, dass eine höhere Gitterweite bei der Betrachtung der Klimasimulation, besonders in komplexen Geländen wie zum Beispiel dem Alpenraum, geringere Abweichungen zeigen. Daher liegt der Fokus im Bericht speziell auf hochaufgelöste Simulationen [42].

2.1 Referenzgebäude

Für den methodischen Teil dieser Arbeit wurde ein Mehrfamiliengebäude mit 15 Wohnungen in Wolfurt im Bundesland Vorarlberg ausgewählt und befindet sich in der maritim beeinflussten Westklimazone. Dem Energieausweis kann entnommen werden, dass die Norm-Außentemperatur für diesen Standort – 11.2 °C beträgt und das Gebäude im Jahr 186 Heiztage benötigt.

Sämtliche nachkommenden Informationen stammen aus dem Energieausweis oder von den bereitgestellten Bauplänen.



Abbildung 1: Ost-Ansicht des Referenzgebäudes in Wolfurt

Das Gebäude wurde 2018 fertiggestellt, weist eine Bruttogrundfläche von 1.496 m² auf die sich über drei Obergeschosse und einem Erdgeschoss verteilen auf und besitzt einen Heizwärmebedarf von 28 kWh/m²a. Bei einer Geschosshöhe von 3.11 Meter ergibt das ein Gesamtbruttovolumen von 4.656 m³. Durchschnittlich verfügt eine Wohnung über eine Nutzfläche von 75 Quadratmeter und ergibt somit 75 Prozent der Gesamtbruttogrundfläche. Bei der Bauweise handelt es sich um einen mittelschweren Massivbau mit einem mittleren U-Wert von 0.25 W/m²K. Das Wärmedämmverbundsystem verfügt über einen U-Wert von 0.12 W/m²K und ist mit 28 cm dicken Steinwollplatten gedämmt, womit es damit rund 40.7 Prozent der gesamten Bauteilfläche des Gebäudes ausmacht.

Für die Klimatisierung der Wohnungen verfügt das Gebäude über eine raumluftechnische Anlage mit Wärmerückgewinnung. Die Warmwasseraufbereitung und die Raumheizung wird mittels Wärmepumpe erzeugt, die von einer Photovoltaikanlage unterstützt wird. Relevant für diese Masterarbeit ist der Aspekt, dass das Wohngebäude über eine außenliegende Verschattung in Form von Jalousien verfügt und damit den Anforderungen für die sommerlichen Wärmeschutz der Bautechnikverordnung Vorarlbergs §41 Absatz 9 entspricht [43]. Zudem sind sämtliche Fenster mit einem Dreifach-Wärmeschutzglas und einem U_g-Wert von 0,60

W/m²K ausgestattet, die von einem Hochwärmedämmenden Holzrahmen mit U_f- Wert 1,10 W/m²K umhüllt sind. Gemessen an der gesamten Außenwand beträgt der Anteil der transparenten Bauteile wie Fenster und Fenstertüren 25.3 Prozent und an der konditionierten Hüllfläche 14.3 Prozent. Die Flächen verteilen sich auf 55 Fenster mit Maßen von 90 x 180 Zentimeter und weiteren 40 Fenstertüren oder größeren Glasflächen im Bereich der Loggias. Wie in der Abbildung 1 erkennbar, verfügen die Ostwohnungen über zwei Loggias, während die Süd- und Westwohnungen nur über eine Loggia verfügen. Einzig die Wohnungen auf der Nordseite des Gebäudes verfügen über keine, wobei die Wohnungen so positioniert wurden, dass jede Wohnung über einen überdachten Außenbereich verfügt.

2.2 Modellierung des Gebäudes

Für die Auswertung der Realdaten wird zuerst das Referenzgebäude in *IDA ICE* konstruiert und die Eingangsparameter wie die Anzahl an Personen und die Anwesenheit der Bewohnenden berücksichtigt. Die Gebäudehülle wird gemäß dem Energieausweises nachgebildet und für die Gebäudetechnik wird mit der Voreinstellung von *IDA ICE* des *idealen Heizelements* gearbeitet. Das liegt daran, dass nur Wohnungstemperaturdaten aufgezeichnet wurden und keine genaue Aussage über die Reglereinstellungen und Konfiguration des Heizsystem gemacht werden können. Anschließend wird das Gebäude mit den bestehenden Wetterdaten von Meteonorm aus dem Jahr 2022 in *IDA ICE* simuliert. Dabei wurde Bregenz als Standort gewählt, da keine Wetterdaten von Wolfurt vorliegen und sich die nächstgelegenen Daten auf Bludenz beziehen, welches jedoch zu weit entfernt ist. Es wird eine Jahressimulation für das Jahr 2023 durchgeführt und im späteren Verlauf mit den Messdaten vor Ort verglichen.

2.3 Auswertung der Realtemperaturdaten und Vergleich der Simulationsergebnisse

Die bereitgestellten Datensätze des Energieinstituts *Vorarlberg* beinhalten 118.000 einzelne Werte im Zeitraum zwischen 2019 und 2023. Sämtliche Temperaturdaten der jeweiligen Wohnungen, dem Technikraum, des Stiegenhauses, des Kellers und des Fahrradraumes wurden erfasst. Ein weiterer wichtiger Input ist die gemessene Außentemperatur, sowie die Temperatur der Lüftung von Fort-, Zu-, Ab und Außenluft. Außerdem wurde die Luftqualität mit der CO₂-Konzentration in ppm und die Luftfeuchtigkeit in Prozent gemessen. Diese Parameter können Indikatoren für das Nutzungsverhalten sein, da Aktivitäten von Bewohnenden eine gegenseitige Auswirkung der beiden Parameter zur Folge hat.

Um eine gewisse Aussagekraft der derzeitigen verwendeten Klimadaten für den Standort Bregenz zu gewährleisten, werden die gemessenen Werte mit den Vorliegenden von *IDA ICE*

verglichen. Durch die Zuhilfenahme des Programmes „*Data Viewer*“ können Datensätze visualisiert werden und somit eine erste Einschätzung der Daten gemacht werden, indem die sie miteinander verglichen werden. Somit können auch Fehler in der Aufzeichnung identifiziert werden und die drei kritischsten Wohnungen auffindig gemacht werden. Das Tool ermöglicht es zudem eine sogenannte *Heatmap* zu erstellen. Dabei werden die Datensätze entsprechend ihrem Wert farblich dargestellt. Hierbei werden beispielsweise niedrige Temperaturen blau dargestellt und hohe Temperaturen rot. Ein wesentlicher Vorteil liegt in dieser Darstellungsmethode liegt darin, dass große Zeiträume durch entsprechende Farben schnell analysiert und interpretiert werden können.

Nach der Prüfung der Angaben wird wie in der *OIB -Richtlinie 6 von 2019*, die kritischste Nutzeinheit identifiziert und als Referenz zum Vergleich mit den simulierten Werten herangezogen. Im Anschluss wird die abgeschlossene Simulation des Referenzgebäudes mit den bestehenden Klimadaten und den vorgegebenen Parametern wie Anzahl an Bewohnenden oder die inneren Gewinne gemäß *SIA 2024*, ausgewertet und wie oben die kritischste Nutzeinheit ausgewählt [44]. Sollten diese Ergebnisse nicht kongruieren, wird sich bei den Simulationsergebnissen diese Wohnung näher angeschaut, um Unstimmigkeiten herauszufinden. Für die Vergleichbarkeit der Realdaten mit den simulierten Werten, werden falls möglich, die Lufttemperatur, die operative Temperatur und die Stundenanzahl über 27° Grad Innentemperatur als Kennziffern verwendet. Anhand dieser Gegenüberstellung der Ergebnisse können möglicherweise Ansätze zur Bewertung des Einflusses des Nutzerverhaltens auf die sommerliche Überhitzung erstellt werden. Die drei oben genannten Indikatoren werden als Vergleichsmöglichkeit mit den Prognoseklimadaten verwendet, um die Veränderung des Klimawandels in Zahlen messbar zu machen. Im Anschluss daran werden die Indikatoren um den HI-Index, den Übertemperaturgradstunden und Übertemperaturhäufigkeit ergänzt.

2.4 Untersuchung der Diskrepanz im Vergleich mit den Zukunftsdaten

Dieses Unterkapitel basiert auf der Auswertung der Simulationen des Gebäudes mit den gegenwärtigen Klimadaten aus dem Kapitel 2.3. In *IDA ICE* werden die Klimadaten von Meteoronorm für das Jahr 2060 mit dem Klimaszenario *RCP 4.5* für den Standort Bregenz eingefügt, um die Folgen von unterschiedlichen Temperaturanstiegen analysieren zu können. Der gewählte Klimaszenario-Pfad wird im Kapitel 3.4 erläutert, weshalb dieser auch für die Analyse ausgewählt wurde. Der Zeitraum von 2060 wurde herangezogen, da einige Untersuchungen, wie zum Beispiel der Abschlussbericht zu *Kühle Gebäude im Sommer* des *Umweltbundesamtes Deutschlands* sich zu dieser Thematik mit dem Jahr 2050 beschäftigen und eventuell gewisse Veränderungen aufgrund der Klimapolitik oder anderen Ereignissen zu anderen Resultaten führen können [41]. Ein weiterer Aspekt ist zudem, dass sich die

Rückzahlungsfinanzierung der Wohnbauförderung des Landes Vorarlbergs auf 35 Jahre beläuft und somit die Investition in das Mehrfamiliengebäude mit dem betrachteten Zeitraum gedeckt ist [45]. Bei der Untersuchung werden dieselben Eingabeparameter belassen, damit keine Unterschiede aufgrund von Veränderungen entstehen. Mit den Klimadaten von 2060 werden für den Standort Bregenz jeweils die beiden Klimaszenarien simuliert und anhand der Bewertungskennzahlen mit den anderen Ergebnissen verglichen und interpretiert. Ziel ist es herauszufinden, ob die neuen Daten eine andere Wohnung als die kritischste einstufen und inwieweit sich die Resultate verändert haben.

2.5 Betrachtung des Referenzgebäudes an anderen Standorten

Damit das Gebäude auch für andere klimatische Gegebenheiten von Relevanz ist, werden Simulationen mit denselben Datensätzen ebenfalls für die Standorte Klagenfurt und Wien durchgeführt. Diese Ortschaften wurden ausgewählt, um einen Großteil der Klimaregion in Österreich abzudecken und somit auch repräsentativ für andere Gebiete zu sein. Vorarlberg soll in diesem Beispiel das alpenländische Klima darstellen, während Wien ein typisches Stadtgebiet mit Mikroklimaeinfluss repräsentiert und den östlichen Bereich von Österreich abdeckt. Mit Klagenfurt soll das Klima im Süden und der Bezug zur Nähe von größerem Gewässer mit der Adria abgedeckt werden. Für die drei unterschiedlichen Standorte werden keine exakten Nebengebäude simuliert, da nicht anzunehmen ist, dass dieselbe Umgebung wie in Wolfurt auch wo anders vorzufinden ist. Für den Anwendungsfall der Verschattung werden einfache Verschattungselemente verwendet. Wie bereits bei den anderen Varianten durchgeführt, wird abschließend anhand von Key Performance Indicators die Bewertung des Klimawandels auf die sommerliche Überhitzung bei Wohngebäuden beurteilt. Ein KPI ist eine messbare Leistungsgröße, die es ermöglicht, gewisse Vorhaben miteinander zu vergleichen und somit daraus ein Resümee zu ziehen [46]. Dieser Ansatz der drei verschiedenen Standorte soll Aufschluss darauf geben, wie sich der Klimawandel in den unterschiedlichen Regionen Österreichs auswirkt und ob sich zu große Differenzen bei der sommerlichen Überhitzung zeigen.

2.5.1 Ausgewählten Standortklimaregionen

Dieses Unterkapitel dient dazu, einen groben Überblick zu den ausgewählten Standorten zu erlangen, um somit ein Gefühl für die anschließenden Simulationsergebnisse zu erhalten.

Tabelle 1: Klimainformationen zu den ausgewählten Standorten [47]

Standort	Vorarlberg	Kärnten	Wien
Mittl. Lufttemperatur 1971-2000 [°C]	Ø5,0	Ø5,9	Ø10,2
ΔT [°C] 2021-2050 RCP 8.5	Ø1,4	Ø1,5	Ø 1,5
ΔT [°C] 2071-2100 RCP 8.5	Ø4,2	Ø4,2	Ø 3,8
mittlere Niederschlagssumme [mm]	1716	1156	603
Hitzetage RCP4.5/RCP8.5 2021-2050 [Tage]	Ø1,8 / Ø1,7	Ø3,2 / Ø3,2	Ø5,1 / Ø5,3
Hitzetage RCP4.5/RCP8.5 2071-2100 [Tage]	Ø3,4 / Ø11,6	Ø5,8 / Ø17,1	Ø10,3 / Ø23,3

Die Tabelle 1 beinhaltet relevante Kenndaten zur Einschätzung der klimatischen Bedingungen an den einzelnen Standorten. Dabei werden im Projekt ÖKS 15 Unterscheidungen bezüglich naher Zukunft mit dem Zeitraum 2021-2050 und der fernen Zukunft zwischen 2071 und 2100 gemacht. Zudem wird differenziert zwischen den beiden Klimakonzentrationspfaden RCP 4.5 und RCP 8.5, um die verschiedenen Resultate der Klimaschutzpolitik in Österreich zu bemessen. Für die Betrachtung wurde die durchschnittliche Lufttemperatur zwischen 1971 und 2000, die mittlere Niederschlagstemperatur, die mittlere Änderung der Temperatur in den beiden Zukunftszeiträumen und die Änderung der Hitzetage betrachtet.

2.5.2 Klimaentwicklung Vorarlberg

Der oben angeführten Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass die Alpenregion Vorarlberg mit 5.0 °C im Mittel eine milde Temperatur aufweist. Den Simulationen der ÖKS 15 ergeben, dass die Temperaturzunahme im Winter und im Sommer in etwa gleich verläuft. Ausgehend von den 5.0 °C ist erkennbar, dass die mittlere Lufttemperatur gegen Ende des Jahrhunderts, je nach Szenario, zwischen 7.8 Grad und 11 Grad befinden wird. Zu beachten gilt, dass es sich dabei um wissenschaftliche Prognosen handelt und auf Annahmen beruhen, wobei das Endresultat unvorhergesehene Ereignisse nicht inkludiert und deshalb variieren kann. Die Temperaturänderung nimmt in der fernen Zukunft deutlich stärker zu, vor allem in der Variante mit dem RCP 8.5. Das Rheintalgebiet weist zwischen 1971 und 2000 die höchsten Temperaturwerte mit zehn bis zwölf Grad im Mittel auf. Grund dafür könnte der starke Zuwachs in den letzten Jahren sein [48]. Im Osten von Vorarlberg hingegen betragen die mittleren Temperaturen zwischen null und vier Grad Celsius. Bezüglich der Niederschlagsmenge ist eine leichte gleichmäßige Zunahme in der Zukunft zu erwarten, wobei in der fernen Zukunft im Bregenzer Wald mit einer stärkeren Zunahme zu rechnen ist. Bei den Hitzetagen weist das Bundeland Vorarlberg im Vergleich zu den anderen beiden Standorten eine geringe Summe an Tagen vor. Es

ist jedoch auffällig, dass sich die Anzahl der Tage zwischen naher und ferner Zukunft fast versiebenfacht, was in den anderen Bundesländern nicht der Fall ist. Für die nahe Zukunft ist kein merkbarer Unterschied zwischen den Klimapfaden erkennbar. Die Angaben in der Tabelle 1 stellen dabei nicht die Anzahl der Tage dar, sondern den Zuwachs. Beachtlich ist, dass für die ferne Zukunft mit einer deutlichen Steigerung zu rechnen ist, was sich auch am Anstieg der prognostizierten Temperatur für den Zeitraum widerspiegelt.

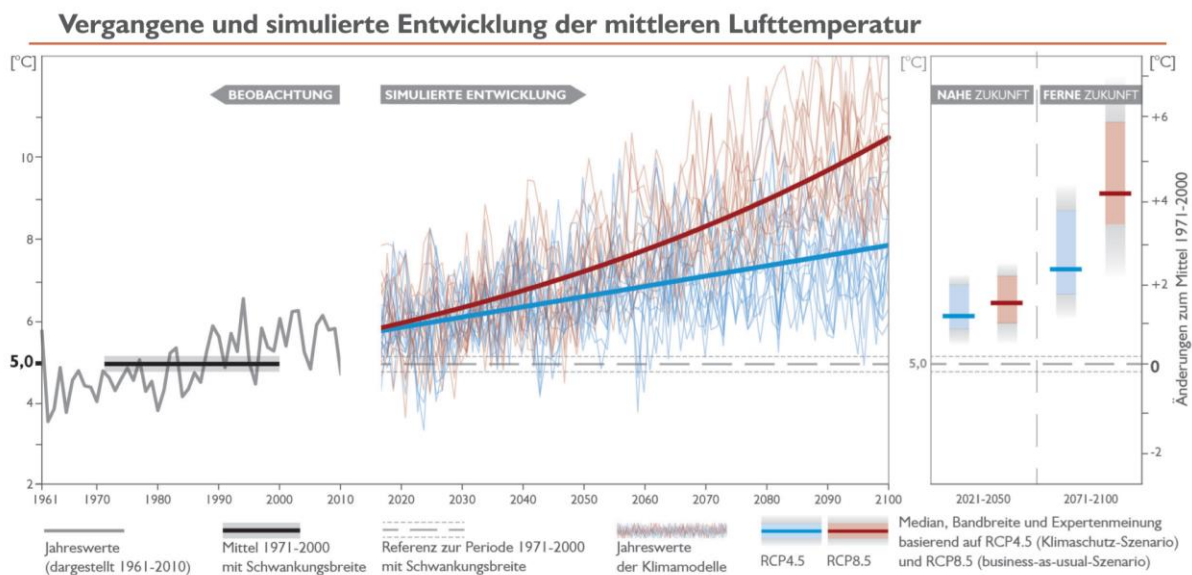


Abbildung 2: Prognose für die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Vorarlberg [47]

2.5.3 Klimaentwicklung Kärnten

Im Vergleich zum Bundesland Wien weist Kärnten ähnliche klimatische Bedingungen auf wie Vorarlberg. Ein Indiz dafür ist, dass die Differenz der Lufttemperatur um 0.9 Grad Celsius höher liegt als im westlichsten Bundesland Österreichs. Zudem sind die prognostizierten Veränderungen für die Zukunft nahe zu ident. Niederschlagsseitig regnet es in Kärnten im Mittel 560 Millimeter pro m² weniger als in Vorarlberg. Allerdings ist die Anzahl an Hitzetage um einiges höher, wobei in der fernen Zukunft mit bis zu 17 Hitzetage im Jahr gerechnet werden muss. Vor allem im südöstlichen Teil Kärntens mit dem Ballungszentrum um Klagenfurt, erhitze sich die Umgebung in den letzten Jahren sehr stark. Beim Vergleich der beiden Grafiken wird ersichtlich, dass die Kurven ähnlich verlaufen und sich der erwartete Temperaturanstieg gleich schnell entwickeln wird. Auch für den Niederschlag ist ein leichter Anstieg zu erwarten, wobei eine größere Änderung erst gegen Ende des Jahrhunderts als realistisch gilt. Saisonale Auffälligkeiten sind keine zu entnehmen, jedoch nimmt der Unterschied in der fernen Zukunft im Winter zu.

Vergangene und simulierte Entwicklung der mittleren Lufttemperatur

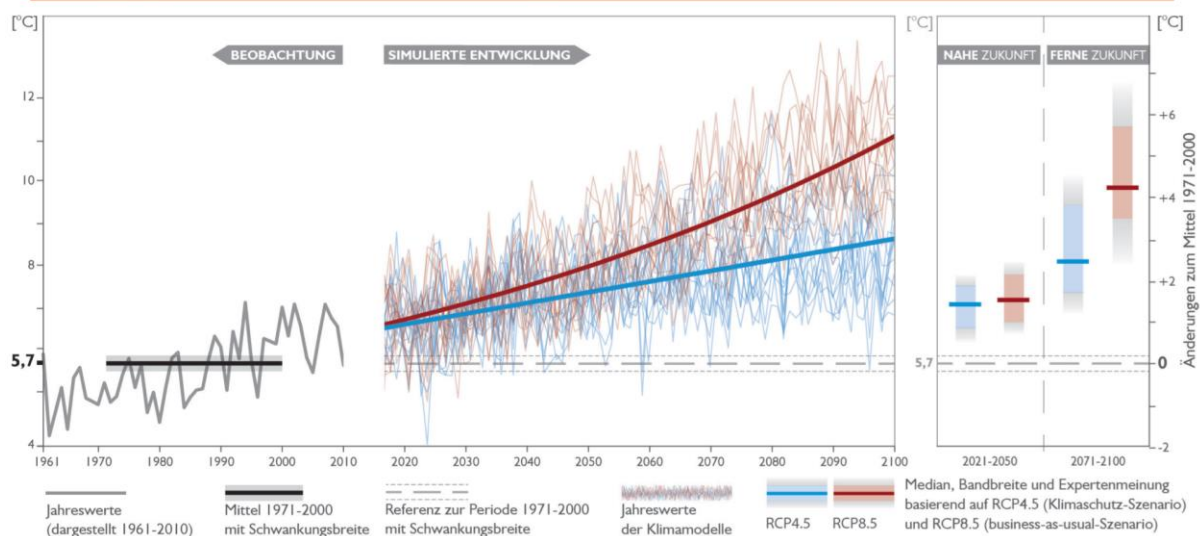


Abbildung 3: Prognose für die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Kärnten [47]

2.5.4 Klimaentwicklung Wien

Im Gegensatz zu den anderen beiden Standorten fällt auf, dass die mittlere Lufttemperatur der vergangenen Jahre mit 10.2 °C wesentlich höher liegt. Unabhängig vom betrachteten Szenario ist mit einem signifikanten Anstieg der Temperatur für die nahe als auch der fernen Zukunft zu erwarten. Die Zunahme ist im Winter sowie im Sommer, flächendeckend über Wien gleich. Die Gemeinsamkeit mit den anderen Standorten ist, dass der Verlauf gegen Ende des Jahrhunderts vor allem bei dem *RCP 8.5* stärker ausgeprägt ist. Mit 3.8 °C Erhöhung für die ferne Zukunft liegt der Wert unter dem der anderen beiden Standorte. Bezüglich des Niederschlags ist Wien deutlich niedriger Wert festzustellen, wobei sich dies künftig nur minimal verbessern sollte und auch nicht von groben Unterschieden in den verschiedenen Jahreszeiten ausgegangen wird. Mit 23.3 prognostizierten Hitzetagen wird bei dem Klimaszenario *RCP 8.5* an fast sieben Prozent des Jahres eine Tagestemperatur von 30 °C erreicht werden.

Vergangene und simulierte Entwicklung der mittleren Lufttemperatur

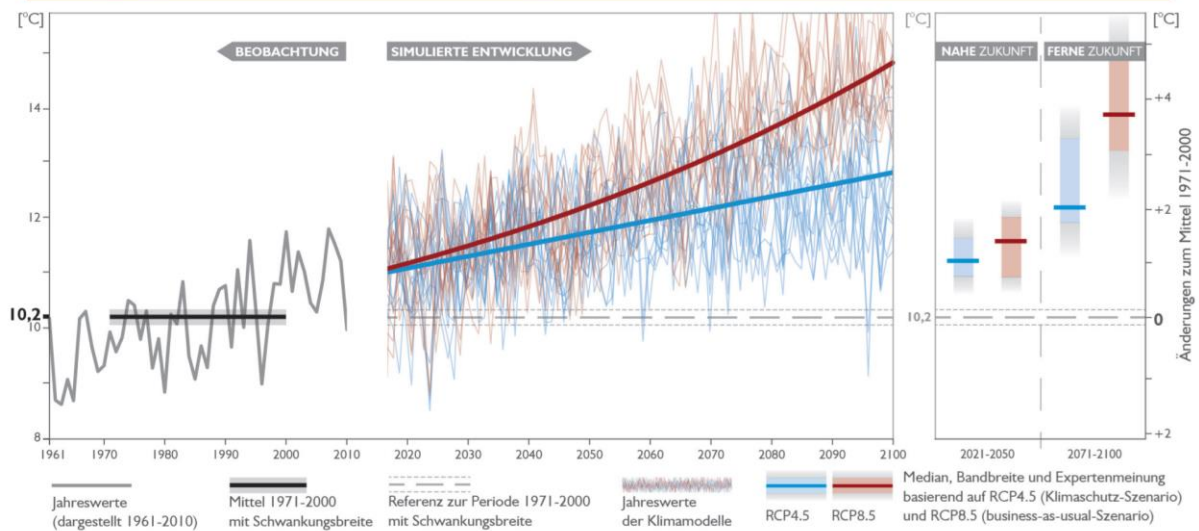


Abbildung 4: Prognose für die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Wien [47]

2.6 Passive Maßnahmen zur Vermeidung von sommerlicher Überhitzung

Die zweite Forschungsfrage beschäftigt sich mit dem Thema, ob es auch in Zukunft möglich sein wird, mit passiven Maßnahmen einen sommerlichen Wärmeschutz gewährleisten zu können. Für die Beantwortung dieser Frage muss definiert werden, was unter passiven Maßnahmen verstanden wird. Dies geschieht im Kapitel 3, dort werden die Einflussgrößen und die Maßnahmen detailliert beschrieben. Der abschließende Teil dieser Arbeit dient dazu, Unternehmen aus der Baubranche oder Experten aus dem Energiebereich Aufschluss dazu zu geben, ob eine Abkühlung des Gebäudes ohne Einsatz von Klimaanlage noch möglich ist oder nicht. Dafür werden Simulationen in *IDA ICE* durchgeführt, in denen die Parameter variiert und die Endresultate betrachtet werden. Dabei werden wirtschaftliche Betrachtungen nicht näher analysiert. Es wird jedoch darauf geachtet, ob die Vorschläge in der Praxis umsetzbar sind oder nicht.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel wird der Klimawandel näher erläutert und zudem erklärt, welche Klimaszenarien relevant für die Zukunft sind und welche Teilaspekte eine wesentliche Rolle spielen. Außerdem wird auf die Einflussgrößen für die sommerliche Überhitzung eingegangen und passive Sonnenschutzmaßnahmen beschrieben.

3.1 Begriff Klimawandel

Seit der Erdgeschichte sind Veränderungen der Temperatur über große Zeitspannen keine außergewöhnlichen Ereignisse. Ungewöhnlich ist aber, dass jetzt ein rasanter Temperaturanstieg in einem vergleichbaren kurzen Zeitraum stattfindet, was in der Vergangenheit in dieser Form nicht beobachtet werden konnte. Im Vergleich zur globalen Oberflächentemperatur vor der industriellen Zeit, zeigen diverse Untersuchungen, dass dieser Wert im Jahr 2030 mit großer Wahrscheinlichkeit um 1.5 °C höher liegen wird. Ersichtlich werden diese Erkenntnisse aus den Emissionsszenarien *SSP1-1.9* bis *SSP3-7.0*, wobei das Szenario *SSP5-8.5* zum Ergebnis kommt, dass dieser Fall bereits früher eintreten wird [49]. Genauer erläutert werden die unterschiedlichen Klimaszenarien im Kapitel 3.4, da die Wahl eines bestimmten Klimaszenarios für die Betrachtung der Auswirkungen auf die sommerliche Überhitzung von großer Relevanz für diese Arbeit ist.

Wesentlich beteiligt am Klimawandel sind die *anthropogenen Treibhausgasemissionen*. Zu den Treibhausgasen gehören laut dem Kyoto-Protokoll von 1997: Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid oder auch Distickstoffmonoxid (N₂O), halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW), Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid SF₆ [50].

Treibhausgase sind für das Leben auf der Erde notwendig, jedoch gibt es aufgrund der aktuell sehr hohen Konzentration in der Atmosphäre negative Auswirkungen. Zudem entspricht der erste Hauptsatz oder auch der Energieerhaltungssatz der Thermodynamik dem Phänomen des Treibhauseffektes. Dieser besagt, dass Energie in andere Energieformen umwandelbar ist, jedoch Energie nicht gebildet oder vernichtet werden kann [51]. Die Strahlungsenergie der Sonne trifft auf den Erdboden und wird in Form von Wärme abgegeben, wodurch sich die Temperatur erhöht [52]. Kurzwellige UV-Strahlen passieren die Atmosphäre ungehindert. Sobald diese auf die Erdoberfläche trifft, werden Teile der Strahlung reflektiert. Diese langwelligen Strahlen können die Atmosphäre nicht durchdringen und werden auf die Erde reflektiert. Dies führt zum sogenannten *Treibhauseffekt*, aufgrund dessen im Mittel die globale Temperatur 15 °C beträgt. Ohne diesen Effekt liegt die Temperatur mit Betrachtung des *Stefan-Boltzmann-Gesetz* und der Annahme des perfekten „*schwarzen Körpers*“ nach dem *Planck-*

Spektrums bei $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, wodurch die Erde wesentlich anders aussehen würde [52]. Die circa -20° Grad kommen dadurch zustande, da dies der Abgabe der thermischen Strahlungsenergie von $235\text{ Watt pro Quadratmeter}$ in den Weltraum entspricht. Ein geringer Teil mit $67\text{ Watt pro Quadratmeter}$ der Sonnenstrahlung wird vom vorliegenden Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid absorbiert und die Wärmestrahlung, die selbst abgegeben wird, erwärmt somit die mittlere Temperatur um 35 Kelvin auf circa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die Energiebilanz langfristig ausgeglichen sein muss. So ergibt die Summe die reflektierte Strahlung mit 107 W/m^2 und die langwellige Strahlung mit 235 W/m^2 eine Gesamtsonnenstrahlung von 342 W/m^2 . Die abgeführte Wärme mit 78 W/m^2 und die 24 W/m^2 der thermischen Strahlung entstehen aufgrund des zu warmen Erdbodens und sind für den menschlichen Körper als latente Wärme spürbar. Beim oben beschriebenen Vorgang der Erwärmung von $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ mittlerer Temperatur auf $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ handelt es sich um den *natürlichen Treibhauseffekt* [52].

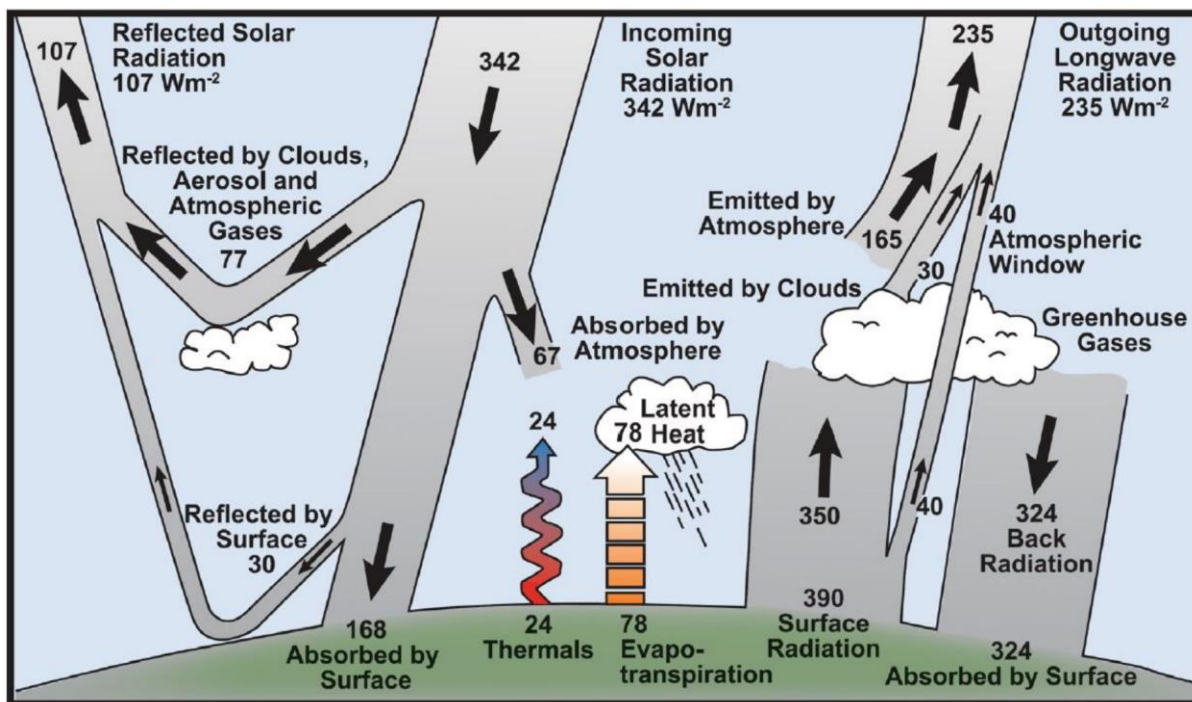


Abbildung 5: Darstellung der globalen Wärmeströme der Erde [53]

Problematisch für das Klima ist der vom Menschen beeinflusste *anthropogene Treibhauseffekt*, der aufgrund der Änderung der Konzentration des Kohlendioxidgehalt in unserer Atmosphäre auftritt. Besonderen Einfluss haben dabei die drei Treibhausgase Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4 und Distickstoffoxid N_2O , da sie als langlebig gelten [54]. Zu den kurzlebigen Treibhausgasen gehört der Wasserdampf, der für zwei Drittel des natürlichen Treibhauseffektes verantwortlich ist, wobei aufgrund des ständigen Kreislaufes des Niederschlages sich der Effekt ständig verändern kann [55]. Der anthropogene Treibhauseffekt entspricht der Differenz zum herkömmlichen natürlichen Treibhauseffekt. Auffallend ist, dass es in der Strato- und

Mesosphäre zu einer Abkühlung kommt, während der Treibhauseffekt in unserer Atmosphäre ein Ungleichgewicht zur Folge haben kann [54].

Unschlüssig ist die Wissenschaft bei der Bestätigung des Zusammenhanges zwischen CO₂-Konzentration und dem Anstieg der globalen Temperatur. Arrhenius, ein schwedischer Physiker, kam zum Ergebnis, dass sich die Erdoberflächentemperatur bei Verdopplung des Kohlendioxidgehaltes und der daraus resultierenden zusätzlichen Wärmestrahlung um 6°C erhöht [54]. Das IPCC beschreibt den Zusammenhang beider Parameter jedoch als logarithmisch. Dieses Erkenntnis geht aus dem Prinzip der *Klimasensitivität* hervor. Unter diesem Begriff ist zu verstehen, wie die globale gemittelte Temperatur ansteigt, wenn die CO₂-Konzentration in unserer Atmosphäre sich verdoppelt. Allerdings sind dabei Gegen- oder Rückkopplungseffekte nicht berücksichtigt. Demnach würde es laut den Analysen des IPCC bei einer Verdopplung der Konzentration zu einem Anstieg von einem Kelvin führen und bei einer Vervielfachung eine Erhöhung von 2 °C ergeben [52]. Im Jahr 2019 wurden weltweit 33,3 Gigatonnen CO₂ verursacht, wobei dieser Wert verglichen zum Jahr 1990 um 65 Prozent größer ist [56]. Betrachtet man sämtliche Treibhausgasemissionen, sind es im Jahr 2019 49.76 Milliarden Tonnen CO₂-Äqui. was einen Anstieg um 61 Prozent gegenüber 1990 bedeutet [57].

3.1.1 Treibhausgas-Konzentration

Der Gehalt der Kohlendioxid-Konzentration hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung unseres zukünftigen Klimas. Betrachtet man die zwei größten Treibhausgasanteile entfallen 66.4 Prozent auf Kohlendioxid, gefolgt von Methan mit 16.3 Prozent. Abbildung 6 veranschaulicht die Entwicklung über die letzten Jahre und zeigt, dass im Vergleich zu 1957 die Konzentration um 100 ppm höher liegt und im Jahr 2022 einen Wert von 421 ppm aufweist. PPM ist die Abkürzung für *parts per million* und bedeutet, dass in trockener Luft auf eine Million Moleküle 421 CO₂- Moleküle vorliegen [58]. Laut dem Weltklimarat IPCC ist bei Erreichung der 450 ppm – Marke eine globale Temperaturerhöhung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr zu vermeiden [59]. In Summe betrachtet verursachen sämtliche Treibhausgase weltweit 2021 508 µmol/mol Kohlendioxid-Äquivalente. Für die Erzielung der Pariser Klimaziele müssen bis 2050 die weltweiten Gesamtemissionen im Vergleich zu 2010 zwischen 40 und 70 Prozent reduziert werden [60].

Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittelwerte)

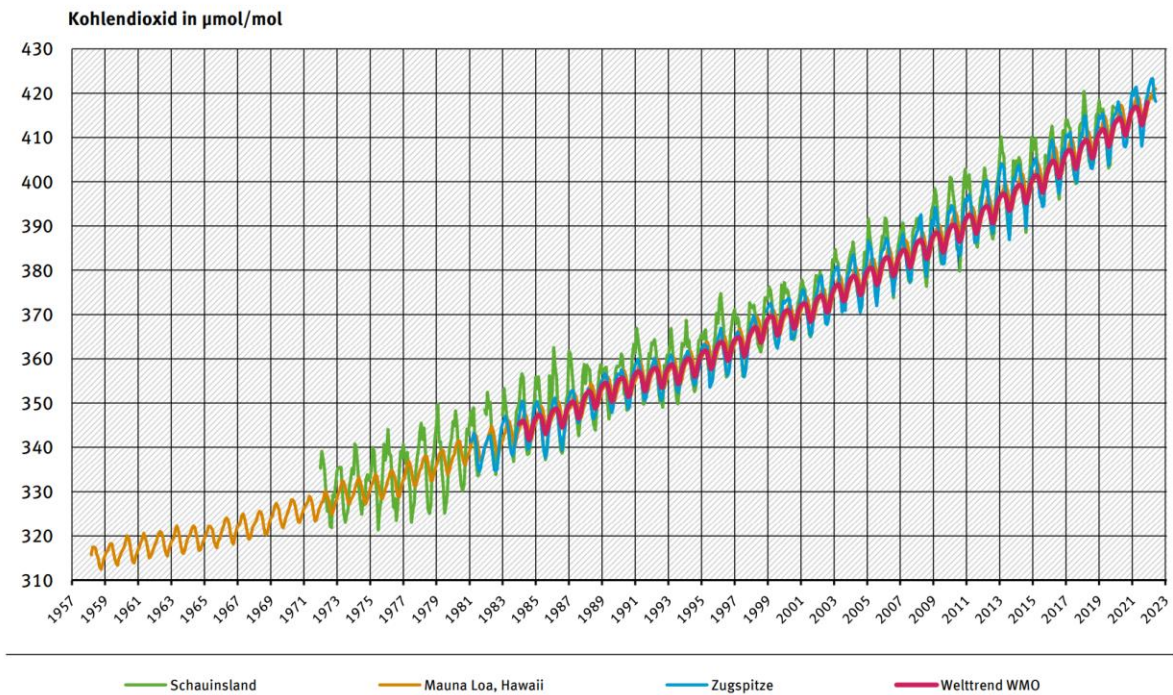


Abbildung 6: Entwicklung der CO₂-Konzentration von 1957 bis 2023 mittels Monatsmittelwerte [60]

Anhand der von NOAA zur Verfügung stehenden Datensätze ergibt sich ein Anstieg von neun Prozent zwischen 1979 und 2000 und im selben Zeitraum von 2001 bis 2022 eine Erhöhung der Konzentration um 12,5 Prozent [61]. Ausgedrückt in Tonnen CO₂-äqui. bedeutet dies ein Wachstum von sieben Gigatonnen pro Jahr zwischen 1979 und 2000 im Vergleich zu zehn Gigatonnen von 2000 bis 2010 [59]. Infolgedessen sind nach dem Welttrend WMO die Lachgaskonzentration zwischen 2001 bis 2022 um sechs Prozent gestiegen und die Methankonzentration um neun Prozent. Relevant sind diese Anstiege deshalb, da Methan Wärme viel effektiver absorbiert und den Effekt damit verstärkt [58]. Zurückzuführen ist das darauf, dass die Verweildauer von Methan auf 100 Jahre betrachtet, einen *Global Warming Potential (GWP)* Wert von 27 bis 30 aufweist. Somit beeinflusst Methan das Klima bei gleicher Emissionsmenge wesentlich stärker als CO₂. Berücksichtigt werden zudem indirekte Effekte wie zum Beispiel, dass Methan ein Vorläufer von Ozon O₃ ist, wobei es sich wiederum um ein Treibhausgas handelt [62].

Die ausgewählten Standorte im Diagramm sind deshalb repräsentativ, da sie hoch gelegen sind, häufig unter der freien Troposphäre liegen und sich weit entfernt von lokalen Emissionsquellen befinden [60].

3.2 Mikroklima

Per Definition lässt sich der Begriff *Mikroklima* mit zwei unterschiedlichen Varianten beschreiben. Eine Möglichkeit ist die klimatischen Bedingungen in Bodennähe bis zu zwei Metern Höhe zu betrachten. Andererseits umschreibt er einen definierten kleineren Bereich [63]. Einen bedeutsamen Einfluss auf das Mikroklima haben die örtlichen Gegebenheiten. Dabei ist entscheidend, welche Bodenbeschaffenheiten vorliegen, wie die vorherrschenden Wind- und Lichtverhältnisse und noch andere wichtige Faktoren sind. Zu diesen zählen unter anderem Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Sonnenstrahlung, Strahlungswirkung von unterschiedlichen Materialien und die Temperatur [64]. Zudem können Menschen einen hohen Effekt auf die Ausprägung des Mikroklimas haben. Auch verschiedene Baumaterialien, Gebäude oder Eingriffe in die Natur beeinflussen das Mikroklima negativ. Was andererseits Potential bietet diesen Effekt zu Nutze zu machen [63]. Vermehrte Grünflächen anstelle von versiegelten Flächen bieten die Möglichkeit angenehmere Temperaturen zu erreichen und zusätzlich von Verschattung zu profitieren [65]. Der Anstieg der Temperatur wird speziell in Ballungsräumen verstärkt und beeinflusst dementsprechend auch Wohngebäude in höherem Ausmaße. In der Wissenschaft ist das Phänomen von erhöhten Temperaturen im städtischen Bereich besser bekannt als *Urban Heat Island UHI*, welche die Hitzebelastung maßgeblich beeinflussen. Begünstigt wird dieser Effekt im städtischen Bereich aufgrund der hohen Dichte an versiegelter Fläche, der Wärmespeicher durch eine höhere Anzahl an Gebäuden und der dadurch wesentlich größeren freigesetzten Wärmemengen von anthropogenen Prozessen. Betrachtungen der Wärmebelastung in einem Zeitraum von 30 Jahren in Wien zeigten einen Zusammenhang zwischen der Urbanisierung der Stadt und der klimatischen Veränderungen.

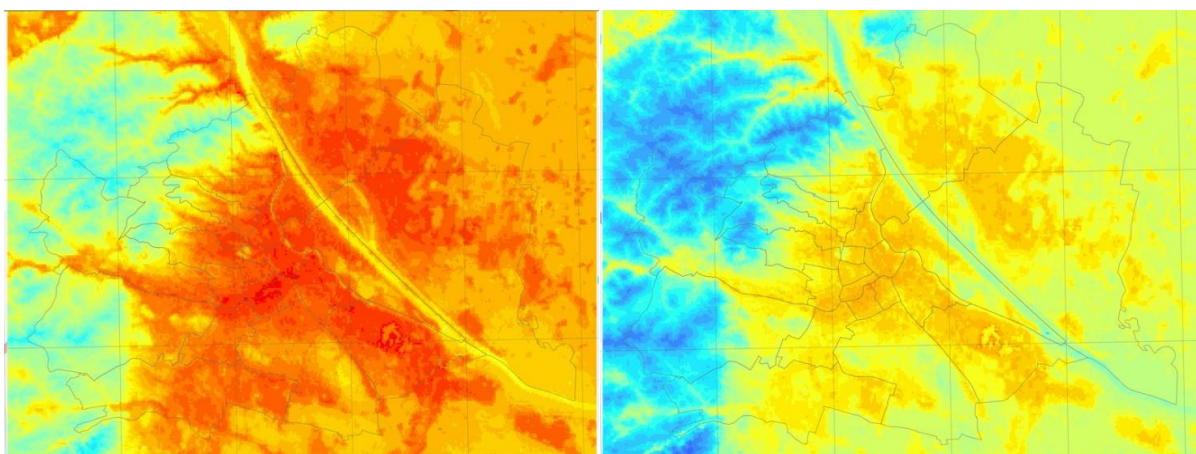


Abbildung 7: Prognose für die zukünftige Wärmebelastung in Wien (links *RCP8.5* und rechts *RCP4.5*) [66]

Anhand der beiden Veranschaulichungen wird die Problematik für das Bilden von städtischen Wärmeinseln ersichtlich. Dabei handelt es sich um Vorhersagen für Wien, mit Hilfe von dynamischen Städtmodellen. Diese werden mittels Simulationen von atmosphärischen Oberflächenprozessen, lokalspezifischer Gegebenheiten und Informationen zum vorliegenden Raum erstellt. Auffallend sind bei Betrachtung der Abbildungen die unterschiedlichen Entwicklungen für die Hitzebelastungen im Raum Wien in den Szenarien *RCP8.5* und *RCP4.5*. Simulierte Modelle rechnen im Mittel mit einem Anstieg von 20 bis 50 Sommertagen für europäische Städte im Vergleich zum Zeitraum zwischen 1971 und dem Jahr 2000 [66]. Daraus resultiert, dass dies auch Auswirkungen auf die Temperaturen in der Nacht hat, die im Regelfall die Option der Nachtlüftung negativ beeinflussen. Dies geht aus Messungen aus dem Jahr 2019 hervor, bei denen die Tagestemperaturen in der Innenstand durchschnittlich um 0.6 °C höher ausfielen als am Stadtrand. Außerdem waren rund 25 Prozent der Nächte 4 bis 7 °C heißer als im außenliegenden Gebiet [67].

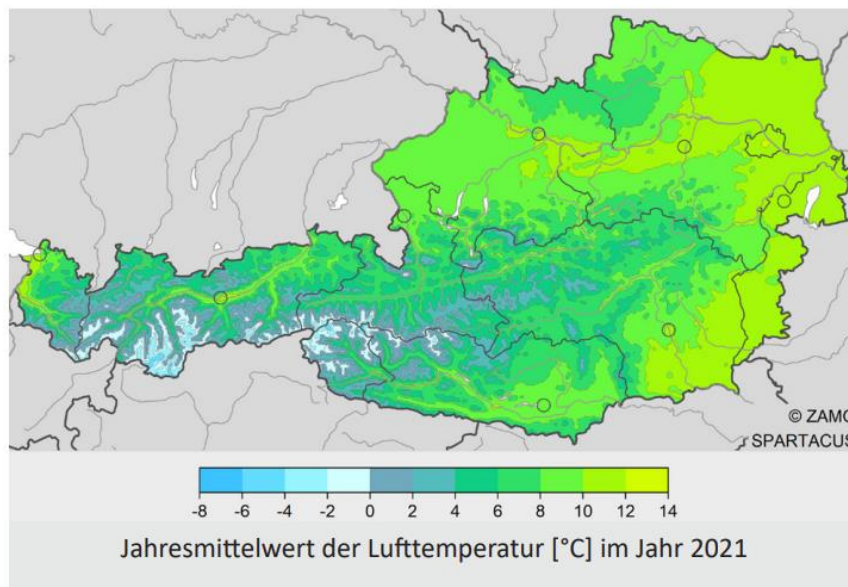


Abbildung 8: Lufttemperaturen in Österreich im Jahr 2021 [68]

In Abbildung 8 ist dargestellt, welchen Einfluss das Mikroklima auf die Lufttemperatur haben kann. Die Kreise auf der Karte bilden dabei die Hauptstädte der jeweiligen Bundesländer Österreichs ab. Ersichtlich ist, dass speziell in diesen und umliegenden Regionen erhöhte Temperaturen vorzufinden sind. Zudem besteht ein Grund zur Annahme, dass die Bevölkerungsrate einen Einfluss auf die Entwicklung von Hitzeexpositionen hat. Die Hitzeexposition beschreibt den Umstand einer Person, die einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt ist. Dabei nimmt der Körper mehr Hitze auf, als er an die Umgebung abgeben kann. Zur Einordnung des Einflusses von Hitzeexpositionen definiert die *International Standards Organization*

ISO den Grenzwert $WBGT_{max} > 30$. Dieser Faktor ist ein häufig angewendeter Messwert, um die biophysikalische Reaktion eines Menschen auf die heißen Temperatur-Feuchtigkeitskombination mit der Möglichkeit von hitzebedingten Krankheiten oder Todesfällen zu beurteilen [17].

Allerdings bedarf es für die obenerwähnte Annahme einer Differenzierung der Betrachtung zwischen der demographischen Entwicklung eines Gebietes und dem Verlauf von Erwärmungssignalen. Erkennbar wird diese Beobachtung anhand des Beispiels zwischen Dehli und Kalkutta in Indien. Beide Metropolen verfügen über einen fast identischen Verlauf der Exposition, allerdings trug die Wachstumsrate für die Bevölkerung in Delhi zu 75 Prozent zur Entwicklung bei, während dies in Kalkutta nur 48 Prozent waren. Grund dafür können unterschiedlichste Einflüsse sein, jedoch bedarf es einer viel detaillierteren Auflösung von räumlichen-zeitlichen Messungen, um eine eindeutige Aussage treffen zu können [69].

Zwar gibt es keine deutlichen Hinweise oder Untersuchungen, die zeigen, dass im Gebiet Österreich ein Zusammenhang zwischen Bevölkerungsdichte und Zunahme der Hitzebelastung besteht, jedoch sind die erhöhten Temperaturen in diesen Gebieten auffällig.

Betrachtet man das erhöhte Aufkommen von Menschen im Rheintal, Inntal oder in Wien, unterscheiden sich die Farbstrukturen auf der Darstellung wesentlich vom restlichen Gebiet. Zudem ist die Jahresmitteltemperatur im Osten Österreichs mit einer größeren Bevölkerungsdichte um einige Grad Celsius höher, wobei es sich hierbei auch um unterschiedliche Einflüsse auf das Klima in dieser Region handeln kann.

Die extremere Hitzeexposition in städtischen Gebieten hat nicht nur gesundheitliche Folgen, sondern erhöht zudem die Sterblichkeitsrate. Die Sterblichkeit von Menschen erhöht sich um 0.45 Todesfälle pro 100.000 Menschen, für jeden Tag an dem weltweit eine Maximaltemperatur von 35 °C anstelle von 20 °C erreicht werden. Außerdem erhöht sich zusätzlich die Rate um weitere 4.7 Menschen für Personen über 64 Jahre [69].

3.3 Außentemperatur

Dem *ÖKS15-Bericht* sind wichtige Erkenntnisse bezüglich des Anstieges der Außentemperatur zu entnehmen. So entwickelte sich während der Frühlingszeit die Temperatur um 1.1 °C nach oben, wobei im Osten ein kontinuierlicher Anstieg verzeichnet wurde, während dieser sich im Westen Österreichs erst die letzten Jahre verstärkt hat. Ein anderes Bild zeigt sich während des Sommers, da dort eine gleichmäßige Erwärmung von 1.3 °C in den letzten 25 Jahren österreichweit vorliegt. In den Berg- und Hügelregionen findet über die Herbstperiode

eine geringere Erwärmung statt als in den anderen Gebieten. Jedoch verläuft tendenziell der Temperaturanstieg in diesem Zeitraum mit 0.4 °C milder an.

Während der Winterzeit erhöhte sich die Temperatur in der Alpenregion schneller. Angenommen wird, dass dies aufgrund der warmen Luftzufuhr des Mittelmeerraums zurückzuführen ist [42]. Beobachtet wurden die Klimaszenarien *RCP 4.5* und *RCP 8.5* für die nahe Zukunft zwischen 2021 bis 2050 und für die ferne Zukunft zwischen 2071 bis 2100. Auffällig ist, dass für die nahe Zukunft zwischen 2021 und 2050 die Änderungsrate der mittleren Lufttemperatur mit 1.3° Celsius für das erste Szenario und mit 1.4 °C für das zweite Szenario nur gering abweicht. Allerdings ändert sich diese Annahmen bei Betrachtung der fernen Zukunft. Im Median liegt der Temperaturanstieg beim Pfad 4.5 um 2.3 °C, während dieser Wert bei 4 °C im Szenario *RCP 8.5* liegt [42]. Das Jahr 2021 verzeichnete österreichweit betrachtet eine mittlere Temperatur von 7.3 °C und weist somit eine Abweichung von 1.2 °C im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 auf. Zudem ist die Anzahl der Sonnenstunden im Vergleich zu 2021 um 11 Prozent höher [70].

Mit den erhöhten Temperaturen ist auch die Menge an Hitzeperioden über die Jahre in Österreich gestiegen. Als Hitzeperiode definiert man eine Dauer von mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen, bei denen eine Lufttemperatur von 30 °C erreicht wird und diese gemittelt über die drei Tage als Maximumtemperatur erzielt wird. So verzeichnet das *Climate Change Centre Austria (CCCA)* Messaufzeichnungen, dass im Jahre 2021 18 Hitzetage unter 500 Höhenmeter erzielt wurden und diese in einer Höhe zwischen 500 und 1000 Höhenmeter auf fünf gesunken sind. Über 1000 Meter Seehöhe wurden keine Werte über 30° Grad gemessen. Außerdem wurden in den niedergelegenen Regionen 19 Hitzeperioden erreicht, welche sich bei Gebieten bis 1000 Metern auf drei reduziert haben [68]. Das erklärt die hohe Anzahl an heißen Tagen in Wien, sie in der Tabelle 1 beschrieben sind [42]. Im österreichischen Mittel werden in diesem Bericht bis zum Jahre 2100 17.4 Hitzetage bei Null-Klimaschutzpolitik verzeichnet werden, während mit Maßnahmen dieser Wert auf sieben reduziert werden kann. Es ist davon auszugehen, dass die schwierigste Entwicklung insbesondere im Alpenvor-, Hügel- und dem Klagenfurter Becken zu erwarten ist [71].

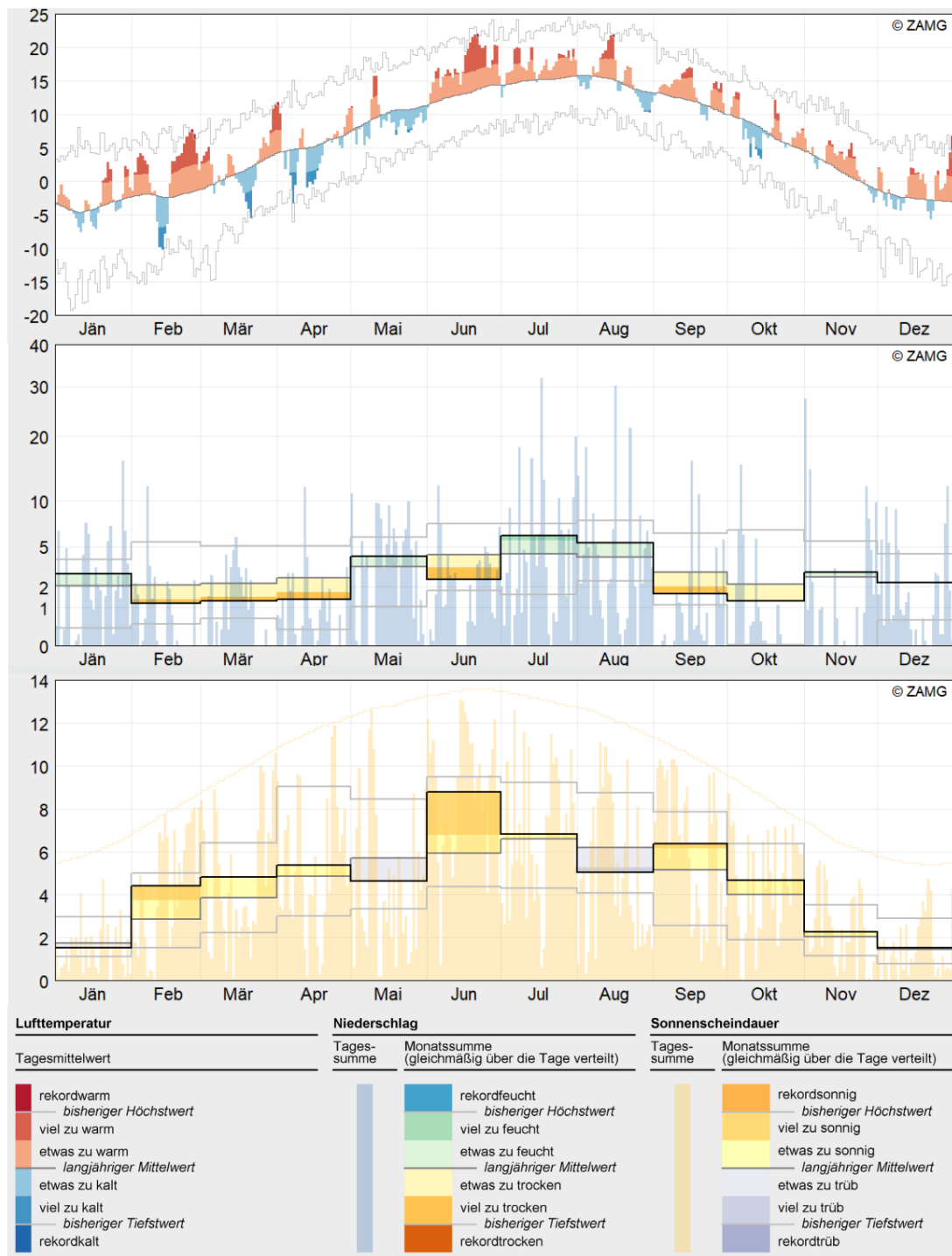


Abbildung 9: Jahresverlauf der Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenstunden in Österreich 2021 [70]

Erkennbar ist, dass die Lufttemperaturkurve verhältnismäßig viele Aufzeichnungswerte im viel zu warmen Bereich aufweist. Allerdings ist ersichtlich, dass die Fläche im weiß gekennzeichneten Teil wesentlich größer ist und somit schon andere Spitzentemperaturen erreicht hat. Nichtsdestotrotz sind vereinzelt Rekordwerte in den Monaten Februar, März, Juni, August und Dezember aufgestellt worden. Besorgniserregend sind die Temperaturwerte im Dezember, da

dort über einen längeren Zeitraum enorme Spitzen erzielt wurden. Die Jahresmitteltemperaturerhöhung würde deutlich höher liegen, wenn nicht Mitte Februar, Mitte April, der Mai und teilweise einige Abschnitte im Herbst nicht so milde verlaufen wären und deutlich unter der Normaltemperatur lagen. Beobachtungen der *GeoSphere Austria* zeigen die größte Abweichung während der saisonalen Erwärmung besonders in der Herbstzeit, mit Werten zwischen + 0.4 °C in Gipfelregionen und mit + 0.8 °C im Tiefland [72].

In den Monaten, bei denen eine erhöhte Temperatur vorliegt, ist auch zu gewissen Teilen ein größeres Defizit an Niederschlag zu erkennen, wobei dies zum Beispiel im Juli und August nichtzutreffend ist. Die Anzahl der Sonnenstunden sind besonders in den auffällig erwärmten Monaten Februar und Juni nahe an den Rekordwerten. Zudem ist erkennbar, dass die Sonnenstunden in den Monaten, wo eine erhöhte Temperatur verzeichnet wurde, höher liegen als die zu erwartenden Werte. Allerdings ist im Rekordmonat Dezember nicht rückzuschließen, dass die erhöhte Temperatur mit den Sonnenstunden im Zusammenhang steht. Besonders milde Verläufe sind in den Monaten Mai und August erkennbar [70].

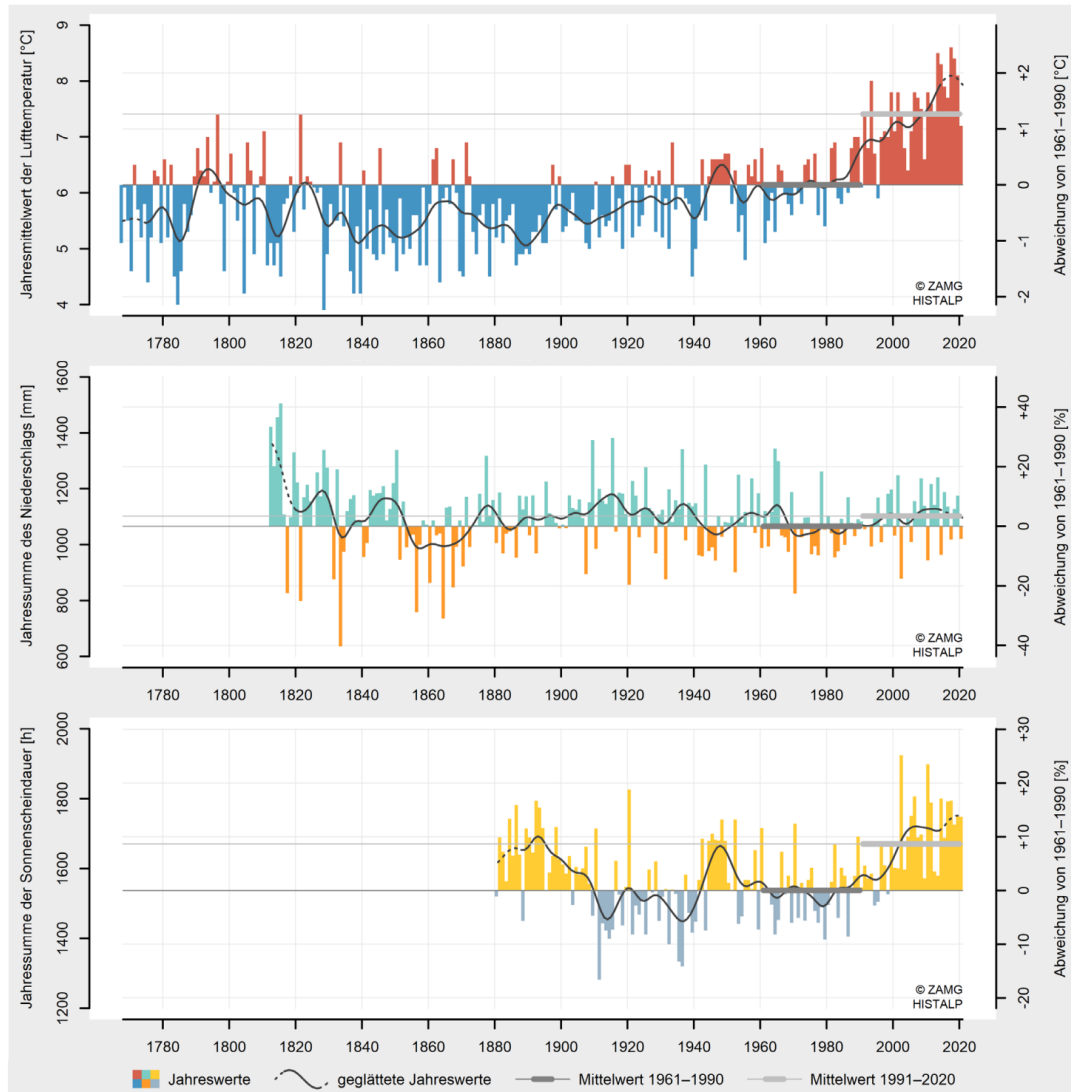


Abbildung 10: Entwicklung der Luftmitteltemperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauern [70]

Die Jahresmittelwertkurve verläuft bei der Lufttemperatur bis zum Jahre 1940 bis auf zwei Ausnahmen unter der Abweichungskennlinie. Mehr als die Hälfte der Temperaturjahresaufzeichnungen befinden sich somit zwischen 4 und 6 °C im Mittel. Eine signifikante Steigerung ist ab den 1970er Jahren zu erkennen mit wenigen Ausnahmen wie im Jahre 2008 aufgrund der Weltwirtschaftskrise oder 2020 aufgrund der Coronapandemie. Ein Trend der ersichtlich ist, dass insgesamt die Sonnenscheindauer in den letzten Jahren zugenommen hat, wobei keine Indizien erkennbar sind, ob diese mit einem Anstieg der Temperatur im Zusammenhang stehen. Essenziell für diese Arbeit ist der Aspekt, dass in den letzten 40 Jahren der Temperaturanstieg in Österreich doppelt so schnell verlaufen ist, wie die Temperaturerhöhung in den restlichen globalen Regionen. Grund dafür ist, dass sich im Zentrum eines Kontinents die Luft schneller erwärmt als in den trägen thermischen Regionen in der Nähe der Ozeane [70].

Daher ist diese Untersuchung der sommerlichen Überhitzung für die Zukunft in der Alpenregion relevant, da sich in Anbetracht der Luftzirkulation dieser Effekt dort stärker auswirkt. Dies zeigt auch der neueste Bericht der *Geosphere Austria*, dem *Deutschen Wetterdienst* und der *Meteo Schweiz*, die in den Jahren 2022 und Anfang 2023 eine Niederschlagsarmut und damit einhergehend einen Schneemangel in den Zentral- und Ostalpen festgestellt werden konnte. Der Zeitraum zwischen Dezember 2022 und Januar 2023 war der wärmste Winterabschnitt seit Messbeginn und es wurden am Neujahrstag 22 Messrekorde an mehreren Wetterstationen erzielt [73].

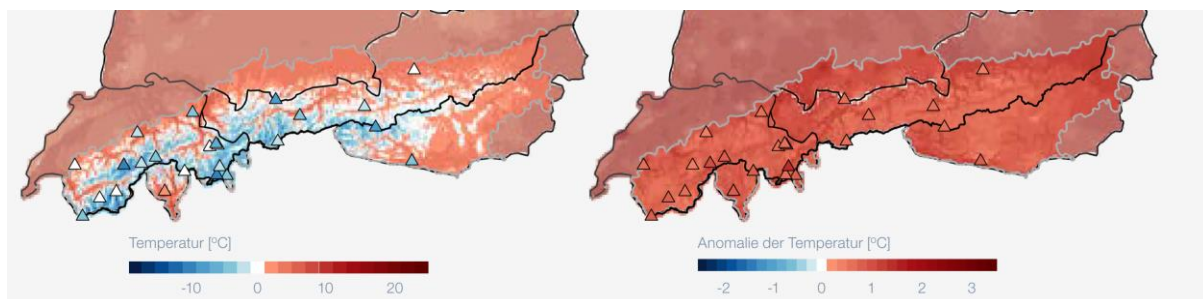


Abbildung 11: Mittlere Lufttemperatur in der Alpenregion im Winterhalbjahr 2022/23 [73]

In Abbildung 11 ist erkennbar, dass flächendeckend über die gesamte Alpenregion erhöhte Temperaturen aufgetreten sind. Zwar variieren die vorliegenden Temperaturen in den jeweiligen Regionen, jedoch sind die Anomalien gegenüber der Vergangenheit in etwa gleich groß. Die Prognosen, die eine Erhöhung von ein bis zwei Grad Celsius vorhersagen, entsprechen der Meinung von Experten aufgrund von Studien im Alpenraum. Die Vorhersage für die nordwestliche Alpenregion schneidet in Bezug auf die Anzahl der Hitze- und Sommertage, je nach Entwicklung der Treibhausgasemissionen, tendenziell schlechter ab als die nordöstlichen oder südlichen Alpen [74].

3.4 Klimaszenarien

Aufgrund der Ungewissheit, wie sich die CO₂-Konzentration, der Einfluss des Wasserdampfs und andere wichtige Kenngrößen entwickeln werden, ist es schwer zu beziffern, wie hoch der Temperaturanstieg schlussendlich sein wird. Daher hat der *Intergovernmental Panel on climate Change* vier unterschiedliche Pfade beziehungsweise Szenarien definiert, die sie mit einer hohen Eintreffwahrscheinlichkeit bewerten. Diese *repräsentativen Konzentrationspfade*, besser bekannt als *RCP*, lauten *RCP2.6*, *RCP4.5*, *RCP6.0* und *RCP8.5*. Unterschieden werden sie aufgrund von verschiedenen Strahlungsantriebe, welche sich in der Benennung widerspiegeln. Strahlungsantriebe beschreiben dabei die Zunahme an langwelliger Strahlung aufgrund des Wachstums von anthropogenen Treibhausgasen gegenüber der vorindustriellen

Zeit. Bei den Ziffern handelt es sich um den zusätzlichen Strahlungsantrieb, wie im Beispiel oben 2.6 Watt pro Quadratmeter beschrieben [75]. Da die RCP- Szenarien keine sozioökonomischen Begründungen vorwiesen, wurden diese im Rahmen des IPCC – Berichts von 2021 nachgeholt und sind dort unter der Bezeichnung SSP vorhanden. SSP bedeutet Shared Socioeconomic Pathways und berücksichtigt neben den RCP- Szenarien zusätzlich die gemeinsamen sozioökonomischen Aspekte. Je nach politischer Entscheidung können unterschiedliche Prägnanzen im Laufe der Zeit entstehen [76]. Im Zuge der Veröffentlichung der neuen Szenarien wurden somit die fünf Entwicklungspfade ergänzt [75]. Daher definieren die RCP-Szenarien die möglichen Konzentrationspfade für das Klima in der Zukunft, während die SSP-Szenarien sich mit den sozioökonomischen Entwicklungen beschäftigen. Selbstverständlich können auch mehrere SSP-Pfade in einem RCP- Szenario zusammengefasst werden und auch umgekehrt. Werden die beiden Gegebenheiten miteinander vereint, ergeben sie damit einen gemeinsamen Modellansatz, wobei bei der Nomenklatur *SSPX-Y* das X für das SSP-Modell steht und das Y die *RCP*- Methode definiert [77]. Die Abbildung 12 ermöglicht eine gute Übersicht über die fünf unterschiedlichen sozioökonomischen Pfade. Der Bereich im Vordergrund repräsentiert den globalen Temperaturverlauf weltweit bis zum Jahre 2020, wobei ab diesem Zeitpunkt die Szenarien in Kraft getreten sind. Dabei wird ersichtlich, dass mit verschiedenartigen Ansätzen unterschiedliche Temperaturprognosen erzielt werden.

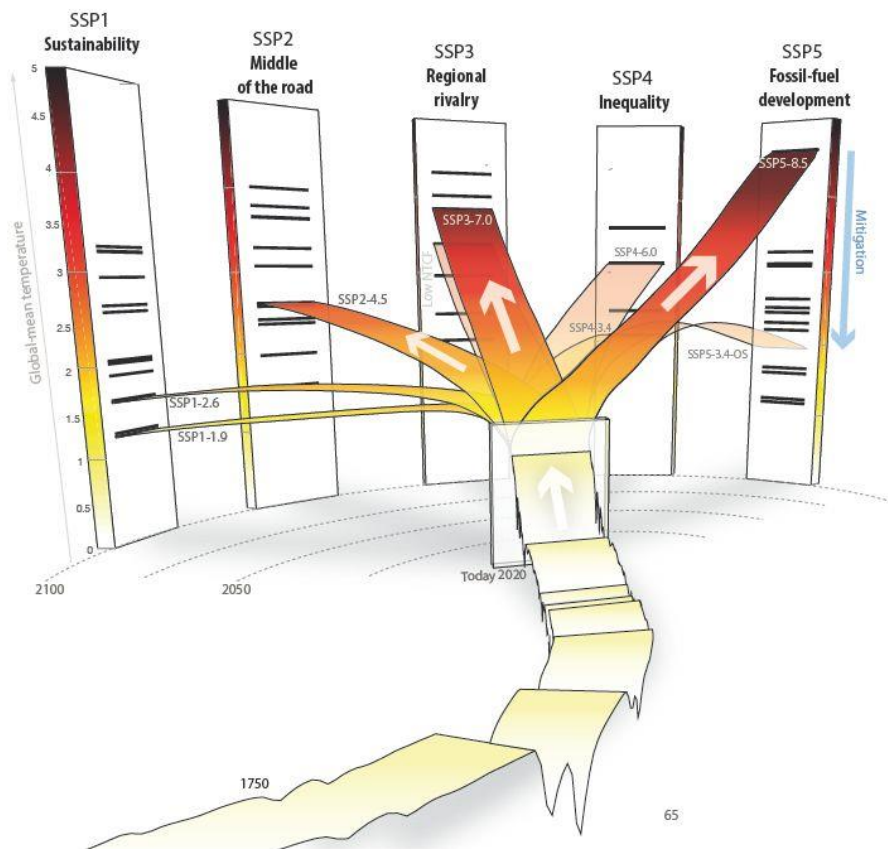


Abbildung 12: Darstellung der unterschiedlichen sozioökonomischen Pfade [75]

Unabhängig vom Szenario steigt die globale mittlere Oberflächentemperatur zwischen 1.6 und 2.4 °C bis zum Jahr 2050 an. Nur mit der Strategie nach SSP1-1.9 kann gegen Ende des Jahrhunderts eine Temperaturreduktion auf 1.4 °C erzielt werden. Mit der Umsetzung des SSP5-8.5 ist mit einem Anstieg bis zu 4.4 °C zu rechnen [49].

3.4.1 SSP-Szenarien

In diesem Unterkapitel wird auf die unterschiedlichen Sozioökonomischen- und Konzentrationspfade eingegangen, um einen Überblick zu erhalten und die jeweiligen zukünftigen Entwicklungen aufzuzeigen. Zudem wird erläutert, welche zwei Szenarien für diese Arbeit von Relevanz sind und weshalb sie ausgewählt wurden.

- SSP1-1.9

Der SSP1-1.9 Pfad ist das Szenario, welches dem Pariser Abkommen mit dem 1.5 Grad Ziel übereinstimmt. Dabei wird ein geringerer Energie- und Ressourcenverbrauch vorausgesetzt. Zudem wird der Einsatz von erneuerbaren Energiequellen forciert und es erfolgt eine starke Emissionsreduktion bis 2030. Bis zum Ende des Jahrhunderts sollen keine anthropogenen Treibhausgasemissionen mehr verursacht werden. Ermöglichen soll dieses Vorhaben die aktive Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre und damit ein Rückgang der Treibhausgaskonzentration. Um die Gegebenheiten global auszugleichen, müssen abgestimmte Mechanismen ineinandergreifen und einen funktionierenden Apparat schaffen. [77]

- SSP1-2.6

Dieser Pfad ermöglicht, mit aktivem Klimaschutz die globale Erwärmung um zwei Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit zu erreichen. Ähnlich wie beim 1.9 Pfad steht der Einsatz erneuerbare Energiequellen und ein bewusster Umgang mit Ressourcen und Energie im Fokus. Er beinhaltet dieselben Absichten bezüglich der anthropogenen Emissionen gegen Ende des Jahrhunderts, um unter den 2 Grad Celsius zu bleiben, allerdings unterstützt durch natürliche und sozioökonomische Wege. Dafür werden die vorgesehenen Mechanismen speziell im globalen Süden angewendet [77].

- SSP2-4.5

Mit diesem Szenario wird der Mittelweg zwischen Best- und Worstcase definiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die bisherige Entwicklung zukünftig fortsetzen wird. Es wird davon ausgegangen, dass es gegen Ende des Jahrhunderts zu einer geringen Bevölkerungsabflachung kommt und weiterhin fossile Energieträger zum Einsatz kommen. Demnach wird 2040

der Peak an ausgestoßenen Emissionen erreicht werden und einige Destinationen Umweltschäden zu befürchten haben [77].

- SSP3-7.0

Für diesen Weg wird von einer Dysbalance zwischen den einzelnen Staaten ausgegangen. Dabei werden soziale Ungleichheiten zunehmen und das Ökosystem erlebt in einigen Regionen starke Schäden. Es wird primär ökonomisch gedacht und keine Rücksicht auf ökologische Aspekte gelegt und fossile Ressourcen kontinuierlich verwendet. Es werden kaum noch Anpassungen an das Klima durchgeführt und die Auswirkungen auf das Klima sind wesentlich spürbar [77].

- SSP5-8.5

Diese Prognosen für die Zukunft beruhen darauf, dass hauptsächlich auf nicht erneuerbare Energiequellen gesetzt werden, da diese sich um einiges wirtschaftlicher sind. Somit wächst neben dem Konsum und auch die Wirtschaft, wobei ein hoher Energiebedarf zu erwarten ist. Die Treibhausgaskonzentration steigt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts an und führt zu starken klimatischen Veränderungen. Aufgrund dessen erhalten die am stärksten betroffenen Nationen Zahlungen, um Gegenmaßnahmen durchführen und den Schaden abdämpfen zu können [77].

3.4.2 RCP-Szenarien

Dieser Ansatz beschreibt die Erfüllung der Pariser Klimaabkommens und damit die Minimierung des Anstieges der globalen Oberflächentemperatur um 1.5 °C. Eine Verdopplung aus der vorindustriellen Zeit mit 280 ppm auf 560 ppm würde einen Strahlungsantrieb von 3.7 Watt pro Quadratmeter bedeuten. Für die Erreichung dieses Szenarios müssten die verursachten Emissionen drastisch reduziert werden.

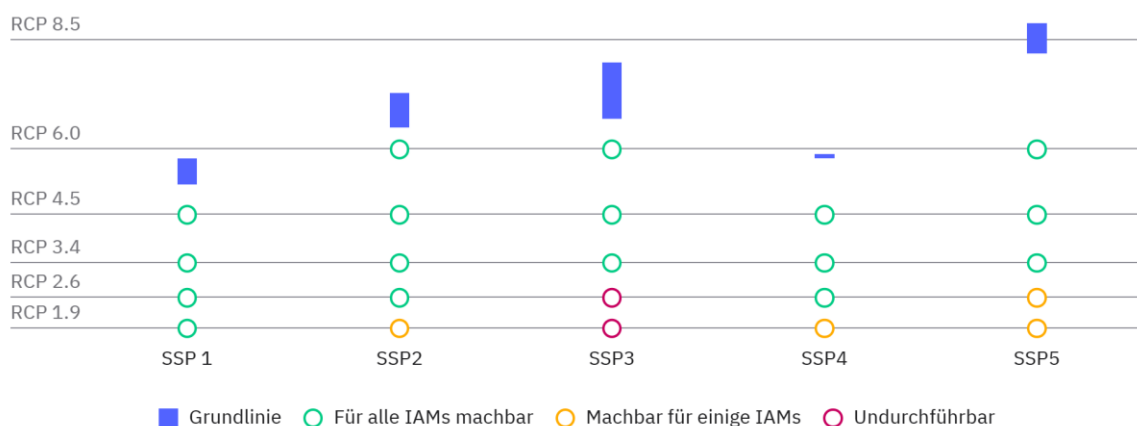


Abbildung 13: Matrix zur Machbarkeit von RCP und SSP-Szenarien [78]

Die Matrix verdeutlicht die wahrscheinliche Realisierbarkeit der Klimapfade anhand von Integrierung der Betrachtung der sozialökonomischen Maßnahmen. Zudem sollen mit Hilfe des *Integrated Assessment Models* die komplexe Dynamik zwischen den jeweiligen Komponenten wie Klima, Makroökonomie, Energie und Landwirtschaft geklärt werden und die möglichen Risiken abgedeckt werden [78]. Bei *IAM's* handelt es sich um integrierte Bewertungsmodelle, mit denen Entwicklungen zwischen Mensch und Umwelt für politikrelevante Einblicke bemessen werden können. Damit sollen Entscheidungsfindungen, selbst bei großer Unsicherheit, erleichtert werden [79]. Die Abbildung macht ersichtlich, dass mit den strengeren Vorgaben wie SSP1 und SSP2 bessere Konzentrationspfade erreicht werden können, während mit SSP4 und SSP5 nur noch die Pfade ab RCP3.4 als realistisch erscheinen. Bei SSP3 erscheinen zwei Szenarien nicht als realistisch umsetzbar, da von einer globalen Rivalität ausgegangen wird, womit eine gemeinsame Umsetzung als unrealistisch angenommen wird [78].

- RCP2.6

Der Weltklimarat *IPCC* veröffentlichte im Jahr 2014 die Grafik in Abbildung 14, um die Entwicklung der unterschiedlichen Szenarien anhand der CO₂-Konzentration und den jährlichen Emissionen zu veranschaulichen. Zu erkennen ist, dass mit dem Szenario *RCP2.6* die jährlichen Emissionen gegen Ende des Jahrhunderts bei null liegen. Zudem bewegt sich die Kohlendioxidkonzentration zwischen 430 und 480 Parts per Million.

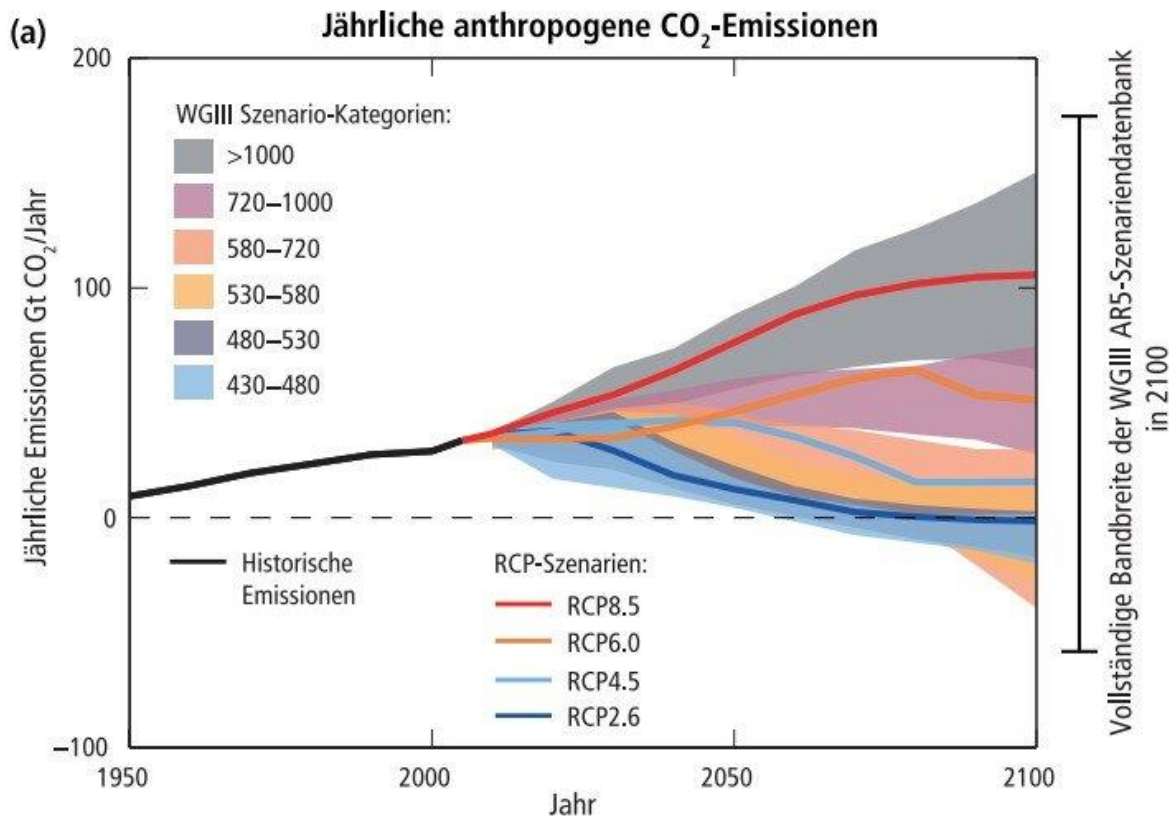


Abbildung 14: Entwicklung der unterschiedlichen Klimaszenarien gemessen an den jährlichen Emissionen Gt CO₂/Jahr [80]

Von den vier unterschiedlichen Szenarien ist das Klimaszenario 2.6 der Pfad mit den geringsten Auswirkungen auf das weltweite Klima. Dabei sollen künftig geringe Emissionen ausgestoßen werden und bis 2080 die Pro-Kopf-Emissionen auf null sinken. Ab dem Jahr 2030 sollen die produzierten Treibhausgase kontinuierlich reduziert werden, um die Ziele zu erreichen. Somit kann mit diesem Pfad die Temperaturerhöhung im Vergleich zur vorindustriellen Zeit unter zwei Grad Celsius gehalten werden. Es wird davon ausgegangen, dass die globale Oberflächentemperatur in den Jahren zwischen 2016 und 2035 einen Anstieg von 0.3 bis 0.7° Grad verzeichnen wird, da diese Interpretationen auf bereits ausgestoßene Treibhausgasemissionen der letzten Jahre beruht.

- RCP4.5

Der Klimaszenarienpfad entspricht dem ersten veröffentlichten Szenario des ÖKS15 für die künftige Temperaturentwicklung von Österreich, beruhend auf modernster Klimaforschung [80]. Dafür wurden Experten der ZAMG, des Wegener Center für Klima und globalen Wandel (WEGC) und der Fachbereich für Geoinformatik der Universität Salzburg damit beauftragt, Klimaszenarien für Österreich auszuarbeiten, um eine einheitliche Grundbasis für Studien,

Prognosen und Recherchen zu schaffen, mit denen weitergearbeitet werden kann [81]. Dabei beruht der *RCP4.5* auf der Grundlage, dass ein Klimaschutzprogramm seitens der Republik Österreich durchgeführt wird. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass sich für diesen Pfad die Pro-Kopf-Emissionen ab 2050 auf 2.5 Tonnen im Jahr drastisch reduziert, werden müssen, damit die geforderten Ziele erreicht werden. Immens radikaler verläuft die Kurve für das Szenario *RCP2.6*, die schon ab dem Jahr 2030 rapide sinken, um gegen Ende des Jahrhunderts auf Netto-Null zu kommen. Als Annahme für diese Entwicklung wird davon ausgegangen, dass die gesamte Weltbevölkerung auf neun Milliarden Menschen wächst und anschließend nahezu konstant bleibt [82].

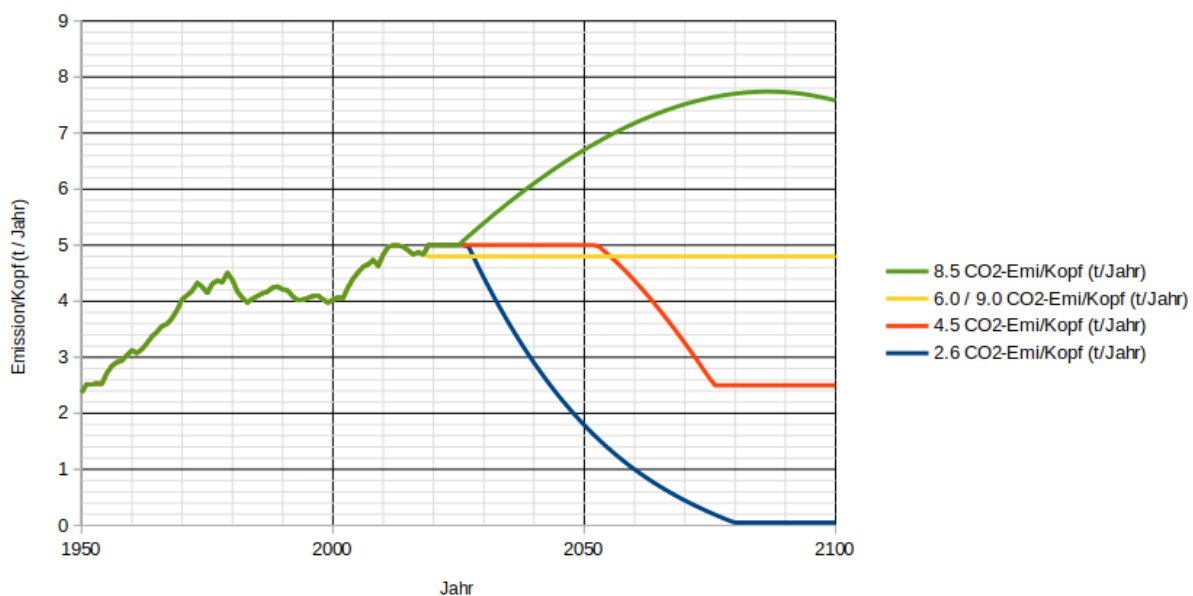


Abbildung 15: Verlauf der Pro-Kopf-Emissionen bis 2100 [82]

Dieses Szenario wird häufiger für Vorhersagen über die Entwicklung des Klimawandels angewendet, um die Bemühungen im puncto Klimaschutz seitens der Republik Österreich abzudecken. Die Prognosen zeigen eine Absenkung der Emissionen ab einer Kumulation von 3100 Gigatonnen und einem Limit von 4480 Gigatonnen [82]. Für die Treibhausgaskonzentration liegt die Obergrenze bei 650 ppm CO₂-Äquivalent [41].

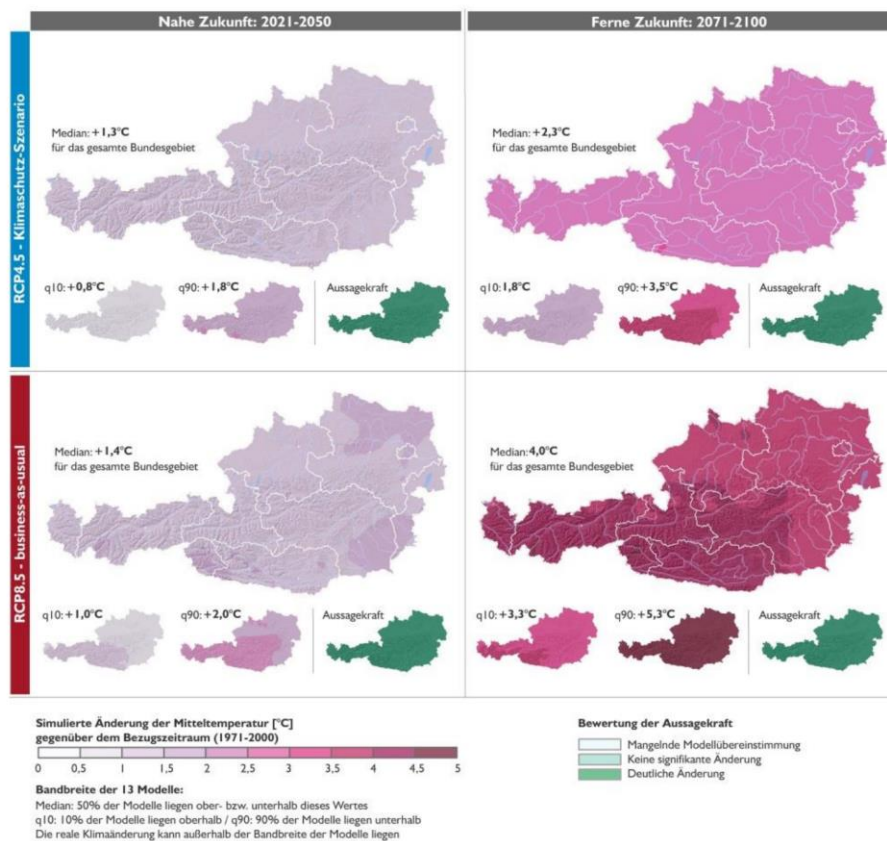
- RCP6.0

Für die mittleren Stabilisierungswege wurden vom *Indian Institute of Science* zwei Szenarien entwickelt, wobei der *RCP6.0* ein Szenario mit höheren Treibhausgasen im Gegensatz zum *RCP4.5* darstellt. Somit sollen nicht nur die besten oder schlechtesten Annahmen für die Zukunft betrachtet werden. Dieser Pfad erfasst sämtliche produzierten Emissionen und chemischen Gase, die zu einem Strahlungsantrieb von 6.0 Watt/m² beitragen. Ziel ist die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration bis zum Jahr 2150 [83]. Die Temperaturzunahme

zwischen 2081 und 2100 beträgt dabei 2.2 °C und die Energieerzeugung wird aus einem Mix von fossilen und erneuerbaren Brennstoffen angenommen [84].

- RCP8.5

Dieses Szenario geht davon aus, dass ein Allzeithoch der Weltbevölkerung von 12.4 Milliarden Menschen erreicht wird. Zudem vervielfacht sich der Kohleverbrauch bis zum Ende des Jahrhunderts, was eine pro Kopf-Emissionen von fast acht Tonnen pro Jahr mit sich bringt. Die kumulierten Emissionen für dieses Szenario liegen nach IPCC dabei bei 7660 Gigatonnen [82]. Verursacht werden die Treibhausgasemissionen dadurch, dass weiter auf fossile Energieträger gesetzt wird und die Mobilität großteils auf elektrisch betriebene Fahrzeuge und andere Fortbewegungsmöglichkeiten wie Fahrräder verzichtet. Im Zeitraum 2081 bis 2100 wird die durchschnittliche Temperaturerhöhung im Vergleich zu 1986 bis 2005 bei rund 3.7 °C liegen und somit das globale Klima wesentlich beeinflussen [84].



Simulierte Änderung der Mitteltemperatur [°C] gegenüber dem Bezugszeitraum (1971-2000)

Abbildung 16: Prognose für die Aussichten in der Zukunft für RCP4.5 und RCP 8.5 [85]

Die Prognose für die ferne Zukunft geht für das Szenario *RCP4.5* von einer Anzahl von dreizehn Hitzetagen aus, während sich dieser Wert in *RCP8.5* auf 27.3 Tagen verdoppelt [74]. Die Grafik zeigt, dass in der nahen Zukunft kein großer Unterschied zwischen den beiden Szenarien, gemessen an der Änderung des Medians zu erwarten ist, allerdings sich dieser bei Betrachtung der fernen Zukunft vehement ändert. Zehn Prozent der Modelle gehen davon aus, dass im Szenario *RCP8.5* zwischen 2071 und 2100 die Temperaturänderung über 5.3 °C liegen wird. Dennoch geht die Hälfte von einem Anstieg von vier Grad Celsius aus. Die ferne Zukunft weist eine größere Temperaturspanne bezüglich dem 10 Prozent Dezil und dem 90 Prozent Dezil auf. Grund dafür könnte der weiter entfernte Zeitraum und die damit größeren Unsicherheiten von Einflussfaktoren sein.

Abschließend muss erwähnt werden, dass künftige Betrachtungen für die sommerliche Überhitzung zum Teil abhängig vom gewählten Szenario sind und sich künftig verändern könnten, da 2026 neue überarbeitete Klimaszenarien vom *Climate Change Centre Austria* veröffentlicht werden [86]. Für diese wissenschaftliche Arbeit wurden jedoch, aufgrund der Erkenntnisse im ÖKS15-Bericht, die Szenarien *RCP4.5* und *RCP8.5* ausgewählt und angewendet.

3.5 Einflussgrößen für die Überhitzung von Gebäuden

Für die sommerliche Überhitzung in Wohngebäuden gibt es verschiedene Einflussgrößen, die je nach Gebäude von unterschiedlicher Relevanz sind. Neben den nicht beeinflussbaren Parametern wie Außentemperatur, Solarstrahlung und dem Windvorkommen am Standort gibt es Einflussfaktoren, die vor dem Bau, als auch während der Nutzungsphase verändert werden können. Die Behaglichkeit des Menschen hängt von unterschiedlichen Kenngrößen wie zum Beispiel dem Aktivitätsgrad, dem Bekleidungsgrad und der operativen Raumtemperatur ab. Mit Hilfe der Zusammensetzung der Kennzahlen kann eine Komfortgleichung, die als thermisches Behaglichkeitskriterium gilt, erstellt werden. Dabei wird der sogenannte *PPD-Wert* in Prozent angegeben und er sagt, aus wie hoch der Unzufriedenheitswert im jeweiligen Raum ist [87]. Relevant für die Empfindung von Temperaturen für Menschen ist die operative Raumtemperatur, welche sich wie folgt zusammensetzt:

$$T_{op} = a * T_L + (1 - a) * T_s \quad (1)$$

T_{op} operative Temperatur in °C

T_L Raumlufthtemperatur in °C

T_s Strahlungstemperatur in °C

$a = \frac{\alpha_K}{\alpha_K + \alpha_S} =$ Wichtungsfaktor

α_K	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in W/m^2K
α_S	langwelliger Strahlungswärmeübergangskoeffizient in W/m^2K

Beim Wichtungsfaktor a handelt es sich um die Luftgeschwindigkeit, bei der im Bereich zwischen 0 und 0.2 m/s bei 0.43 bis 0.57 liegt. In der Literatur wird häufig der Wert 0.5 verwendet, da sich somit ein arithmetischer Mittelwert zwischen T_L und T_S ergibt. Zu beachten ist, dass die operative Raumtemperatur nicht mit dem vollständigen Empfinden der Menschen korreliert, da die Luftfeuchtigkeit, der Aktivitätsgrad und die Bekleidungsrate nicht berücksichtigt werden [87]. Oft wird in der Literatur auch folgende vereinfachte Formel angewendet, da bei minimaler Luftgeschwindigkeit und einer normalen Luftfeuchtigkeit zwischen 30 und 70 Prozent relativer Feuchte der Mittelwert aus Lufttemperatur und Umgebungstemperatur eine gute Näherung darstellt [87].

$$T_{op} = \frac{T_{air} + T_{rad}}{2} \quad (2)$$

T_{op}	operative Temperatur in °C
T_{air}	Raumlufttemperatur in °C
T_{rad}	Strahlungstemperatur der Wände in °C

Somit ist die operative Temperatur der Mittelwert aus der Summe der Lufttemperatur in dem betrachteten Raum und der dazugehörigen Wandtemperatur [88].

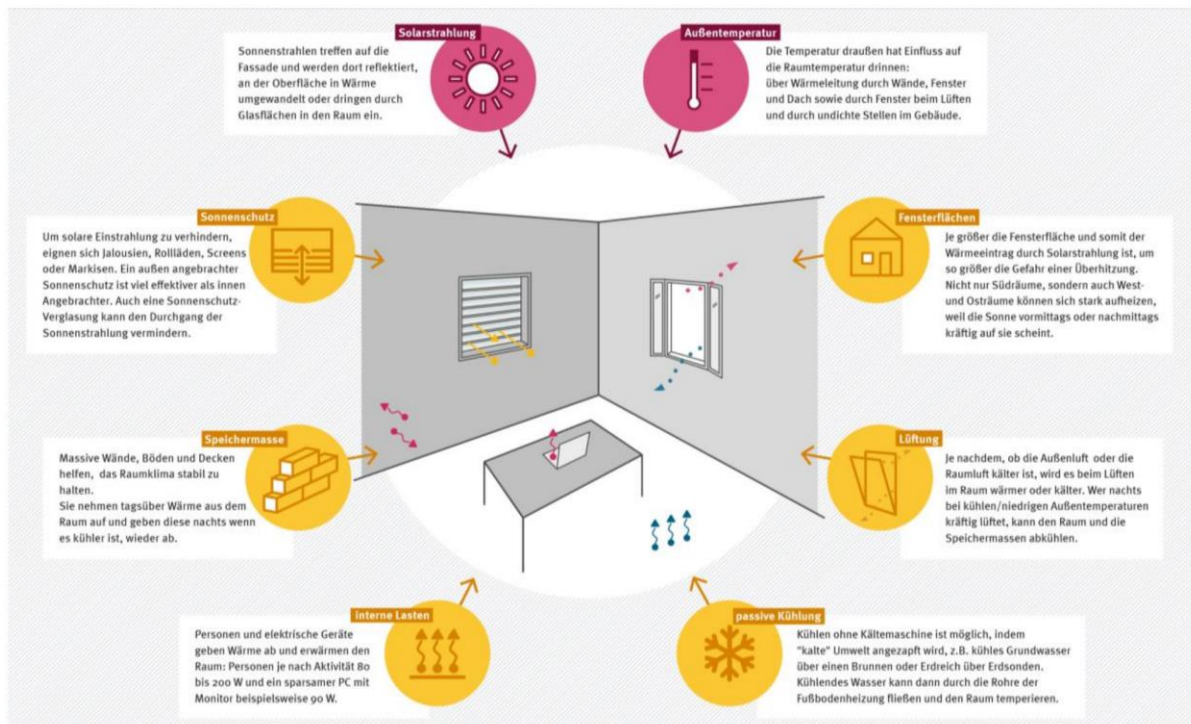


Abbildung 17: Einflussfaktoren für die Raumtemperatur in einem Wohngebäude [41]

$$\frac{dE}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{int} - Q_{HVAC} - Q_{vent} - Q_{solar} \quad (3)$$

Q_{in} = Energiezufuhr in das Gebäude durch Heizungs- oder Klimatisierungssystem

Q_{out} = Energieabfuhr aus dem Gebäude durch Wärmeverluste der Gebäudehülle. Dies beinhaltet Verluste aufgrund von Türen, Fenstern, unkontrolliertem Lüften oder Belüftungssystemen.

Q_{int} = entspricht den internen Gewinnen in einem Gebäude. Dazu zählt die Wärmeerzeugung durch elektrische Geräte, Personen, Beleuchtung und noch andere interne Quelle.

Q_{HVAC} = repräsentiert den Energieverbrauch des Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystems im Gebäude. Der Energieverbrauch kann durch Steuerung der Raumtemperatur und der Belüftung variieren.

Q_{vent} = resultiert aus dem Energieverlust durch die kontrollierten Belüftungssysteme. Bei mechanischer Belüftung werden durch die Behandlung der einströmenden Luft für die Kühlung oder Erwärmung energetische Verluste erzeugt.

Q_{solar} = entspricht der solaren Einstrahlung auf das Gebäude. Diese kann einen erheblichen Einfluss auf die Energiebilanz eines Gebäudes haben, je nach Gebäudehülle und transparenter Bauteile.

Die Differentialgleichung beschreibt die Energiebilanz in einem Gebäude. Dabei sind die relevanten Termini für die sommerliche Überhitzung die Reduzierung beziehungsweise Minimierung von Q_{solar} und Q_{int} . Mittels der Gleichung kann eine Quantifizierung für den Einfluss des Energieflusses im System durchgeführt werden. Durch die Erhöhung der solaren Gewinne steigen die Temperaturen im System dementsprechend, die bei Erreichen der Temperaturobergrenze mittels einer Klimaanlage abgeführt werden müssen.

3.5.1 Gebäudehülle

In der Abbildung 17 ist ersichtlich, dass es eine Mischung aus verschiedenen Komponenten ist, die einen Einfluss auf die Raumtemperatur hat. Den größten Anteil am Gebäude hat dabei die Gebäudehülle, die im auch Winter ein thermisch behagliches Klima gewährleisten soll. Eine ausreichende Speichermasse ermöglicht es, große Temperaturschwankungen zu verhindern, indem überschüssige Wärme bei hohen Temperaturen gespeichert wird und bei niedrigen wieder an die Umgebung abgegeben wird. Die wirksame Wärmekapazität c_{wirk} wird herangezogen, um die Wärmespeicherfähigkeit von Gebäuden kalkulieren zu können und diese wird für den ausgewählten Baustoff wie folgt berechnet [89]:

$$C_{wirk} = \sum_j c_j * \rho_j * d_j * A_j \quad (4)$$

A_j = wirksame Bauteilfläche, wobei bei Außenbauteilen Außenmaße angewendet werden und bei Innenbauteilen Innenmaße in [m²]

d_j = wirksame Schichtdicke der Schicht j in [m]

ρ_j = Rohdichte der Schicht j in [kg/m³]

c_j = spezifische Wärmekapazität in Schicht j in [Wh/KgK]

Um eine hohe Wärmespeicherfähigkeit zu besitzen, sollte c_j einen hohen Wert vorweisen. Daher ist es ratsam, Baustoffe zu wählen, die über eine hohe spezifische Wärmekapazität, Rohdichte und Schichtdicke verfügen.

Als wirksam werden nur Bauteile erachtet, die weniger als zehn Zentimeter von der inneren Oberfläche entfernt sind. Dabei wird nur die Speichermasse betrachtet, die als Wärmespeicherpuffer geeignet ist und auch raumseitig in Betracht gezogen werden kann. In der Regel ist entscheidend, ob es sich um eine leichte, mittlere oder schwere Bauart handelt. Liegt die gemittelte Rohdichte der Innen- und Außenwände flächenanteilig über 600 Kilogramm pro Kubikmeter, handelt es sich hierbei um ein mittelschweres Gebäude. Anhand dieser Unterscheidung kann c_{wirk} für die jeweilige Gebäude gewählt werden. Für einen Leichtbau sollte

der Quotient zwischen der wirksamen Wärmekapazität und der Nettofläche des Gebäudes kleiner als $50 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ betragen. Bei schweren Ziegelbauten hingegen sollte der Wert über $130 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ liegen [90].

3.5.2 Nutzerverhalten

Das Nutzerverhalten spielt eine wichtige Rolle für die Inanspruchnahme der Sonnenschutzvorrichtung während des Tages. Personen im Gebäude entscheiden im Normalfall, falls keine Temperaturegelung vorhanden ist, zu welcher Uhrzeit gelüftet wird und welche Geräte wie lang verwendet werden. Dementsprechend können interne Wärmelasten, erzeugt durch die Verwendung von entsprechenden Geräten, zu einem Anstieg der Temperatur führen. Daher kann es von Bedeutung sein, sich mit der Thematik der sommerlichen Überhitzung zu beschäftigen und passive Maßnahmen für die Senkung oder Kontinuität der Innentemperatur zu berücksichtigen.

3.5.3 Transparente Bauteile

Als transparente Bauteile gelten laut Bautechnik Verordnung Vorarlbergs im Jahr 2023 Fenster, Fenstertüren, verglaste Türen und sonstige transparente Bauteile [91]. Dabei ist die Ausrichtung der transparenten Bauteile, der Flächenanteil an der Gesamtfläche, die Art von Sonnenschutzvorrichtung, der Gesamtenergiedurchlassgrad, der Neigungswinkel zur Senkrechten und die Speichermasse des Gebäudes von Relevanz. Eine Ausrichtung der Hauptverglasung nach Süden bewirkt eine Maximierung der solaren Gewinne in den Wintermonaten. Dieser Vorteil führt jedoch in den Sommermonaten zu Konflikten bezüglich der Innentemperatur. Untersuchungen ergeben, dass die solaren Einträge über transparente Außenbauteile um einiges wirksamer sind als bei opaken Bauteilen [89]. Gering geneigte transparente Bauteile weisen eine größere bestrahlte Fläche auf und erhöhen somit die Wärmegewinne durch die Sonne. Resultierend daraus sollten besonders diese mit einer Sonnenschutzvorrichtung ausgestattet werden [89].

Die kurzwellige solare Strahlung der Sonne wird prinzipiell zu einem gewissen Teil von der Verglasung reflektiert, womit der Reflexionsgrad ρ_e bestimmt werden kann. Der Anteil, der nicht reflektiert werden kann wird absorbiert, in Wärme umgewandelt und lässt sich durch den Absorptionsgrad α_e festlegen. Dabei wird je nach Verglasung jedoch nicht die gesamte Wärme an den Innenraum abgegeben. Mittels dem Gesamtdurchlassgrad g kann kalkuliert werden, wie hoch der Anteil der auftretenden Strahlungsenergie, die an den Innenraum abgegeben wird, ist. Stand der Technik sind g –Werte von circa 50 Prozent bei Dreifachverglasungen üblich [89]. Besonders geeignet sind Sonnenschutzverglasungen, die teilweise Größen bis zu 0.27 bis 0.37 erreichen [41]. Gebäude, die in der heutigen Zeit errichtet werden, verfügen über

einen größeren Glasflächenanteil im Gegensatz zu älteren Gebäuden. Somit ist der Energieeintrag während der Sommerzeit höher. Nach *DIN 4108-2* kann auf eine detaillierte Berechnung für den sommerlichen Wärmeschutz verzichtet werden, wenn bei Wohngebäuden die grundflächenbezogenen Fensterflächen weniger als 35 Prozent ausmachen und dabei eine Sonnenschutzvorrichtung mit einem Abminderungsfaktor F_c kleiner gleich 0.30 vorgewiesen werden kann [90].

3.5.4 Sonnenschutzvorrichtung

Sonnenschutzvorrichtungen ermöglichen es, kurzwellige Sonnenstrahlung zu absorbieren und diese in langwellige Infrarotstrahlung umzuwandeln. Dabei ist wichtig zu beachten, dass damit Wärme erzeugt wird und es relevant ist, wo die Sonnenschutzvorrichtung positioniert wird. Befindet sich diese innerhalb des Raumes, wandeln sich diese wie oben beschrieben in langwellige Strahlung um und können nicht mehr durch die Verglasung nach außen gelangen [89]. Zu den Sonnenschutzvorrichtungen gehören Jalousien, Rollläden, Markisen, Lamellen und Screens. Des Weiteren gibt es noch die Möglichkeit spezielle Sonnenschutzverglasungen wie zum Beispiel Elektrochrome Fenster, bei denen im Scheibenzwischenraum eine Spannung angelegt ist, die je nach Einstrahlung der Sonne zur Bewegung von Ionen, führt einzubauen. Dabei färbt sich die Verglasung blau und verringert damit die Sonneneinstrahlung [92]. Für die Kalkulation der Wirksamkeit von Sonnenschutzvorrichtungen wird der Abminderungsfaktor F_c herangezogen. Je nach Positionierung, Verglasungsaufbau und Variante variiert der Wert bei unterschiedlichen Systemen. Er setzt sich zusammen aus dem Quotienten des Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} des gesamten Systems und dem g -Wert der Verglasung. Der Durchlassgrad des gesamten Systems für außenliegende Sonnenschutzvorrichtungen setzt sich aus einer Vielzahl von Parametern wie folgt zusammen [41]:

$$g_{tot} = \tau_{e,B} * \alpha_{e,B} * \frac{G}{10 \frac{W}{m^2K}} + \tau_{e,B} * (1 - g) * \frac{G}{5 \frac{W}{m^2K}} \quad (5)$$

$\tau_{e,B}$ = Transmissionsgrad der Sonnenschutzvorrichtung

$\alpha_{e,B}$ = Absorptionsgrad der Sonnenschutzvorrichtung $\alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B}$

g = Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung

G = Wärmewirkleitwert in $\frac{W}{m^2K}$

$$G = \left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{5 \frac{W}{m^2K}} + \frac{1}{10 \frac{W}{m^2K}} \right)^{-1}$$

$\rho_{e,B}$ = Reflexionsgrad der Sonnenschutzvorrichtung

Ein niedriger F_c - Wert ist dabei besser geeignet als ein höherer Wert und bewegt sich im Bereich zwischen null und eins. Typische Kenngrößen für innenliegende Sonnenschutzvorrichtungen wie Jalousien oder helle Vorhänge sind nach *DIN 4108-2* bei standardisierten Zweifachwärmeschutzverglasungen 0.65 beziehungsweise 0.75. Der Abminderungsfaktor ist bei außen liegendem Sonnenschutz um einiges niedriger und liegt für Rollläden, die dreiviertel geschlossen sind, bei 0.30 und für Jalousien mit 45° Grad geneigten Lamellen, bei 0.25 [41]. Von Wichtigkeit für die Bewertung nach *DIN 13363-1* ist für den Transmissionsgrad $\tau_{e,B}$ die Lichtdurchlässigkeit von stark durchlässig bis zu lichtundurchlässig und der Reflexionsgrad $\rho_{e,B}$, abhängig vom Farbton der Sonnenschutzvorrichtung, die von weiß bis schwarz reichen kann [89].

Für die innenliegende Sonnenschutzvorrichtung lässt sich der Durchlassgrad des gesamten Systems wie folgt berechnen [41]:

$$g_{tot} = g * \left(1 - g * \rho_{e,B} - \alpha_{e,B} * \frac{G}{30 \frac{W}{m^2K}} \right) \quad (6)$$

$\tau_{e,B}$ = Transmissionsgrad der Sonnenschutzvorrichtung

$\alpha_{e,B}$ = Absorptionsgrad der Sonnenschutzvorrichtung $\alpha_{e,B} = 1 - \tau_{e,B} - \rho_{e,B}$

g = Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung

$\rho_{e,B}$ = Reflexionsgrad der Sonnenschutzvorrichtung

U_g = Wärmedurchgangskoeffizient in W/m^2K

G = Wärmewirkleitwert in $\frac{W}{m^2K}$

$$G = \left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{30 \frac{W}{m^2K}} \right)^{-1}$$

Bei Betrachtung der Gleichung fällt auf, dass ein niedriger Gesamtenergiedurchlassgrad und ein hoher Reflexionsgrad von Vorteil sind und zu einem niedrigeren g_{tot} -Wert führen. Der Wärmewirkleitwert ist abhängig von dem U_g – Wert der gewählten Verglasung.

Der g_{tot} ist mit der überarbeiteten Version der OIB-Richtlinie 2023 seit Inkrafttreten im Mai 2023 von Relevanz. Dabei müssen Neubauten und Gebäude mit größeren Renovierungen

nach dem 4.9.1 b) in Aufenthaltsräumen sämtliche Lichteintrittsflächen mit einer außenliegenden Sonnenschutzvorrichtung mit einem $g_{tot} \leq 0.15$ ausgestattet werden, um den sommerlichen Wärmeschutz zu gewährleisten. Befinden sich die Lichteintrittsflächen nordseitig, mit einer Maximalabweichung von 22.5 °Grad, dürfen diese unberücksichtigt bleiben [15]. Als Aufenthaltsraum gelten gemäß Bautechnikverordnung Räume, die für einen längeren Aufenthalt von Menschen bestimmt sind. Dazu zählen in einem Wohngebäude Räume wie Schlafzimmer, Wohnzimmer, Küche und Büro/Arbeitsraum [15].

3.5.5 Passive Kühlung

Passive Kühlsysteme werden nach *DIN 4108-2* dadurch definiert, dass Energie für die Raumkühlung nur der Förderung des Kühlmediums dienen darf. Als Kühlmedium dient dafür Wasser oder Luft. Zu diesen Kühlungssystemen zählen zum Beispiel thermisch aktivierte Bauteile unter Verwendung von Umweltenergie. Nimmt man Wasser zum Kühlen des Gebäudes kann Grundwasser über einen Saugbrunnen mit Hilfe einer Pumpe gewonnen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Abgabe der überschüssigen Wärme über eine Erdsonde oder Bohrpfähle an das Erdreich. Die Kälte wird dabei über einen Wärmetauscher an das Kühlübergabesystem wie einer Fußbodenheizung oder durch Bauteilaktivierung an das Gebäude abgegeben.

Kommt das Medium Luft zum Einsatz, wird die Außenluft über Erdkanäle gekühlt, bevor sie an das Lüftungssystem abgegeben wird. Die Nutzung von Verdunstungskälte ist eine andere Alternative, bei der die Abluft im Lüftungsgerät befeuchtet wird und somit die Luft abkühlt, bevor sie an den Wärmetauscher abgegeben wird [41]. Es ist möglich, Temperaturreduzierungen der Außenluft von bis zu 10 Kelvin zu erzielen, wobei dies von der Luftfeuchtigkeit der Abluft und der Außentemperatur abhängig ist [93].

Eine weitere Maßnahme ist die Verwendung von Nachtlüftungen für die Temperierung von Gebäuden. Dabei werden die niedrigeren Außentemperaturen ausgenutzt, um die Wärme während der Nachtstunden aus dem Gebäude abzuführen. Im Gegensatz zu schweren Bauweisen verringern leichte Bauweisen je nach Luftwechselzahl die Temperatur schneller. Die Wirkung ist daher abhängig vom System, der Lüftungsintensität, dem Lüftungszeitraum und der Außenlufttemperatur.

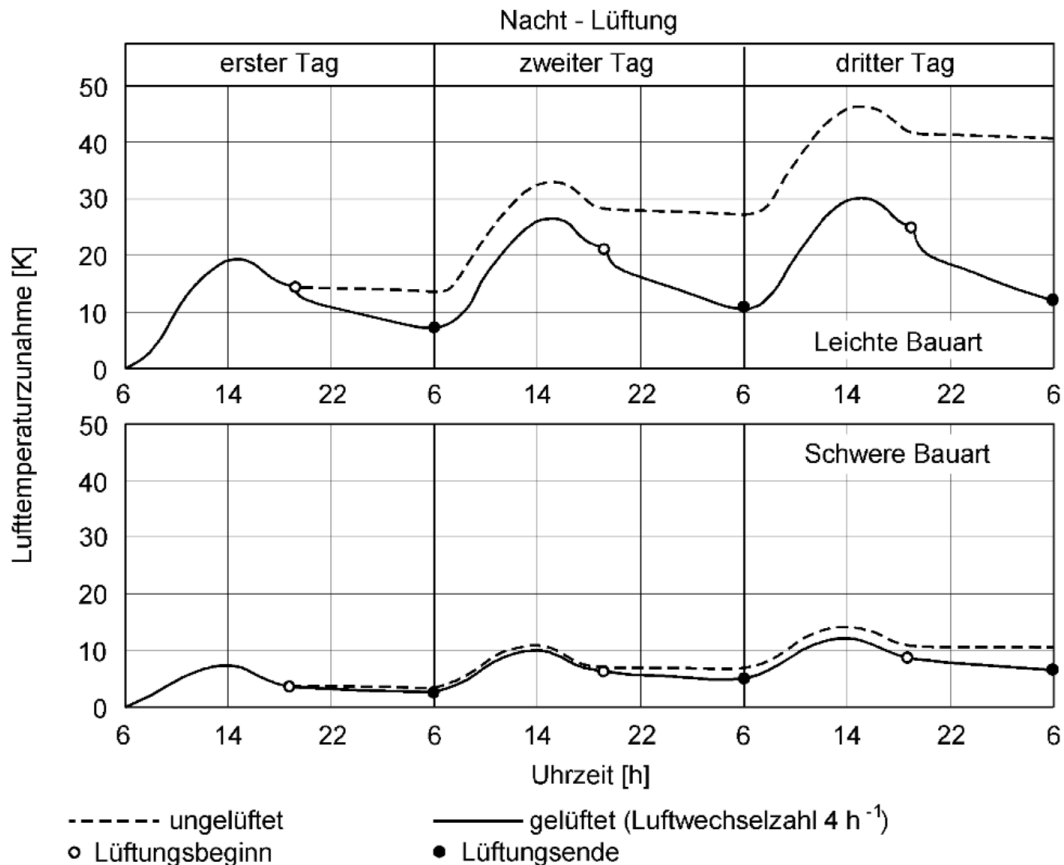


Abbildung 18: Veränderung der Lufttemperatur bei Nachtlüftung anhand unterschiedlicher Bauarten [89]

Angenommen wird, dass die Nachtlüftung im Zeitraum zwischen 19 und 6 Uhr am Morgen durchgeführt wird. Die Luftwechselzahl beträgt dabei 4 h^{-1} , womit die gesamte Raumluft in einer Stunde viermal ausgetauscht wird. Für Wohnhäuser mit mehr als zwei Nutzungseinheiten wird für die natürliche Belüftung eine Luftwechselrate von mindestens 0.38 h^{-1} vorgeschrieben [94]. Erkennbar sind die Diskrepanzen zwischen gelüftetem und ungelüftetem System, durch niedrigerer Lufttemperaturzunahmen zwischen leichter und schwerer Bauweise und der Schnelligkeit der Zu beziehungsweise der Abnahme der Temperatur.

Zur Erhöhung der Luftwechselrate im Gebäude ist bei natürlicher Lüftung das Querlüften in sämtlichen Nutzeneinheiten oder die Anwendung von thermischem Auftrieb in Kombination mit Abluftventilatoren am Dach am effektivsten [41]. Kritisch für diese Maßnahme ist die Auswirkung des Klimawandels und dem daraus resultierenden Anstieg der Außenlufttemperatur. Je nach Entwicklung der anthropogenen Emissionen steigt die Anzahl der Tropennächte mit Temperaturen über 20 °C zwischen 0.4 und 7.4 Nächten in den nordöstlichen Alpen und somit auch in der Region Österreich an [74]. Dies hat zur Folge, dass die Option der Nachtlüftung geringer wird und keinen allzu großen Beitrag zur Reduzierung von überhitzten Gebäuden mehr leisten kann.

4 Durchführung der Methodik

Dieses Kapitel beinhaltet die Durchführung der Methodik und die Resultate, die im Zuge dieser erlangt werden.

4.1 Ausgangssituation der Realtemperaturdaten

In diesem Kapitel werden die gemessenen Temperaturwerte von insgesamt 15 Wohnungen für den Zeitraum vom 01. Oktober 2019 bis 07. Februar 2023 betrachtet. Die Messungen wurden vom *Energieinstitut Vorarlberg* durchgeführt und ausgewertet. Für die Analyse in dieser Masterarbeit wurden die Daten zur Verfügung gestellt und eigenständig betrachtet. Es wurden die Außentemperatur (°C), die Temperaturen der Lüftungssysteme in Bezug auf Fortluft, Zuluft, Abluft und Außenluft, die Luftqualität (ppm) und die Feuchtigkeit in allen Wohnungen und Gemeinschaftsräumen des Gebäudes gemessen. Die Daten wurden im Viertelstundenintervall aufgezeichnet, wodurch schnelle Veränderungen im Tagesverlauf erfasst werden konnten. Während der Datenaufzeichnung traten einige Komplikationen auf, die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen. Sämtliche Messwerte werden direkt im Abluftstrang über den jeweiligen Wohnungen in der Lüftungsanlage gemessen. Somit handelt es sich um gemittelte Temperaturen. Einflüsse des Badezimmers, der Küche und der Toilette werden inkludiert und daher kann es zu erhöhten Temperaturen, höherer relativer Luftfeuchtigkeit und schlechterer Luftqualität kommen. Diese Faktoren gilt es bei der Auswertung zu beachten.

In der Abbildung 19 ist zu erkennen, dass der Temperaturverlauf im Zeitraum zwischen Dezember 2019 und Juni 2020 von den restlichen Daten abweicht, wie durch die gelben Linien dargestellt wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass anfangs die einzelnen Werte ohne Nachkommastelle erfasst wurden, was zu Sprüngen zwischen ganzzahligen Werten führte.

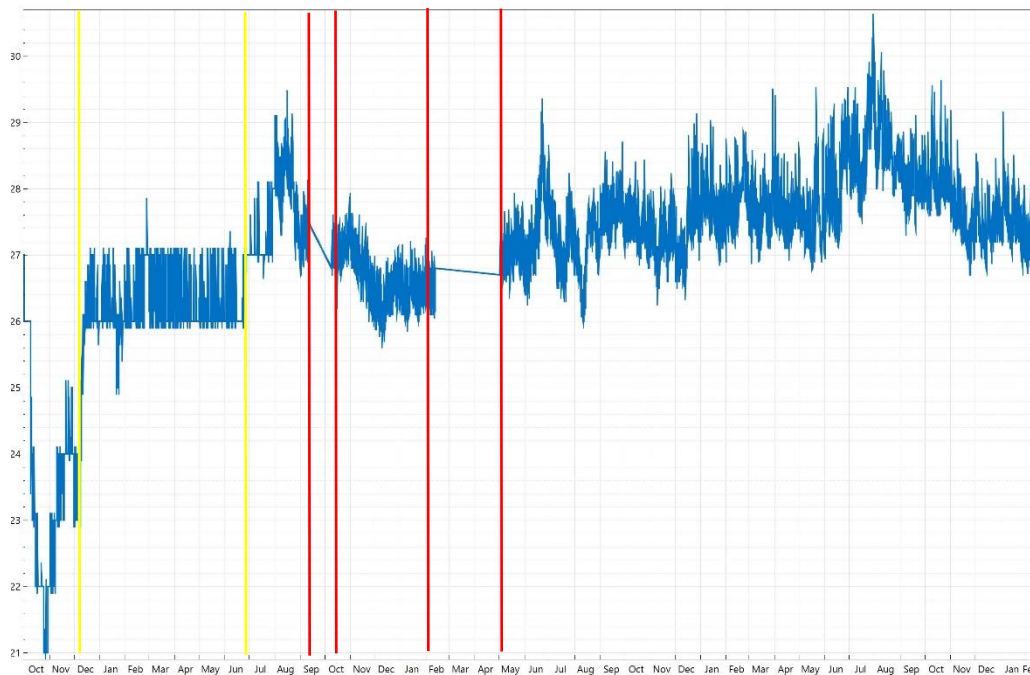


Abbildung 19: Gemessene Temperaturdaten vor Ort mit Darstellung der Messfehler

Aufgrund von technischen Störungen kam es zu Unterbrechungen in der Messreihe, und zwar zwischen August 2020 und Mitte Oktober 2020 sowie erneut im Zeitraum von Februar 2021 bis Mai 2021. Diese Ausfälle sind in den beiden Abschnitten innerhalb der roten Linien zu erkennen. Die ersten Messdaten im Oktober 2019 zeigen ungewöhnliche Verläufe, für die jedoch keine explizite Erklärung vorliegt. Nichtsdestotrotz wurden für diese wissenschaftliche Arbeit relevante Daten in den Sommerzeiträumen 2021 und 2022 aufgezeichnet und können somit ausgewertet werden.

Im Rahmen des Pilotprojektes wurde zudem eine empirische Erhebung mittels eines Fragebogens durchgeführt, der wichtige Erkenntnisse lieferte. Aus Gründen des Datenschutzes werden keine konkreten Wohnungsnummern angegeben, sondern Buchstaben verwendet. Zudem werden nur Durchschnittswerte für alle Wohnungen hinsichtlich der Anwesenheitsstunden und der Personenanzahl angeführt. Es ist zu beachten, dass sich diese Angaben in bestimmten Bereichen verändern können, da die Umfrage vor ein bis zwei Jahren durchgeführt wurde und es sich dabei lediglich um eine Momentaufnahme handelt. Die durchschnittliche Anzahl der Bewohnenden in den 15 Wohnungen beträgt 2.6 Personen.

4.2 Auswertung der Klimadatensätze

Das Kapitel 4.2 beschäftigt sich mit der Auswertung der Messaufzeichnungen der Außenlufttemperatur in Wolfurt. Außerdem werden für die drei Standorte Bregenz, Klagenfurt und Wien

die Klimadaten mit Fokus auf Mittel-, Minimal-, und Maximaltemperatur analysiert, um ein grundlegendes Verständnis für die Simulationen zu ermöglichen.

4.2.1 Analyse Messaufzeichnungen Wolfurt

Um die gemessenen Datensätze vor Ort zu validieren, wurde das Betrachtungsjahr 2022 ausgewählt. Dies wurde gewählt, da wie zuvor beschrieben, Unterbrechungen oder andere Störungen in den anderen Zeiträumen auftraten. Dadurch kann sichergestellt werden, dass nahezu fehlerfreie Datensätze hinsichtlich der Messungen zur Verfügung stehen. Für die Auswertung der Daten und die Erstellung der Grafiken wird *Python* in der Version 3.9.7 und Bibliotheken wie *Matplotlib* verwendet. Im Rahmen der Untersuchung wurden die gemessenen Außentemperaturen genauer analysiert, um deren Qualität zu überprüfen. Dazu wurden die Messdaten aus Wolfurt für das Jahr 2022 mit den Klimadatensätzen von *Meteornorm* verglichen. Als Klimadatensatz werden die Werte für den Standort Bregenz von 2022 verwendet. Die Datenbank von *Meteornorm* basieren auf Jahreswetterdateien aus Messungen von über 8000 Wetterstationen weltweit. Dabei erfüllen sie den Qualitätsstandard der *World Meteorological Organisation* [95].

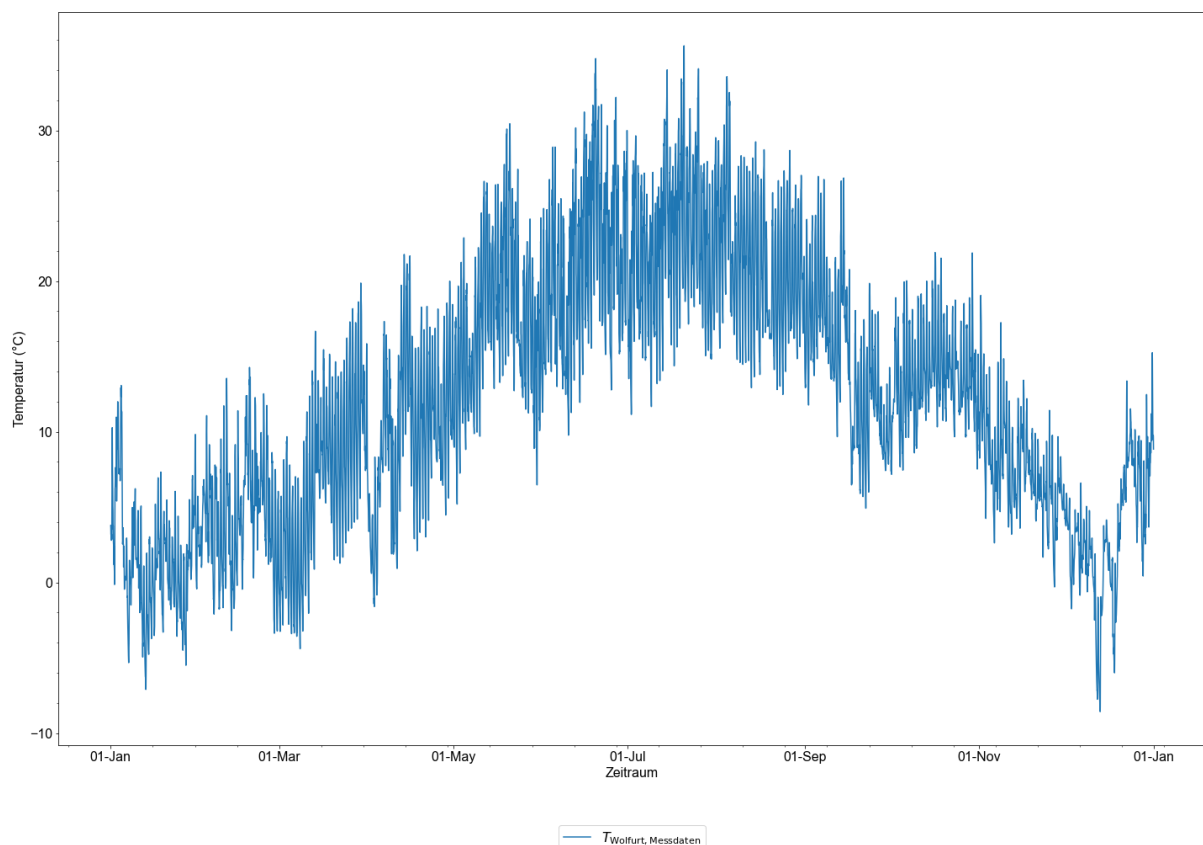


Abbildung 20: Jahremesswerte 2022 in Wolfurt

Startbeginn des Betrachtungszeitraumes der Messung in Wolfurt ist der 01.01.2022 und dieser endet mit dem 31.12.2022. Zu erkennen ist, dass die Minimaltemperatur Ende Dezember mit $-8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ erzielt wurde und die Maximaltemperatur im Juli bei $35.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ lag. Resultierend daraus ergibt sich eine Jahresmitteltemperatur von $12.04\text{ }^{\circ}\text{C}$. Somit ergibt das eine Abweichung vom österreichischen Durchschnitt von 3.4 Kelvin [96]. Die gemessene Außenlufttemperatur von Wolfurt weist keine große Diskrepanz zu den Messwerten der Messstationen von *GeoSphere Austria* auf, die zu einem Resultat von $12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommen [97]. Damit weist Bregenz neben Graz nach Eisenstadt und Wien im Jahr 2022 die höchste Jahresmitteltemperatur in Österreich auf [97]. Auffallend ist, dass die Messwerte im Vergleich zur Minimal- und Maximaltemperatur abweichen. Grund dafür könnte sein, dass die Positionierung des Temperaturfühlers eine wichtige Rolle spielt. Dabei können verschiedene Verschattungen, Windstille oder andere Messparameter zu unterschiedlichen Bilanzen führen.

Zusammenfassend lässt sich zur Qualität der gemessenen Werte sagen, dass über das Jahr gesehen keine großen Unterschiede festzustellen sind und sich die Daten somit zur Verarbeitung eignen. Es ist außerdem wichtig anzumerken, dass die durchgeführte Auswertung ausschließlich die Außenlufttemperatur berücksichtigt und die gemessenen Daten innerhalb des Gebäudes getrennt bewertet werden müssen.

4.2.2 Klimadaten Standorte aktuell

Damit der Einfluss ungleichmäßiger Klimagegebenheiten für das Referenzgebäude miteinander verglichen werden kann, erfolgt eine Bewertung der vorhandenen Klimadatensätze.

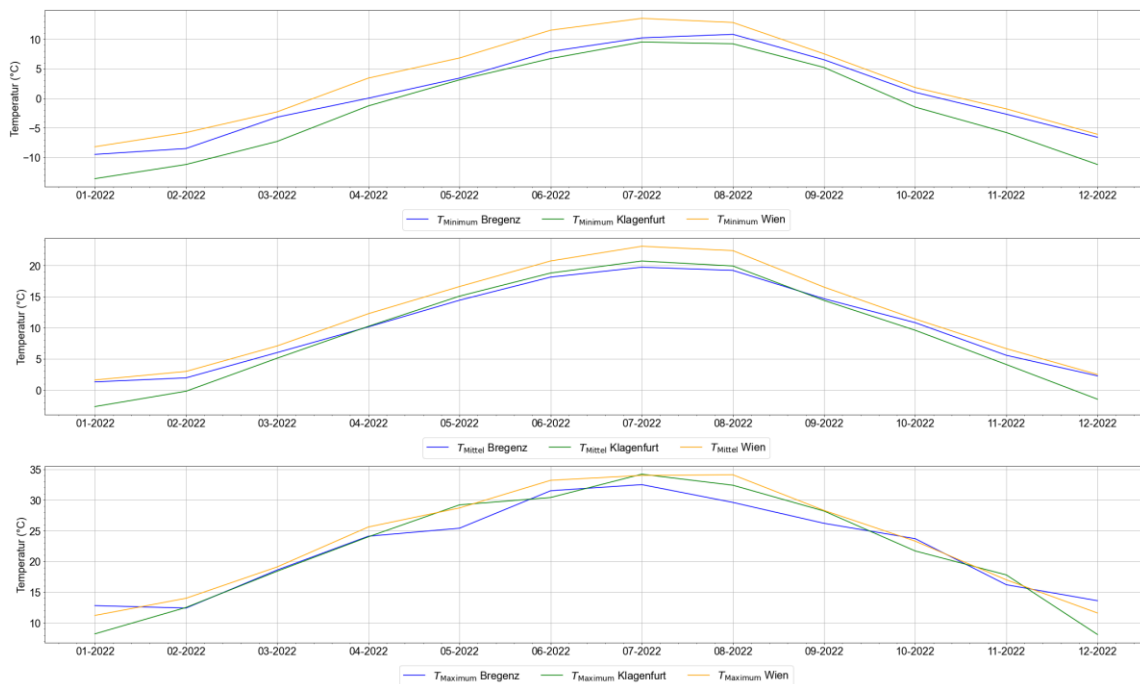


Abbildung 21: Vergleich von Minimum,- Mittel,- und Maximumtemperatur an den drei Standorten

Beim Anblick der Abbildung 21 können einige relevante Erfahrungen gewonnen werden. So ist erkennbar, dass Wien in den drei Darstellungen weitestgehend die höchsten Werte vorweist. Zwischen Klagenfurt und Bregenz ist eine genaue Aussage über die Einordnung der drei Standorte wesentlich schwieriger. Daher werden die Monatsmitteltemperaturen und andere wichtige Kennziffern in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Klimadaten für die Standorte Bregenz, Klagenfurt und Wien im Jahr 2022

	Bregenz	Klagenfurt	Wien
Jänner [°C]	1.3	-2.7	1.6
Februar [°C]	1.9	-0.2	2.9
März [°C]	6.0	5.1	7.0
April [°C]	10.3	10.2	12.2
Mai [°C]	14.4	15.0	16.6
Juni [°C]	18.1	18.8	20.7
Juli [°C]	19.7	20.7	23.0
August [°C]	19.1	19.9	22.4
September [°C]	14.6	14.4	16.5
Oktober [°C]	10.8	9.6	11.4
November [°C]	5.6	4.1	6.6
Dezember [°C]	2.3	-1.5	2.5
Minimaltemperatur [°C]	-9.5	-13.6	-8.2

Maximaltemperatur [°C]	32.5	34.2	34.1
Jahresmitteltemperatur [°C]	10.3	9.5	11.9

Betrachtet man die Jahrmitteltemperatur, liegen zwischen Wien und Bregenz keine allzu großen Unterschiede vor. Weitaus größer ist die Differenz von Wien zu Klagenfurt. Beachtlich ist, dass Klagenfurt in den Wintermonaten sehr milde Temperaturen aufweist und dennoch über heißere Sommermonate als Bregenz verfügt. Außerdem werden in Kärnten sowohl die höchsten als auch die niedrigsten Temperaturen im gesamten Jahr erreicht. Der Wert der Jahresmitteltemperatur hat somit keine eindeutige Aussagekraft über die klimatischen Bedingungen während der Sommermonate und der damit resultierenden sommerlichen Überhitzung. Abbildung 22 repräsentiert die Gründe für die Betrachtung des ausgewählten Zeitraumes von Mai bis Ende August. In diesen Monaten herrschen Außenlufttemperaturen von 30 °C, womit es einen stärkeren Einfluss auf die Innentemperatur hat. Alle drei Standorte weisen den Juli als heißesten Monat im Jahr auf.

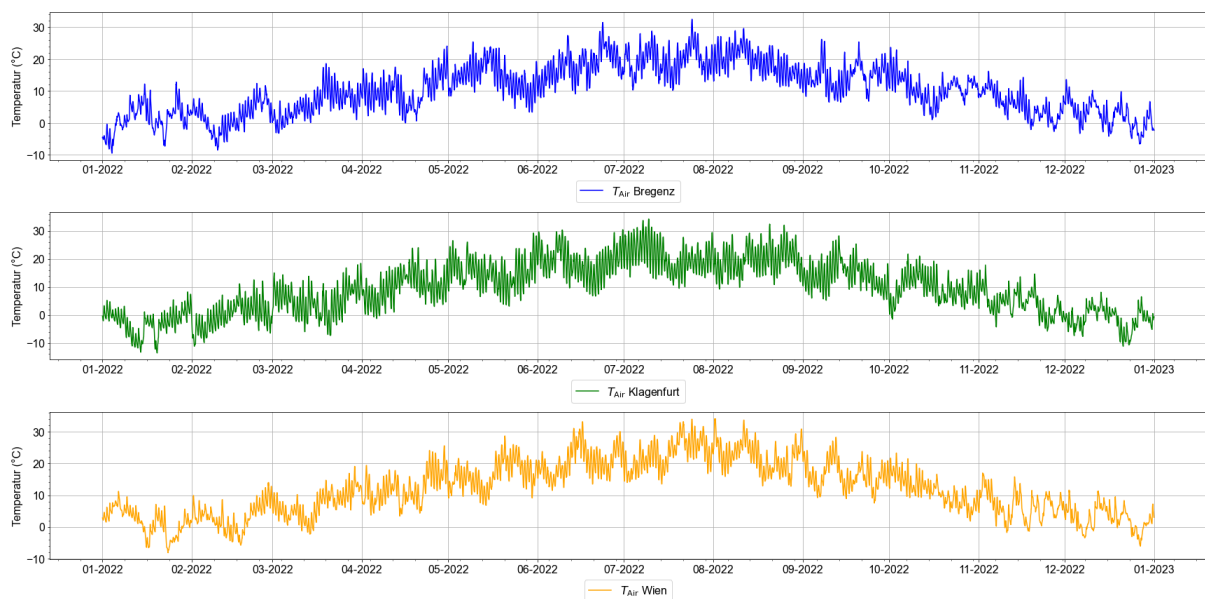


Abbildung 22: Jahrestemperaturkurve im Jahr 2022

Im Grunde ähnelt sich der Verlauf der drei Jahrestemperaturkurven über das Jahr gesehen. Dennoch ist im Januar eine größere Temperaturdiskrepanz zu erkennen, da Wien und Klagenfurt sich um den Nullpunkt bewegen, während Bregenz Minusgrade aufweist. Allerdings verändert sich dieser Aspekt im Laufe des Monats. Während der Sommermonate liegt der Temperaturbereich in Kärnten und in Wien um einiges höher. Außerdem verfügt Klagenfurt über eine größere Tagestemperaturspanne. Bezogen auf Tage an denen 30 °C erreicht werden, verzeichnet Bregenz zwei Tage, Klagenfurt zwölf Tage und Wien 14 Tage. Aufgrund dieser Erkenntnisse kann man davon ausgehen, dass die Hitze während der Sommermonate

im Süden und Osten Österreichs intensiver ist als im Westen Österreichs. Mit Hinblick auf die Höhenmeter liegen Bregenz mit 438 Metern und Klagenfurt mit 452 Metern in etwa auf derselben Höhe, während Wien mit 171 Metern etwas tiefer gelegen ist. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt in Wien mit 68 Prozent über das Jahr gesehen niedriger als bei den anderen beiden Standorten mit 75 Prozent.

4.2.3 Klimadaten Standorte RCP4.5 im Jahr 2060

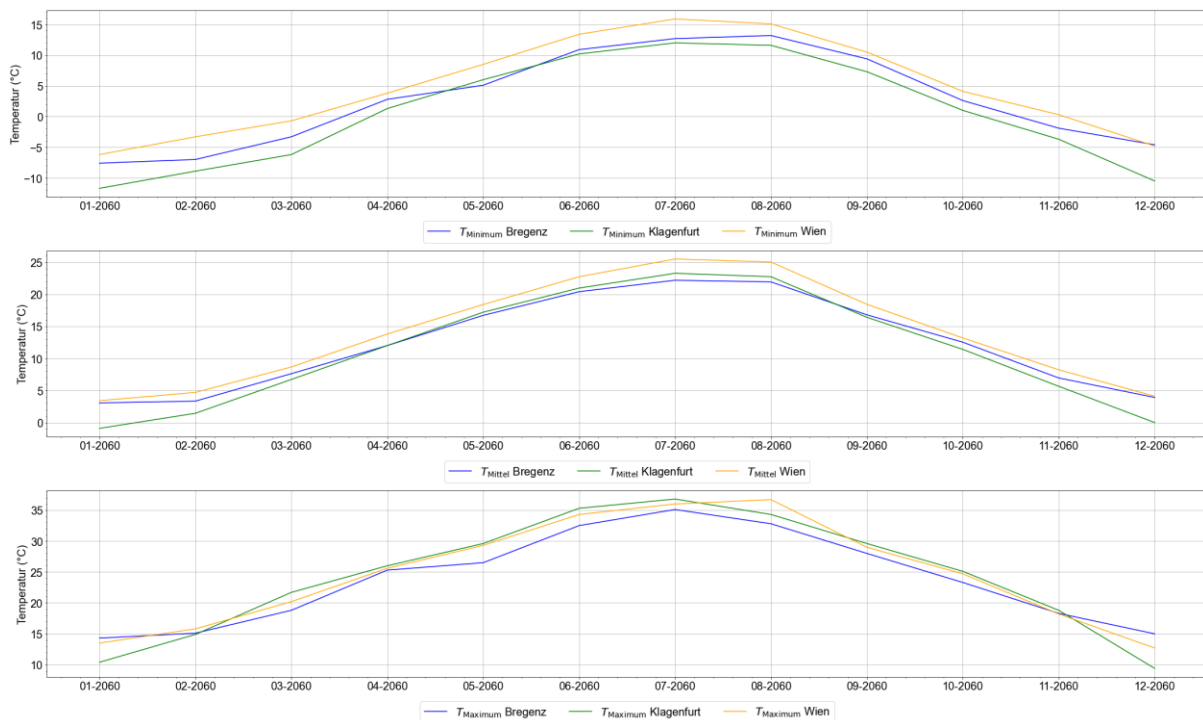


Abbildung 23: Vergleich von Minimum-, Mittel-, und Maximumtemperatur an den drei Standorten mit RCP4.5 im Jahr 2060

Der Vergleich mit den Daten von 2022 an den drei Standorten zeigt, dass sich die Verläufe im Grunde ähneln. Bis auf die Änderung der Reihenfolge von Wien und Bregenz bei den Minimaltemperaturen im Dezember 2060 konnten keine Unterschiede erkannt werden. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Klimadaten mit dem RCP4.5 bei der Temperaturhöhe in denen sie sich bewegen.

Tabelle 3: Klimadaten für die Standorte Bregenz, Klagenfurt und Wien im Jahr 2060 mit RCP4.5

	Bregenz	Klagenfurt	Wien
Jänner [°C]	3.2 +1.9 °C	-0.7 +2 °C	3.4 +1.8 °C
Februar [°C]	3.8 +1.9 °C	1.8 +2 °C	4.9 +2 °C
März [°C]	7.6 +1.6 °C	6.8 +1.7 °C	8.6 +1.6 °C
April [°C]	12.2 +1.9 °C	12.2 +2 °C	14.1 +1.9 °C
Mai [°C]	16.7 +2.3 °C	17.1 +2.1 °C	18.5 +1.9 °C

Juni [°C]	20.7 +2.6 °C	21.1 +2.3 °C	22.8 +2.1 °C
Juli [°C]	22.1 +1.4 °C	22.8 +2.1 °C	25.1 +2.1 °C
August [°C]	21.8 +2.7 °C	22.3 +2.4 °C	24.7 +2.3 °C
September [°C]	17.0 +2.4 °C	16.6 +2.2 °C	18.8 +2.3 °C
Oktober [°C]	12.5 +1.7 °C	11.5 +1.9 °C	13.4 +2 °C
November [°C]	7.2 +1.6 °C	5.9 +1.8 °C	8.5 +1.9 °C
Dezember [°C]	3.8 +1.5 °C	0.2 +1.7 °C	4.0 +1.5 °C
Minimaltemperatur [°C]	-7.6 +1.9 °C	-11.7 +1.9 °C	-6.2 +2 °C
Maximaltemperatur [°C]	35.1 +2.6 °C	36.8 +2.6 °C	36.7 +2.6 °C
Jahresmitteltemperatur [°C]	12.4 +2.1 °C	11.5 +2 °C	13.9 +2 °C

Die roten Ziffern entsprechen dem Temperaturanstieg im Vergleich zu den Klimadaten von 2022. Bei Unterteilung in die Jahreszeiten fällt auf, dass die Diskrepanzen mit den Zukunftsklimadaten im Sommer größere Abweichungen vorweisen als in den Wintermonaten. Der Jahresmitteltemperaturanstieg entspricht mit $+2\text{ °C}$ den Prognosen des verwendeten Klimapfadszenario.

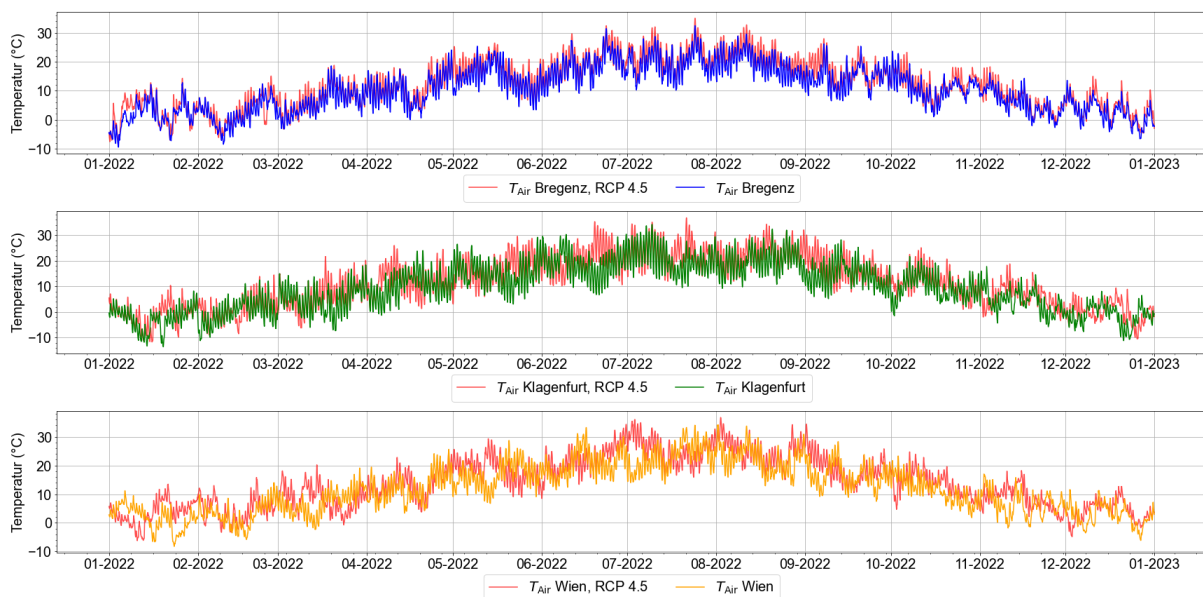


Abbildung 24: Vergleich der Jahrestemperaturkurven von 2022 mit 2060

Die rot gekennzeichneten Linien repräsentieren den Unterschied zwischen den beiden Zeiträumen. Dabei ähneln sich die Kurven des Standortes Bregenz mehr als die anderen zwei Destinationen. Außerdem sind über das Jahr gesehen größere Differenzen in Wien und in Klagenfurt zu erkennen.

Als Fazit zu den Klimadaten kann gesagt werden, dass für eine Bewertung der Klimaentwicklung die Monatswerte und die Jahresmitteltemperatur gute Indikatoren sind, um ein

grundlegendes Verständnis zu erhalten. Der Vergleich von Tagesverläufen verfügt über weniger Aussagekraft, da sich die Spitzen der Temperaturen niemals überschneiden werden, da jeder Verlauf individuell ist und Temperaturänderungen auf den Tag betrachtet träge sein können. Außerdem können unvorhersehbare Ereignisse den Verlauf von Monatstemperaturen verfälschen. Grund dafür wären Phänomene wie El Niño oder La Niña die bei der Wahl des Klimazeitraumes berücksichtigt werden sollten [98]. Die Tendenz zeigt, dass mit einem Eintreffen des Klimaszenarios mit höheren Jahresmitteltemperaturen und höheren Tagesmaximalwerten zu rechnen ist.

4.3 Auswertung der Messaufzeichnungen des Wohngebäudes

Das Kapitel 4.3 beinhaltet die Betrachtung der erhobenen Messdaten in den 15 Wohnungen. Aufgrund von Datenschutzvorgaben werden die Topnummern durch Buchstaben, welche in einer fiktiven Reihenfolge gewählt wurden, ersetzt.

Damit die kritischste Nutzeneinheit als Grundlage für die weiteren Simulationen ermittelt wird, wurden sämtlichen Viertelstundenwerte aller Wohnungen im Jahr 2022 dargestellt und analysiert. Dieses Jahr wurde gewählt, da die anderen Datensätze teilweise über Messfehler oder fehlende Zeiträume verfügen.

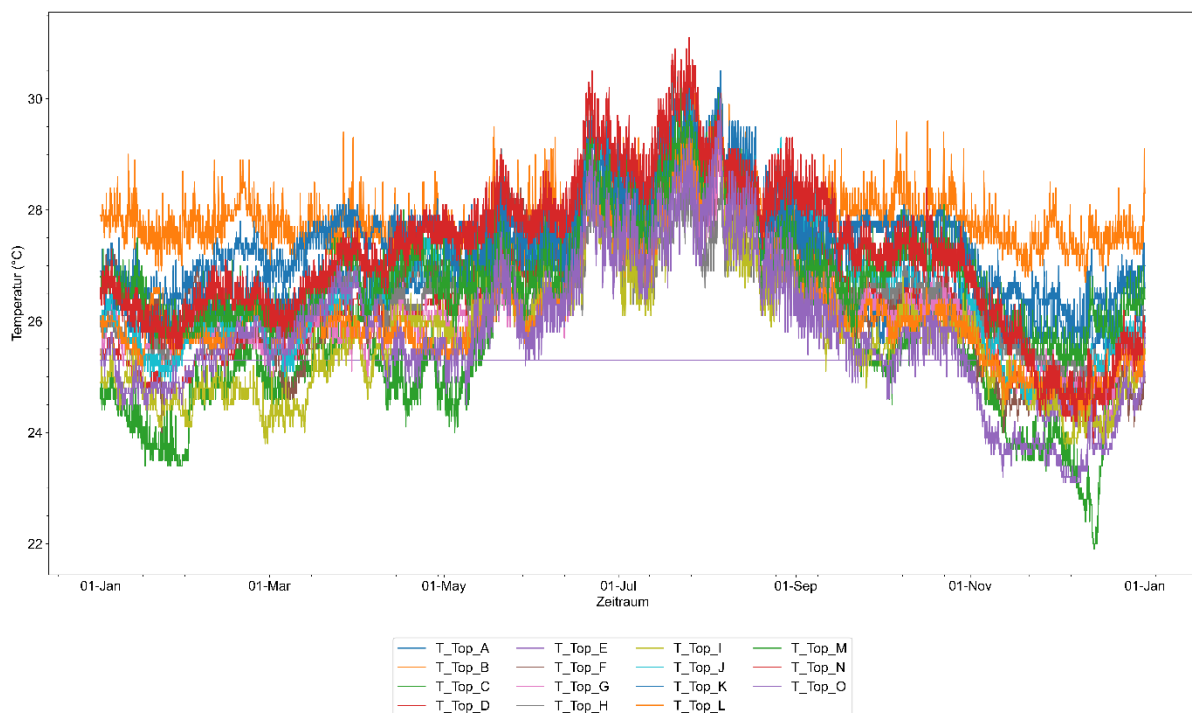


Abbildung 25: Jahresauswertung der Messaufzeichnungen von 2022 der einzelnen Wohnungen

Die Jahreswerte aller Wohnungen wurden betrachtet und zeigten eine minimale Temperatur von 21.83 °C und eine maximale Temperatur von 31.14 °C. Daraus ergibt sich ein Temperaturdifferenzbereich zwischen Ober- und Untergrenze von 9.31 °C. Im Rahmen der Messungen wurden keine operativen Temperaturen im Wohngebäude erfasst. Darüber hinaus liegen keine Informationen darüber vor, wo sich die Temperaturfühler in den Wohnungen befinden. Daher ist es schwierig festzustellen, auf welchen Aufenthaltsraum sich die Auswertungen der Messdaten beziehen. Dieses Wissen wäre jedoch von Bedeutung, da die Erfüllung der Anforderungen gemäß der aktualisierten Version der *OIB-Richtlinie 6* von 2023 die Kenntnis der operativen Temperatur erfordert. Aufgrund der fehlenden Informationen wird die Bewertung der Einhaltung des vorgegebenen Standards anhand der Raumlufthtemperaturen vorgenommen, um Annäherungswerte zu erhalten.

Laut der Richtlinie *OIB-330.6-036/23* ist der sommerliche Wärmeschutz gegeben, wenn [15]:

„die operative Temperatur im Aufenthaltsraum bei einem sich täglich periodisch wiederholenden Außenklima mit dem standortabhängigen Tagesmittelwert $T_{NAT,13}$ die Temperatur von $1/3 \cdot T_{NAT,13} + 21,8$ °C nicht überschreitet, wobei in der Zeit zwischen 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr angenommen werden darf, dass die öffenbaren Fenster so lange geöffnet bleiben, als die Außentemperatur geringer ist als die innere operative Temperatur. Öffenbare Fenster sind in der Zeit zwischen 22:00 Uhr und 6:00 Uhr als geschlossen anzunehmen. Die übrigen Randbedingungen sind entsprechend dem Stand der Technik anzunehmen“.

Für die Auswertung der vorhandenen Datensätze wurde angenommen, dass der Aspekt der Fenster vernachlässigt wird, da keine Informationen über das Lüftungsverhalten der Bewohnenden vorliegen. Alle Messwerte für das Jahr 2022 wurden herangezogen und anhand der vorhandenen Funktion für alle Wohnungen überprüft.

Die Berechnung des standortabhängigen Tagesmittelwerts wurde mit dem Durchschnitt der gemessenen Außentemperaturen des Wohngebäudes in Wolfurt für das Jahr 2022 durchgeführt. Die Wahl des standortabhängigen Tagesmittelwerts ist von Bedeutung, da so die Einflüsse der unterschiedlichen Klimazonen für den jeweiligen Fall berücksichtigt werden.

4.3.1 Ermittlung der kritischsten Nutzeinheit

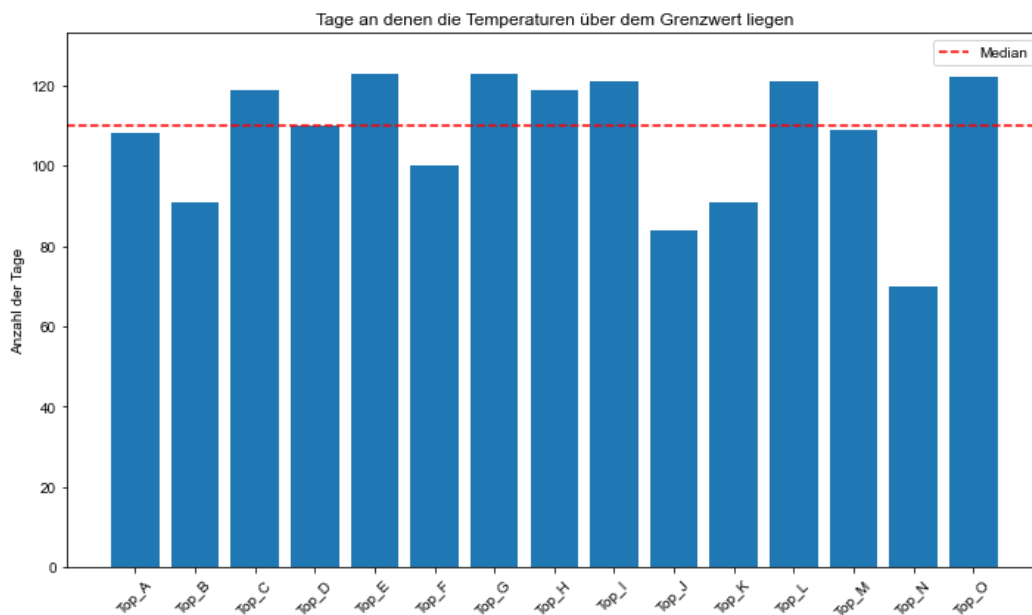


Abbildung 26: Auswertung der Messdaten nach Anforderungen der OIB-Richtlinie 6 2023

Die vorliegende Untersuchung umfasst eine Analyse von 15 Wohnungen, bei denen festgestellt wurde, dass sie im Median 109 Tage über den Anforderungen gemäß der Richtlinie liegen. Es gibt jedoch bemerkenswerte Ausreißer, nämlich bei den Wohnungen "Top_N" mit 70 Tagen und "Top_E" mit 123 Tagen Überschreitung. Wenn man die Daten in Quartile unterteilt, ergibt sich für das erste Quartil eine Überschreitung von 91 Tagen und für das dritte Quartil eine Überschreitung von 121 Tagen.

Es wurde auch der Korrelationsfaktor zwischen der Wohnfläche und der Anzahl der Überschreitungstage berechnet. Der Korrelationsfaktor beträgt -0.24, was darauf hinweisen könnte, dass es eine schwache umgekehrte Beziehung zwischen der Wohnfläche und der Anzahl der Überschreitungstage gibt. Ebenso zeigt der Korrelationsfaktor von -0.52 zwischen der Anzahl der Bewohnenden und der Überschreitungstage eine moderate umgekehrte Beziehung zwischen diesen Variablen. Allerdings gilt zu beachten, dass die Korrelationsfaktoren über keine hohe Aussagekraft verfügen, da die Korrelation umso stärker ist, je näher sie an eins oder minus eins liegen. Dies deutet darauf hin, dass vermutlich eine höhere Anzahl von Bewohnenden mit einer geringeren Anzahl von Überschreitungstagen einhergeht. Die Auswertung der Daten nach der Ausrichtung der einzelnen Wohneinheiten ergab keine zusätzlichen Erkenntnisse über den primären Einflussfaktor für die erhöhte Anzahl von Überschreitungstagen.

Es sollte beachtet werden, dass es in der Literatur keine festgelegte Obergrenze in Form von Stunden oder Tagen gibt, die eine Nutzeinheit überschreiten darf. Daher ist es schwierig zu beurteilen, ob die vorliegenden Ergebnisse als angemessener Richtwert gilt oder nicht. Möglicherweise sind keine spezifischen Kennzahlen definiert, da der Tagesmittelwert, welcher von Standort zu Standort variiert, in die Gleichung integriert ist. Dadurch wird eine umfassende Bewertung für ganz Österreich erschwert. Es kann jedoch festgestellt werden, dass einige Nutzeinheiten ein Drittel des gesamten Jahres über dem Grenzwert liegen.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann keine genaue Identifizierung der kritischsten Nutzeinheit vorgenommen werden. Daher wurden weitere Analysen im Zeitraum von Mai bis August 2022 durchgeführt. Dabei wurden Kriterien wie die minimalen und maximalen Temperaturen, die durchschnittliche Temperatur sowie die Anzahl der Stunden über 25 °C und 27 °C berücksichtigt. Anhand der Auflistung nach Überschreitung der Grenzwerte sind als erste Abschätzung „Top_N“ und „Top_J“ als „sommertauglich“ zu bewerten. Konträr betrachtet sind die Wohnungen „Top_E“, „Top_G“ und „Top_O“ vorerst als nicht sommerfit zu deklarieren.

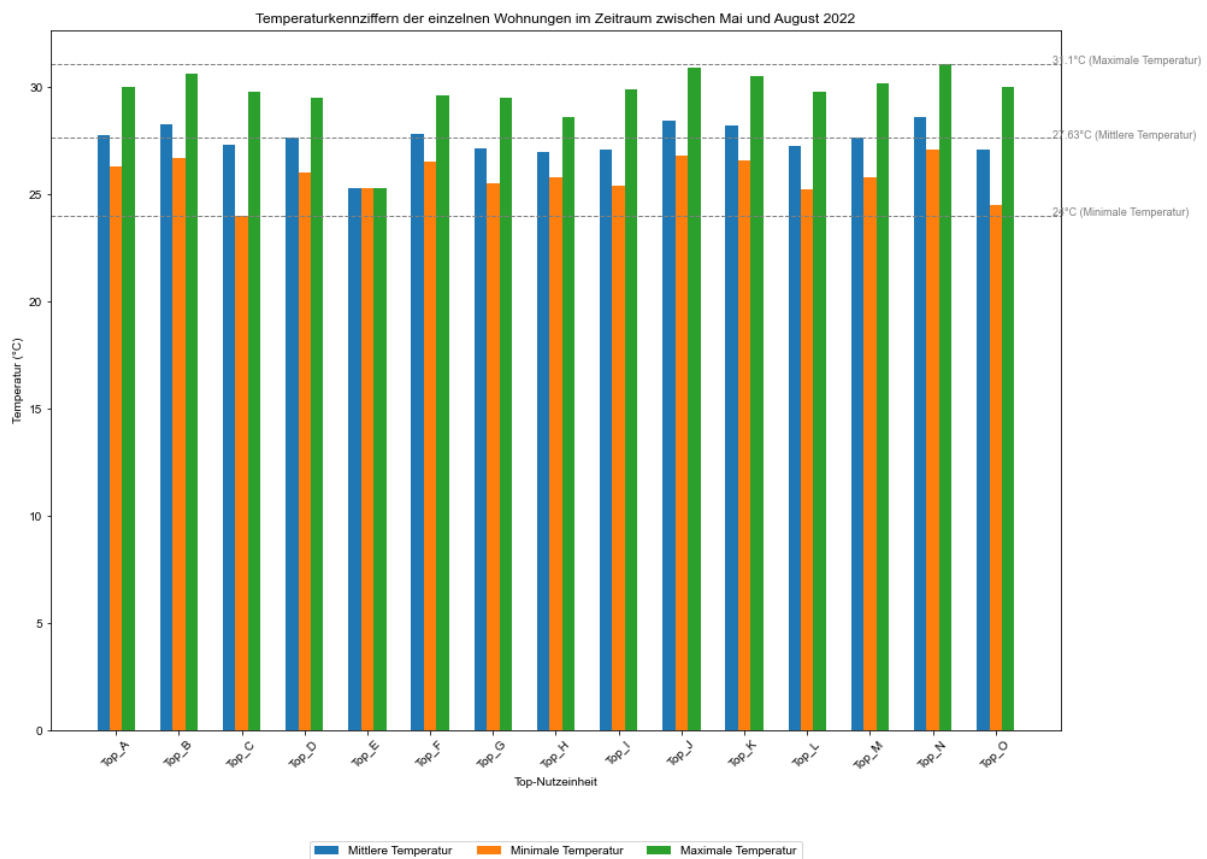


Abbildung 27: Mittel, Minimal- und Maximaltemperaturen der einzelnen Wohnungen zwischen Mai und August 2022

In dem Zeitraum zwischen Mai und August 2022 befinden sich die Messwerte für das Wohngebäude in einem Bereich zwischen 21 °C und 31.1 °C. Im Durchschnitt beträgt die Mittelwerttemperatur der 15 Wohneinheiten über die vier Monate bei 27.63 °C. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass es sich um Tagesmittelwerte handelt und somit nicht gesagt werden kann, ob eine Wohnung vermehrt Stunden im oberen Bereich aufweist. Die mittleren Temperaturen der Nutzeinheiten schwanken zwischen 25.3 °C und 28.62 °C. Für die Minimalwerte ergibt sich ein Bereich von 24 °C bis 27.1 °C und für die Maximalwerte zwischen 25.3 °C und 31.1 °C.

Auffallend bei der Abbildung sind dieselben Werte für die unterschiedlichen Kategorien der Nutzeinheit „Top_E“. Dies lässt darauf schließen, dass in diesem Zeitraum für diese Wohnung keine oder nur beschränkte Datenaufzeichnungen vorhanden sind und deshalb nicht näher betrachtet wird, obwohl diese Wohneinheit bei der Überschreitung der Grenzwerte noch als Option als kritischste Nutzeinheit in der engeren Auswahl war.

Tabelle 4: Bewertungsvariante zur Ermittlung der kritischsten Nutzeinheit

Wohnung	T_{mittel} [°C]	T_{min} [°C]	T_{max} [°C]	T_{mittel} + (T_{max} - T_{min}) [°C]
Top A	27.75	26.3	30.0	31.45
Top B	28.24	26.7	30.6	32.14
Top C	27.32	24.0	29.8	33.12
Top D	27.67	26.0	29.5	31.17
Top E	25.30	25.3	25.3	25.3
Top F	27.82	26.5	29.6	30.92
Top G	27.16	25.5	29.5	31.16
Top H	26.95	25.8	28.6	29.75
Top I	27.07	25.4	29.9	31.57
Top J	28.42	26.8	30.9	32.51
Top K	28.22	26.6	30.5	32.12
Top L	27.23	25.2	29.8	31.83
Top M	27.64	25.8	30.2	32.04
Top N	28.62	27.1	31.1	32.62
Top O	27.08	24.5	30.0	32.58

Als zweite Bewertungsvariante wurden die Temperaturdifferenzen zwischen den Minimal- und Maximaltemperaturen ermittelt und zur mittleren Temperatur addiert. Mit dem ΔT soll eine Abschätzung über die Temperaturspanne getroffen werden. Die Addition mit der mittleren Temperatur soll dabei dann die absolute mögliche Obergrenze darstellen, wobei es sich hierbei nur um ein vereinfachtes Berechnungsmodell handelt. Aufgrund dieses Verfahrens sind

die Nutzeinheiten „Top N“ und „Top O“ von Relevanz. Bis auf die Wohneinheit „Top H“ sind sämtliche Ergebnisse über 30 °C.

Das letzte Bewertungskriterium zur Entscheidung der kritischsten Nutzeinheit in dem Wohngebäude ist die Beurteilung nach Überhitzungsstunden. Die Nachweisführung für den sommerlichen Wärmeschutz für Wohngebäude in Österreich wird gemäß *ÖNORM B 8110-3* vorgegeben. Dabei muss anhand des Tagesverlaufs die operative Temperatur kalkuliert werden. Diese darf die Maximaltemperatur von 27 °C und besonders in Ruheräumen im Zeitraum zwischen 22:00 und 06:00 25 °C nicht überschreiten [99]. Unter Einbeziehung dieser Vorgaben wurden die Temperaturgrenzen gesetzt und ausgewertet wie viele Stunden wie in den oben verwendeten Zeitraum die beiden Temperaturen überschritten haben. Abweichend von der *ÖNORM B 8110-3* wird in dieser Betrachtung die Lufttemperatur herangezogen, da keine Messwerte zur operativen Temperatur vorliegen.

Während dem Zeitraum im August 2022 liegen sämtliche Temperaturaufzeichnungen für die gesamten Wohnungen über dem Grenzwert von 27 °C. Einzig die Wohnung „Top_C“ verfügt über Temperaturen unter 25 °C zwischen Mai und August 2022.

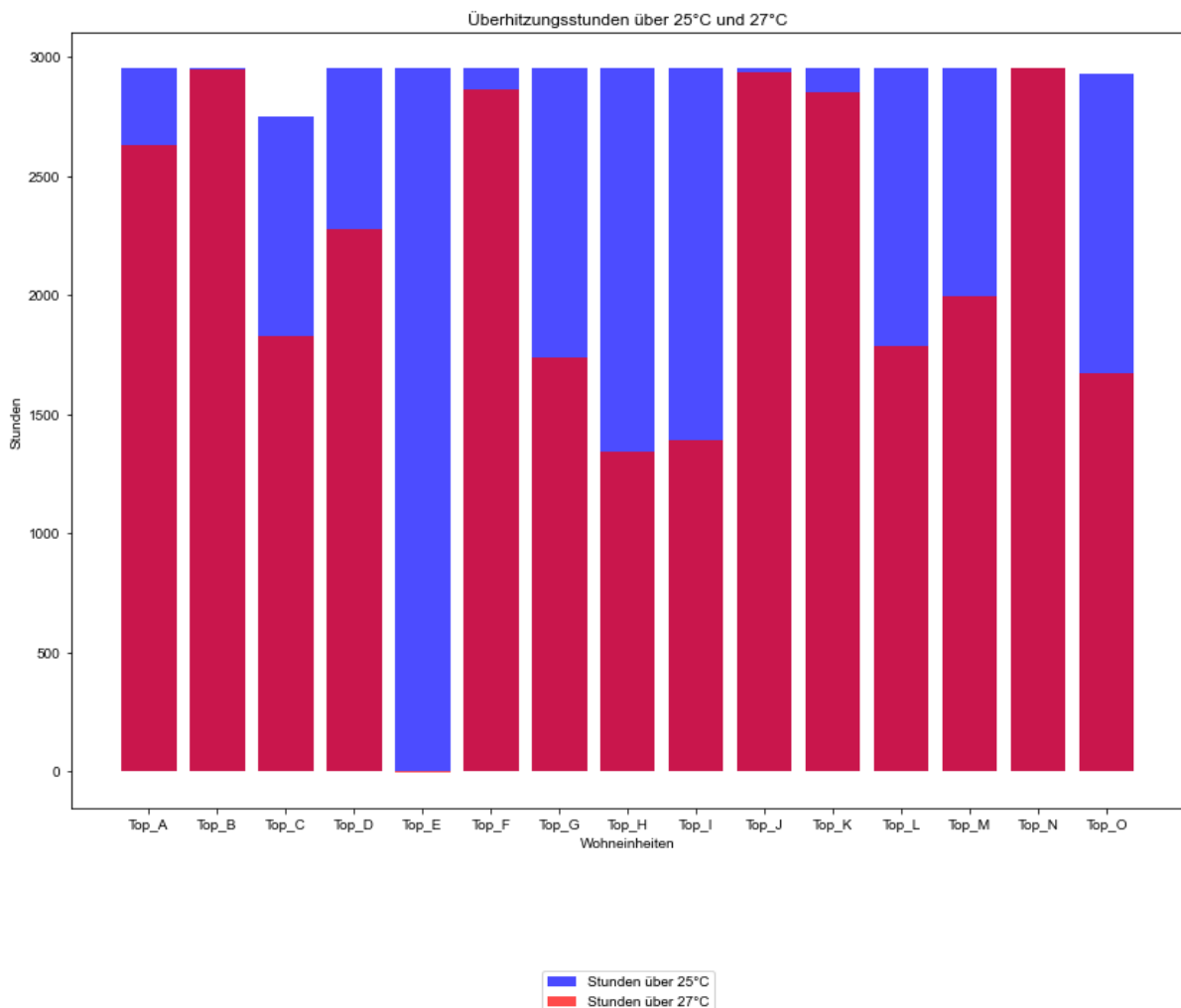


Abbildung 28: Überhitzungsstunden der einzelnen Wohneinheiten im Zeitraum zwischen Mai und August 2022

Die Abbildung 28 verdeutlicht die unterschiedlichen Gegebenheiten in den einzelnen Wohnungen. Dabei wird ersichtlich, dass einige Wohneinheiten wie „Top_H“ und „Top_J“ im Sommer begünstigter sind als „Top_B“ oder „Top_N“. Wie oben bereits erwähnt täuscht das Resultat von „Top_E“ und darf daher nicht berücksichtigt werden. Ein großer Anteil der Messwerte liegt über 27 °C, was sich auch in den Gesamtstunden von 31.255 Stunden für das gesamte Gebäude widerspiegelt. Für die untere Temperaturgrenze sind es 44.115 Stunden womit die durchschnittliche Wohnung 2941 Stunden über 25 °C und 2083 Stunden über 27 °C liegt. Somit befinden sich 71 Prozent der Stunden in den Sommermonaten über den Vorgaben der ÖNORM.

Anhand der drei untersuchten selbstfestgelegten Bewertungskriterien handelt es sich bei der Wohneinheit „Top_N“ um die kritischste Nutzeinheit im Wohngebäude. Zwar erzielen einige andere Wohnungen ähnliche Resultate, jedoch waren die hohen Werte bei den Minimal-, Mittel-, und Maximaltemperatur ausschlaggebend für die Entscheidung.

4.3.2 Betrachtung der heißesten Woche in der kritischen Nutzeinheit

Da die kritischste Nutzeinheit fündig gemacht werden konnte, wird für die Einordnung der Ausmaße der sommerlichen Überhitzung die Woche mit der höchsten Durchschnittstemperatur näher betrachtet. Diese ist laut Aufzeichnung die letzte Juli Woche von 25.07 bis zum 31.07.2022.

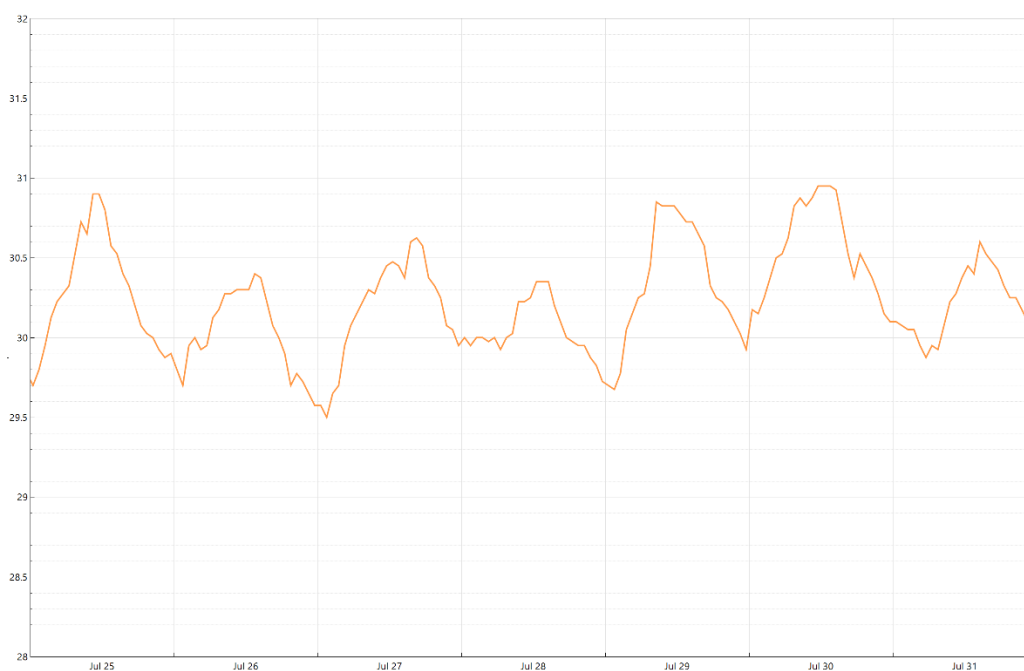


Abbildung 29: Temperaturverlauf der heißesten Woche der Messaufzeichnungen

Zu erkennen ist, dass die Kurve während der gesamten Woche keinen Wert unter 29 °C vorweist und die Höchsttemperaturen bei ungefähr 31 °C liegen. Außerdem sind die Abkühlungsphasen während der Nacht ersichtlich. Betrachtet man die höheren Temperaturen gegen Ende der Woche, könnte man daraus schließen, dass vermehrt die Personen zu Hause waren. Allerdings handelt es sich hierbei nur um eine Vermutung, da die Außentemperatur und die Solarstrahlung für diese Betrachtung miteinbezogen werden sollten. Ein weiteres wichtiges Kriterium für den Komfortfaktor des Menschen ist die relative Luftfeuchtigkeit, da diese bestimmt, wie ein Mensch die Lufttemperatur wahrnimmt. Dabei gilt nach dem Modell von Frank W. die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 20 Prozent und 60 Prozent bei 24 °C noch als behaglich. Bei Erhöhung der Temperatur auf 26 °C reduziert sich der Wert auf 40 Prozent [100]. Die letzte Juli Woche 2022 verzeichnet relative Luftfeuchtigkeitswerte im Bereich von 35 Prozent bis 50 Prozent, allerdings bei Temperaturen über der Behaglichkeitsgrenze. Bezüglich der Luftqualität bewegt sich die CO₂-Konzentration zwischen 420 ppm und 580 ppm.

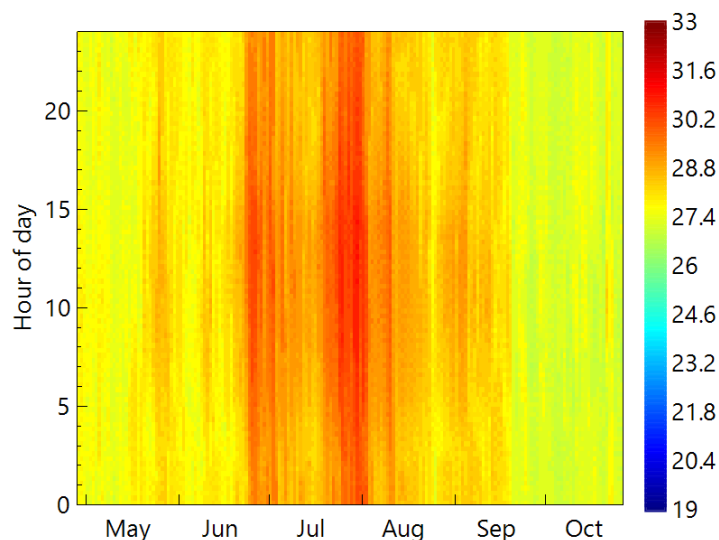


Abbildung 30: Heatmap über die 24 Stunden in den Sommermonaten

Die Abbildung 30 verdeutlicht, den Verlauf der Temperaturen über den gesamten Tag. Anhand dessen können Rückschlüsse gezogen werden, ob es während der Abendstunden zu einer Auskühlung beziehungsweise deutlichen Reduktion der Temperatur aufgrund der Nachtlüftung kommt. Dem scheint nicht so, da zwischen 00:00 und 23:00 keine wesentliche Veränderung zu erkennen ist. Die Heatmap gibt zudem die Möglichkeit die Diskrepanz zwischen dem Sommer und den anderen Jahreszeiten zu erkennen und die Auswirkung einzuschätzen. Bei Betrachtung der Luftqualität und der relativen Feuchtigkeit zeigen die Messdaten, dass

aufgrund der Lüftungsanlage keine natürliche Belüftung angewendet wird. Die hohen Temperaturen in der Wohnung sind teils der Personenanzahl und der Ausrichtung der Wohnung verschuldet. Über die Verwendung der Sonnenschutzvorrichtung der Bewohnenden können keine Aussagen getroffen werden. Allerdings zeigt der Vergleich von Wohnungen mit ähnlicher Personenanzahl und Ausrichtung, dass das Nutzerverhalten und damit auch die internen Gewinne miteinbezogen zu Diskrepanzen von 1 bis 1.5 Kelvin führen können.

4.4 Modellierung des Gebäudes und Vergleich mit den Realmessdaten

Das Referenzgebäude wird gemäß den Angaben aus 2.1 nachgebildet. Dafür werden die einzelnen Wandteilaufbauten und Fenster wie im Energieausweis aufgebaut. Die Fläche sämtlicher Wohnungen wird den Bauplänen entnommen und konstruiert. Für die Vereinfachung werden Innenwände und Zimmer vernachlässigt. Die 15 Wohneinheiten verteilen sich mit drei Wohneinheiten im Erdgeschoss und jeweils vier Wohnungen aufgeteilt auf das erste bis dritte Stockwerk. Das Stiegenhaus und der Lift werden separat abgebildet und sind nicht konditioniert.

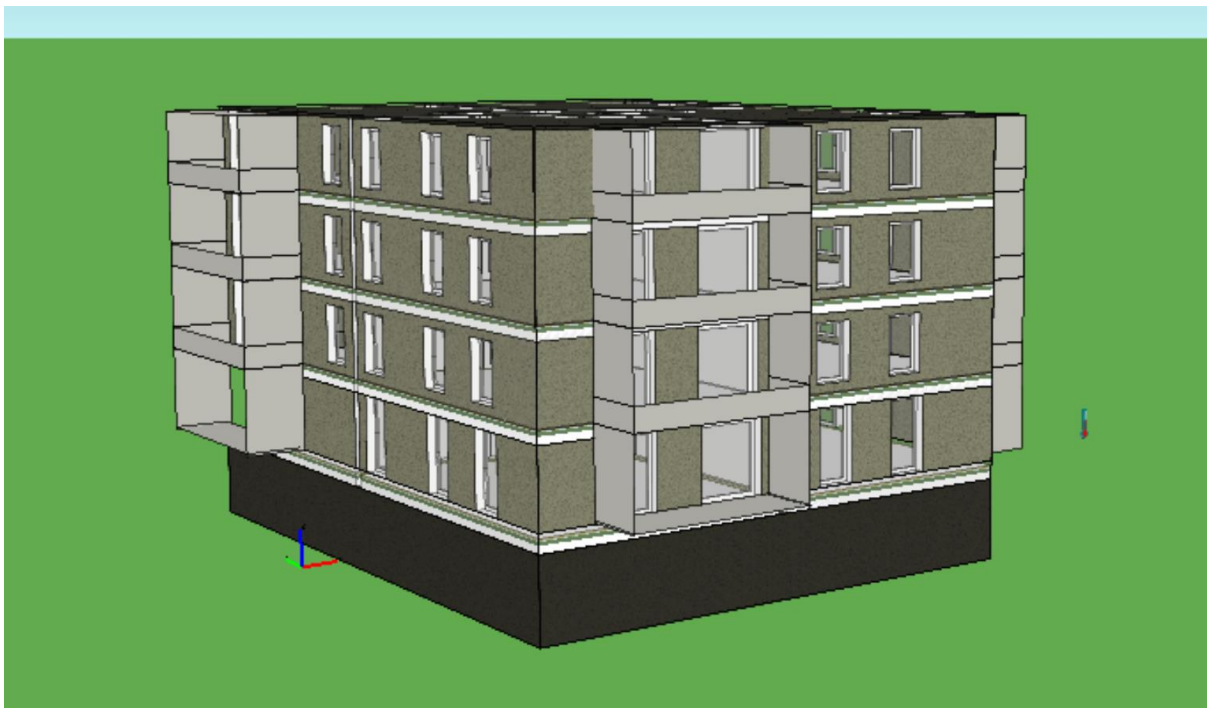


Abbildung 31: Modellierung des Referenzgebäudes in Wolfurt

Sämtliche Gegebenheiten des Gebäudes werden mit Ausnahme der Klimadatenätze in *IDA ICE* erstellt. Die Klimadatenätze werden von *Meteornorm* generiert und in das Programm eingepflegt. Abbildung 32 repräsentiert die grundlegende Aufteilung eines Stockwerkes im Gebäude. Bei der rotgezeichneten Fläche handelt es sich um eine Zonierung einer

Wohneinheit. Die gesamten Fenster entsprechen den Positionen und der Größe anhand des Bauplans.

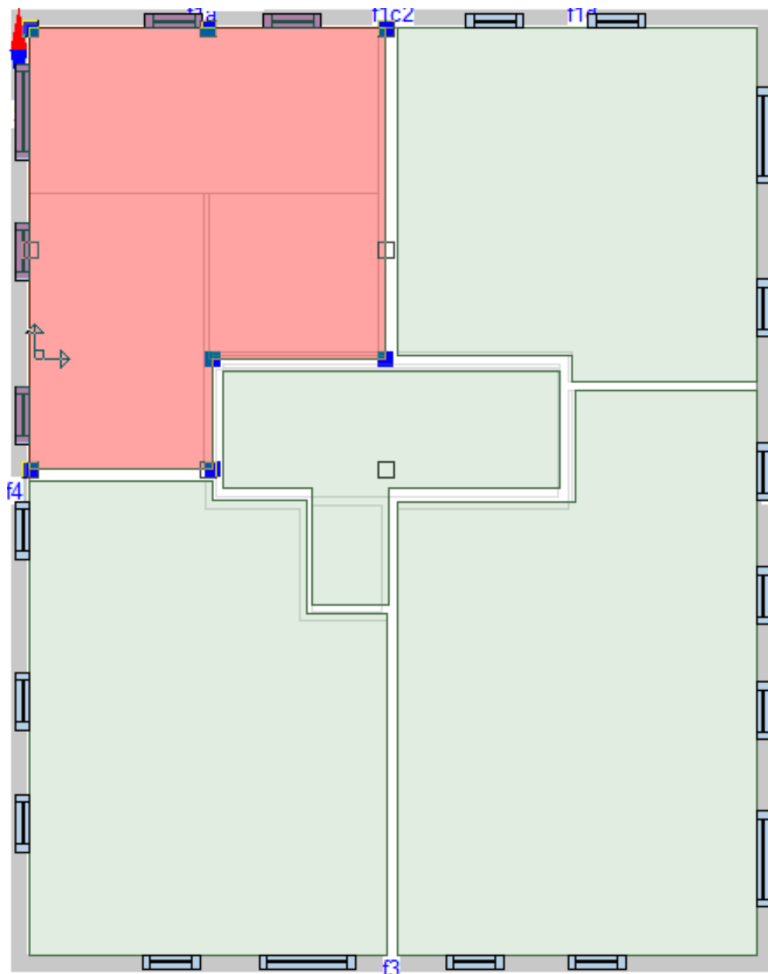


Abbildung 32: Grundrissmodell einer Wohneinheit

Die Stockwerke eins bis drei weisen allesamt die gleiche Wohnaufteilung bezüglich der Größe der Wohnfläche auf. Einzig das Erdgeschoss verfügt über drei anstelle vier Wohneinheiten. Die rot gekennzeichnete Wohnung links oben im Grundrissmodell stellt im Erdgeschoss einen überdachten Eingangsbereich dar.

4.4.1 Modellparameter und Annahmen

Folgend werden die angewendeten Annahmen für die Modellierung des Referenzgebäudes erläutert.

4.4.1.1 Nutzungsprofil

Damit der Einfluss der Bewohnenden berücksichtigt wird, müssen gewisse Nutzungsprofile erstellt werden. Für die Belegungsanzahl der Personen werden in den jeweiligen Wohnungen

die Anzahl an Menschen hinterlegt, wie sie die Umfrage des *Energieinstituts Vorarlbergs* ergeben hat. Die internen Gewinne aufgrund von Geräten und Anzahl der Anwesenheitsstunden werden gemäß der Schweizer Norm *SIA2024* angewendet [44]. Die Norm geht davon aus, dass die Bewohnenden von 22:00 bis 06:00 Uhr zu 100 Prozent anwesend sind und sich dieser Wert anschließend auf 80, 60 und 40 Prozent mindert. Im Zeitraum untertags sind sieben Stunden vorhanden, in denen keine Aktivität angenommen wird aufgrund von Tätigkeiten außerhalb der Wohnung. Gesamt entspricht das Lastprofil für die Bewohnenden bei 17 Nutzungsstunden beziehungsweise 14 Volllaststunden am Tag. Auf das Jahr betrachtet ergibt das 4090 Volllaststunden, da Tage außerhalb der Wohnung wie Urlaub miteingerechnet werden. Der einzige Unterschied beruht auf der Änderung der Personenanzahl anstelle der Normwerte mit Nettogeschossfläche von 30 m² / Person wie oben bereits erwähnt. Im Durchschnitt befinden sich in den 15 Wohneinheiten jeweils 2.6 Menschen.

Die Geräte im Gebäude sehen 6.1 Volllaststunden bei acht Watt pro Quadratmeter vor und jährlicher Volllaststunden von 1780 h. Primär kommen die Geräte in den Zeiten um 07:00, 13:00 und den Abendstunden zwischen 19:00 und 20:00 Uhr zum Einsatz.

Bezüglich der Beleuchtung sind 50 Lumen pro m² vorgesehen, wobei die elektrische Leistung 2.7 W/m² beträgt. Für die Stunden zwischen 07:00 und 18:00 Uhr sind vier Stunden vorgesehen und für 18:00-07:00 Uhr drei Stunden, womit die jährlichen Volllaststunden 1450 Stunden betragen.

4.4.1.2 Lüftungsanlage

Gemäß der *OIB6-Richtlinie 2023* darf die Luftwechselrate n_{50} bei Neubauten den Wert 1.5 h⁻¹ nicht überschreiten [15]. Somit kann eine Luft- und Winddichtheit der Gebäudehülle gewährleistet werden. Für das Modell wird daher bei einer Druckdifferenz von 50 Pa eine Luftwechselrate von 0.6 angenommen, da eine mechanisch betriebene Lüftungsanlage vorliegt. Da keine näheren Informationen zur Lüftungsanlage vorliegen wird anstelle des komplexen Aufbaus die vereinfachte Variante ausgewählt. Außerdem wird der Wirkungsgrad des Kühl- und Heizregisters auf null gestellt. Die Lüftungsanlage unterstützt mit der Wärmerückgewinnung die Wärmeerzeugung im Gebäude. Dabei wird der Wirkungsgrad der WRG auf 0.77 festgelegt, um den Realmesswerten anzunähern.

Je nach Wohneinheit stehen zwischen 40 bis 60 m³ Luft pro Stunde zur Verfügung, anhängig von der vorgegebenen Bewohnendenanzahl. Damit die Luftqualität und der Komfort gegeben sind, liegen die Grenzen bei der Kohlendioxidkonzentration bei 700 und 1100 ppm und für die relative Feuchtigkeit zwischen 20 und 80 Prozent.

Damit die Infiltrationsrate des Windes auf das Gebäude berücksichtigt wird, werden die vorhandenen Werte seitens des Programms verwendet. Da das Gebäude in einer eher städtischen Umgebung befindet wird die Auswahl „semi exposed“ ausgewählt und weist folgende Vordefinitionen auf:

Face \ Angle	0	45	90	135	180	225	270	315	Face azi...
Building body									
f1a	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	0.0
f1c2a	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	270.0
f1c2b	0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.2	0.0
f1d	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	0.0
f2	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	90.0
f3	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	180.0
f4	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	270.0
Crawl space	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0
Building body1									
f1a	0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.2	360.0
f1c2	0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.2	0.0
f1d	0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.2	0.0
f2	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	90.0
f3	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	180.0
f4	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	270.0
Crawl space	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Roof	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0

Abbildung 33: Infiltrationsrate "semi exposed"

4.4.1.3 Wärmebrücken

Bei einer Wärmebrücke handelt es sich um eine Abweichung des Wärmestroms aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen auf der Innen- und Außenseite von homogenen Bauteilen. Dabei fließt der Wärmestrom anhand des geringsten Widerstands von der warmen zur kalten Seite des Bauteils. Prinzipiell kann zwischen konstruktiven und geometrischen Wärmebrücken unterschieden werden. Für die Anforderungen von Passivhäuser sollen Gebäude so geplant werden, dass Wärmebrücken vermieden oder zumindest auf ein Minimum reduziert werden können [101]. Wärmebrücken erzeugen erhöhte Wärmeverluste und sind daher von Relevanz für die Modellierung des Gebäudes.

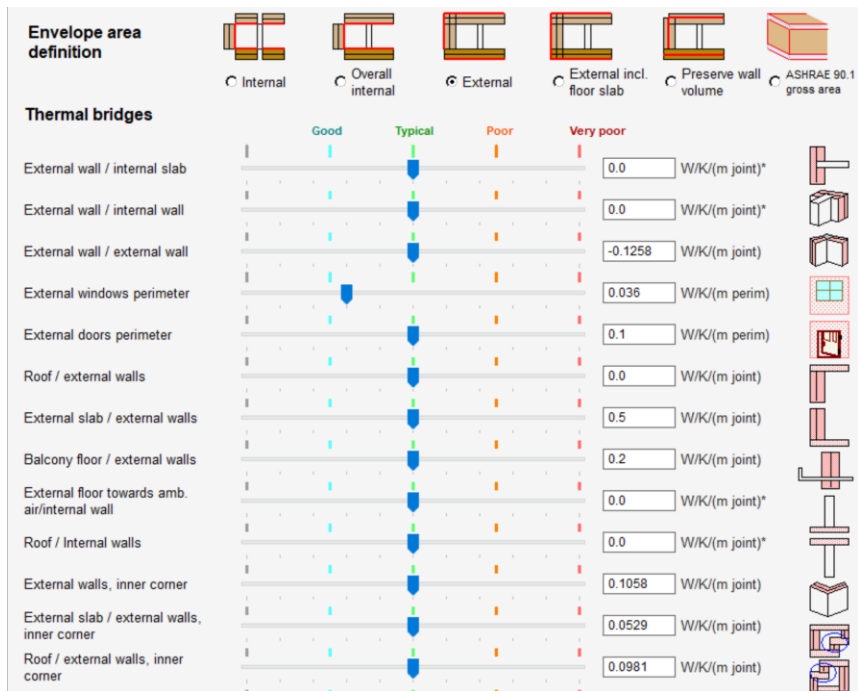


Abbildung 34: Wärmebrücken im Referenzgebäude

Da keine detaillierten Messungen zur Identifizierung der Wärmebrücken stattgefunden haben werden typische vordefinierte Werte vom Programm angenommen.

4.4.1.4 Fenster und Verglasung

Sämtliche Fenster im Gebäude sind mit einer 3-fach Sonnenschutzverglasung Argon mit einem U_g -Wert von $0.55 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgestattet. Dabei beträgt der g -Wert 0.47 und lässt somit 47 Prozent der Gesamtstrahlungsenergie in die Wohnungen. Die Tiefe der Fenster in der Gebäudehülle betragen 29 Zentimeter. Für die Betrachtung der sommerlichen Überhitzung sind die Annahmen der Sonnenschutzvorrichtung und das Lüftungsverhalten der Bewohnenden von Relevanz. Die Anwendung der Sonnenschutzvorrichtung wird dabei mittels Sonnenstrahlung und einem vorgegebenen Zeitplan umgesetzt. Für die Erfüllung der Kriterien der *OIB-Richtlinie 6 2023* beträgt der g_{tot} -Wert der außenliegenden Sonnenschutzvorrichtung bei 0.14 und somit unter der geforderten Grenze von ≤ 0.15 [15]. Wegen fehlender Kenntnisse über das Benutzerverhalten der Bewohnenden müssen diese angenommen werden.

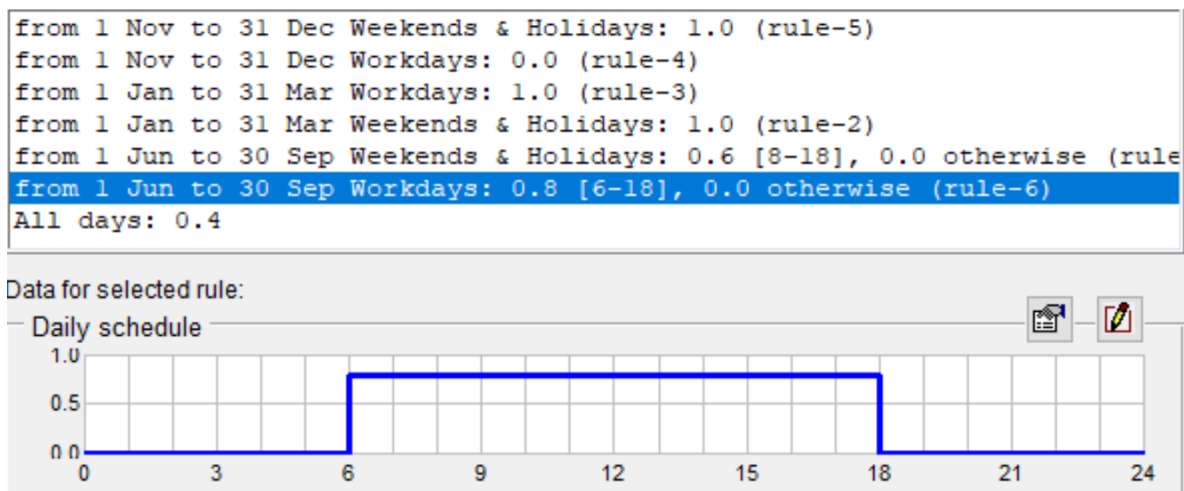


Abbildung 35: Zeitplaneinstellung der Sonnenschutzvorrichtung [93]

Während den Wintermonaten wird je nach Anwesenheit der Bewohnenden die Jalousien komplett geschlossen oder geöffnet. An Wochenenden oder während des Urlaubs werden sie geschlossen, um die Wärmeabgabe zu reduzieren und als Schutzeinrichtung gegen äußere Einflüsse. Damit die Wohneinheiten bei Anwesenheit der Personen ausreichend Sonnenlicht für die solaren Gewinne und Helligkeit erhalten, wird die Jalousie vollständig geöffnet. In den Monaten von Juni bis September wird die außenliegende Verschattung während der Arbeitszeit weitestgehend geschlossen, um angenehme Temperaturen zu ermöglichen. An den Wochenenden oder Feiertagen wird der Faktor auf 0.6 gesetzt, damit die Wohnung noch hell genug für Tätigkeiten innerhalb des Gebäudes ist. Außerhalb der oben definierten Zeiträume werden die Jalousien auf 0.4 festgelegt.

Für die Fensterlüftung wird mittels PI-Temperaturregler und festgelegtem Zeitplan geöffnet und geschlossen. In den Monaten von April bis Oktober beträgt die Fensterlüftung zwischen 08:00 und 19:00 bei 0.1 und während den anderen Monaten bei null. Dieser Wert resultiert daraus, dass keine Innenwände oder Türen vorhanden sind und somit kein zu hohem Luftwechsel vorliegt. Diese Annahme dient nicht dem Luftaustausch in den einzelnen Wohnungen, sondern die Abführung der überschüssigen Wärme. Für die Luftqualität wird die Lüftungsanlage verwendet, damit ein ausreichender Austausch in den Wohnungen gewährleistet ist.

4.4.2 Resultate der Modellsimulation in Bregenz

Mit dem Klimadatensatz von *Meteornorm* für das Jahr 2022 wurden Simulationen durchgeführt, um die gemessenen Temperaturen von Wolfurt zu analysieren. Diese zeigten, dass das Nutzerverhalten eine wesentliche Rolle für den Komfort in Wohnungen spielt.

Tabelle 5: Vergleich kritischste Nutzeinheit gemessene Werte im Vergleich zu den Simulationen

Vergleichswert	Top_N_Real	Top_N_Simulation	Abweichung
Minimumtemperatur [°C]	24.2	21.9	-2.3 °C
Maximaltemperatur [°C]	31.1	27.4	-3.7 °C
Stunden > 25°C	8040	2774	-5266 h
Stunden > 27°C	5112	5.7	-5106 h

Der Monat Dezember 2022 ist der einzige Zeitraum, bei dem in der Realitätsdaten Temperaturen unter 25 °C verzeichnet werden. Somit ist davon auszugehen, dass die Bewohnenden durchgängig über das Jahr die Heizung im Gebrauch haben. Außerdem gibt es bei Betrachtung der Maximaltemperatur und den Stunden über 27°C Grund zur Annahme, dass aufgrund von internen Gewinnen und überschüssigen solaren Gewinnen durch den Menschen erhöhte Temperaturen auftreten. Eine Analyse der Außentemperaturen ergab, dass diese eine große Abweichung betreffend der Maximal, Minimal und Mitteltemperatur aufweisen. Dabei wurde für die Messaufzeichnungen in Wolfurt und die Meteornormdaten für Bregenz die heißeste Woche rausgefiltert. Die Aufzeichnungsschritte liegen dabei für die Realdaten bei Viertelstundenwerte und bei Meteornorm bei Stundenwerte. Der Vergleich zeigt, dass der Zeitraum auf das Jahr gesehen in etwa derselbe ist.

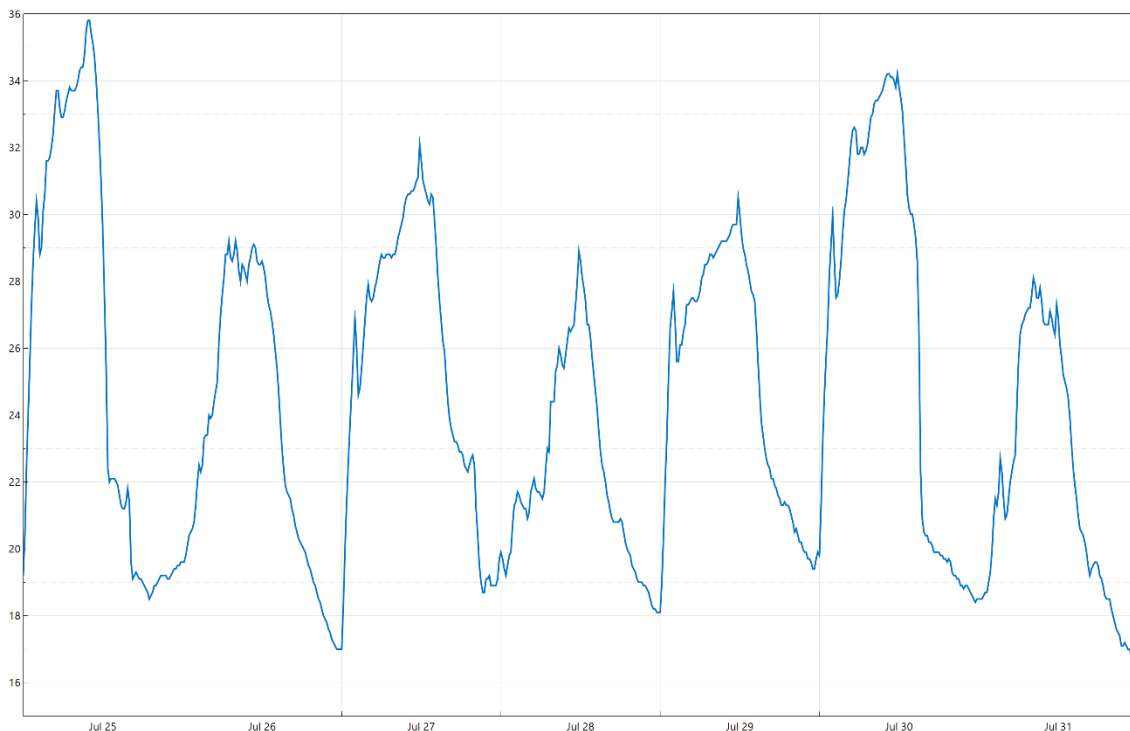


Abbildung 36: Messaufzeichnungen der Außentemperatur in Wolfurt 25.07-31.07.2022

Maximaltemperatur [°C]	31.1	28.3	-2.8 °C
Stunden > 25 °C	8040	3495	-4545 h
Stunden > 27 °C	5112	138.7	-4973 h

Beim Vergleich der beiden Jahrestemperaturkurven fällt auf, wo der Unterschied zwischen Realität und Simulation liegt. *IDA ICE* hält sich an die Temperaturgrenzen und schreitet ein, sobald diese erreicht werden. Während den Sommermonaten zeigen die gemessenen Daten, dass die Option der Nachtlüftung weitestgehend nicht zur Anwendung kommt.

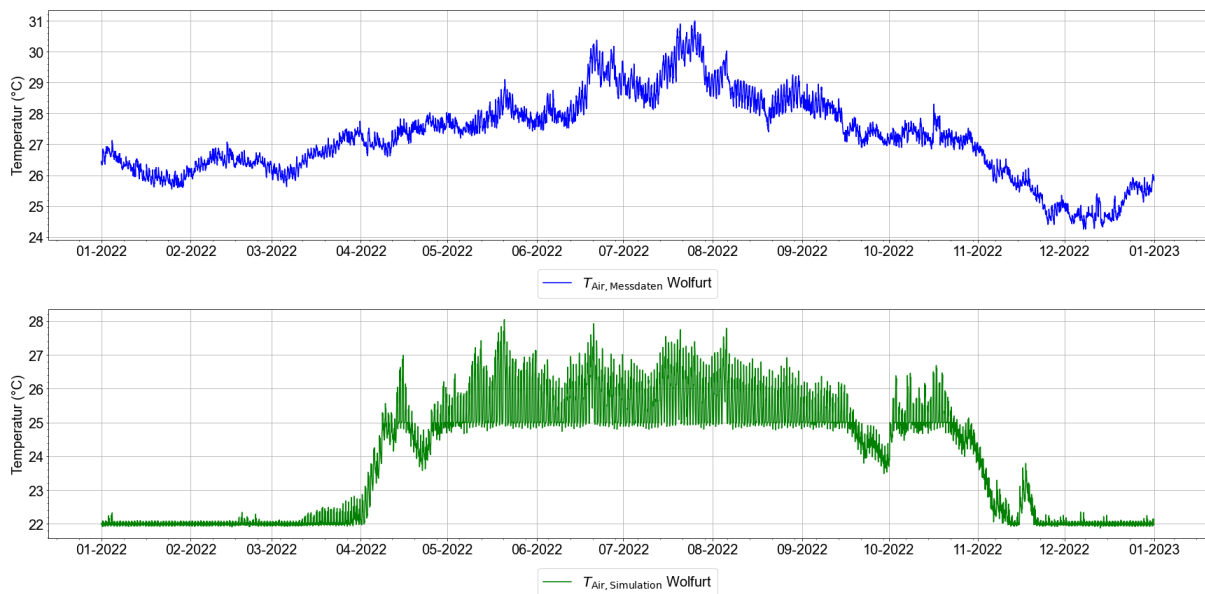


Abbildung 38: Vergleich von Top_N real gemessen und simuliert im Jahr 2022

Außerdem fällt in den Wintermonaten auf, dass konstant Temperaturen über 24 °C vorhanden sind und somit die Heizleistung von den Nutzern festgelegt wird. Um die Abweichung des Nutzerverhaltens in etwa abschätzen zu können mussten ähnliche Grundvoraussetzungen vorliegen.

Mit der Implementierung derselben Außentemperaturen kann dieser Aspekt für die Beeinflussung der Abweichung ausgeschlossen werden. Das Resultat zeigt, dass sich die Maximaltemperatur verändert hat und die Stundenanzahl über 25 °C bzw. 27 °C zugenommen haben. Allerdings bleiben bei den Stunden große Diskrepanzen bestehen. Für diese Unterschiede bleiben noch das Nutzerverhalten und Fehler im Modell zum Realgebäude in Frage. Da für die Zukunftsbetrachtung das Modellgebäude bestehen bleibt, werden diese übernommen und die Abweichung des Nutzerverhaltens sollte bei den Endresultaten noch berücksichtigt werden.

4.5 Durchführung der passiven Sonnenschutzmaßnahmen

Für die Validierung der Umsetzbarkeit von passiven Maßnahmen in Anbetracht an das zukünftige Klima wurden folgende Simulationen durchgeführt:

- Maßnahmenpaket 1: Entfernung sämtlicher Balkone bzw. Loggias bei Annahmen wie in 4.4.1.4

Dieses Paket gilt nur teilweise als passiv, da dieser Punkt nach der Errichtung eines Gebäudes nicht nachträglich nachgerüstet werden kann. Die Simulation soll ein Anreiz für Bauunternehmer:innen und Architekten:innen sein, bereits während der Planungsphase diesen Aspekt zu berücksichtigen.

- Maßnahmenpaket 2: Erhöhung der Nachtlüftungsrate

Damit die überschüssige Wärme aus den Wohnungen entfernt werden wird die Nachtlüftungsrate erhöht und es findet ein 2.5-facher Nachluftwechsel statt. Theoretisch ist ein höherer Luftwechsel in der Praxis möglich, allerdings sind im Simulationsgebäude keine Wände und Möbel vorhanden, womit ein zu hoher Luftaustausch stattfinden würde. Zudem sind die erhöhten Luftwechselraten nicht in jedem Geschoss möglich.

- Maßnahmenpaket 3: Hohe Nutzung der außenliegenden Verschattung + Paket 2

Um die solaren Gewinne und damit den Wärmeeintrag noch weiter zu reduzieren wird der Verwendungsgrad der außenliegenden Verschattung noch erhöht. Dabei wird die Jalousie während den Stunden außerhalb der Wohnung im Zeitraum von 07:00 bis 18:00 Uhr komplett geschlossen und anschließend bis 21:00 Uhr um ein Viertel geöffnet. Außerdem sind sie während der Urlaubszeit Tag und Nacht geschlossen.

Das Maßnahmenpaket 3 soll anschließend Aufschluss geben, ob es künftig noch möglich sein wird mittels passiven Sonnenschutzmaßnahmen die Temperaturgrenzwerte einzuhalten.

5 Ergebnisse

Das Kapitel 5 stellt die Resultate der Simulationen der drei Standorte Bregenz, Klagenfurt und Wien dar. Dabei wird auf die Entwicklung der Wohnungstemperaturen unter dem Einfluss des Klimawandels von heute im Vergleich zum Klimaszenario *RCP4.5* im Jahr 2060 eingegangen, wobei sämtliche Annahmen und Gebäudedaten aus Kapitel 4 stammen. Die Bewertungskriterien entsprechen dabei den Methoden zur Einschätzung der Überhitzung von unterschiedlichen Ländern in Europa, um nicht nur anhand eines Wertes eine Aussage zu treffen [24].

Tabelle 7: Resultate der Simulation 2022

KPI	Bregenz	Klagenfurt	Wien
Minimaltemperatur [°C]	21.2 °C	20.1 °C	21.6 °C
Maximaltemperatur [°C]	27.4 °C	28.0 °C	28.9 °C
Ø Mitteltemperatur [°C] Mai - August	25.2 °C	25.4 °C	25.6 °C
Stunden > 25 °C [Kh/a]	34372 h	37366 h	42041 h
Ø Stunden > 25 °C pro Top [Kh/a]	2291 h	2491 h	2802 h
Stunden > 27°C [Kh/a]	42.2 h	283.7 h	2112.4 h
Ø Stunden > 27 °C pro Top [Kh/a]	2.8 h	18.9 h	140.8 h
Übertemperaturhäufig- keit [%]	26 %	28 %	32 %
HI (Hitzeindex) [°C]	27 °C	28 °C	30 °C
PDH [h]	9762 h	10017 h	13962 h

Nach *DIN 4108-2:2013-02* handelt es sich bei den Stunden über 25 °C um die sogenannten Übertemperaturgradstunden, welche in Kelvinstunden pro Jahr (Kh/a) angegeben werden. Dieser Wert beinhaltet die Differenz an Stunden, die die operative Raumtemperatur über einen gesetzten Sollwert auf ein Jahr betrachtet liegt. Der Norm zufolge liegt die Obergrenze bei 1200 Kh/a. Bei der Übertemperaturhäufigkeit wird der Anteil an Stunden bewertet, an denen der Grenzwert bezogen auf die Nutzungsstunden überschritten wird. In diesem Fall wird 25 °C als Grenzwert festgelegt, um einen angemessenen Komfort in Ruheräumen zu gewährleisten.

Nach *DIN EN 16798-1:2022-03* liegt der Richtwert die Übertemperaturhäufigkeit bei Wohngebäude bei $\leq 7\%$, wobei angenommen wird, dass die Nutzungszeit bei 8760 Stunden im Jahr liegt. [41]

Die Tabelle 3 lässt gewisse Muster aufgrund der Klimasituationen der drei Standorte erkennen. So verfügt Klagenfurt über die niedrigste gemessene Temperatur und Wien über die höchst gemessene Temperatur. Zudem liegt das größte ΔT zwischen Minima und Maxima bei den Ergebnissen der Simulationen in Klagenfurt vor, womit dies übereinstimmt mit den verwendeten monatlichen Klimadaten. Eine Erkenntnis, die bei der Auswertung gewonnen werden konnte ist, dass der Unterschied zwischen den gewählten Orten im Mai und im Juli am größten sind. Dabei liegen im Mai im Durchschnitt Differenzen von 0.6 Kelvin vor, während sich dieser Wert im August auf 0.3 reduziert. Das Referenzgebäude in Bregenz verfügt über 22 Prozent weniger Stunden über 25 °C im Vergleich zum Standort Wien, während dieser Wert in Kärnten bei 13 Prozent liegt. Bei Temperaturen über 27 °C macht die Stundenanzahl in Bregenz im Verhältnis zu Wien gerade mal zwei Prozent aus, während Klagenfurt bei 13 Prozent liegt. Resultierend aus den hohen Temperaturen und einer hohen Luftfeuchtigkeit verfügt Wien über den höchsten Wert an unzufriedenen Personen, gemessen am *PPD-Wert*. Dabei liegt der maximal verzeichnete Wert bei 46 Prozent für Wien, 29 Prozent bei Klagenfurt und 26 Prozent für Bregenz. Den Höhepunkt der Temperatur erreicht der Standort in Vorarlberg am 15.05.2022 mit 27.4 °C, wobei eine relative Luftfeuchtigkeit von 41 Prozent und einem *PPD* von 20 Prozent erreicht wurden. Klagenfurt erzielte die Maximaltemperatur am 14.07.2022 mit 28 °C und 52 Prozent relativer Luftfeuchtigkeit bei einem Anteil von 22 Prozent an unzufriedenen Menschen.

Da für die sommerliche Überhitzung nicht nur die Lufttemperatur im Innenraum für den Komfort ausschlaggebend ist, wurde auch der Hitze-Index nach Rothfusz kalkuliert. Somit wird auch zum Zeitpunkt der Maximaltemperatur die relative Luftfeuchtigkeit berücksichtigt, da diese entscheidend ist, wie gut Menschen Wärme an die Umgebung abgeben können. Für die Regressionsgleichung von Rothfusz wurden von Robert Steadman im Jahr 1979 Parameter festgelegt, die es ermöglichen einen Wert zu definieren [102]. Der HI-Index wird dabei wie folgt berechnet und in Grad Celsius ausgedrückt:

$$HI = -42.379 + 2.04901523T + 10.1433127R - 0.22475541TR - 6.8378 \times 10^{-3}T^2 - 5.481717 \times 10^{-2}R^2 + 1.22874 \times 10^{-3}T^2R + 8.5282 \times 10^{-4}TR^2 - 1.99 \times 10^{-6}T^2R^2 \quad (7)$$

T = Temperatur die betrachtet wird in Fahrenheit [°F]

R = die dazugehörige relative Luftfeuchtigkeit in Prozent [%]

Resultierend darauf ergibt sich ein Hitzeindex von 28 °C für Klagenfurt, 27 °C für Bregenz und für Wien von 30 °C. Dieser Index variiert je nach klimatischen Bedingungen und erhöht sich umso schneller, je größer der Anteil der relativen Luftfeuchtigkeit ist. Abschließend kann für die Simulation für die drei Standorte im Jahr 2022 gesagt werden, dass aufgrund der Resultate

Wien und Kärnten eher zur sommerlichen Überhitzung im Referenzgebäude neigen als Vorarlberg. Die Ergebnisse basieren dabei allerdings nur unter Anwendung der getroffenen Annahmen und kann je nach Änderung von Parametern abweichen.

Ergebnisse der Simulationen mit RCP4.5 im Jahr 2060

Die Abschätzung des Einflusses vom Klimawandel auf Wohngebäude erfolgt mit der Simulation desselben Modells unter Anwendung neuer Klimadatensätze. Somit sind die einzigen Faktoren, die sich ändern die Klimaparameter.

Tabelle 8: Resultate der Simulation 2060 mit RCP4.5

KPI	Bregenz	Klagenfurt	Wien
Minimaltemperatur [°C]	21.5 +0.3 °C	20.8 +0.7 °C	21.9 +0.3 °C
Maximaltemperatur [°C]	28.6 +1.2 °C	28.5 +0.5 °C	31.6 +2.7 °C
Ø Mitteltemperatur [°C] Mai - August	25.7 +0.5 °C	25.9 +0.5 °C	26.4 +0.8 °C
Stunden > 25°C [Kh/a]	44379 +10007 h	43803 +6437 h	47148 +5107 h
Ø Stunden > 25°C pro Top [Kh/a]	2958 +667 h	2920 +429 h	3143 +341 h
Stunden > 27°C [Kh/a]	3685 +3642 h	5201 +4917h	16568 +14455 h
Ø > 27°C pro Top [Kh/a]	246 +243 h	346 +327 h	1104 +963 h
Übertemperaturhäufigkeit [%]	34 +8%	33 +5%	36 +4%
HI (Hitzeindex) [°C]	29.9 +2.9 °C	29.9 +1.9 °C	34.8 +2.8 °C
PDH [h]	10613 +851 h	10631 +614 h	15562 +1600 h

Tabelle 8 präsentiert aktualisierte Werte im Vergleich zu Tabelle 7. Die rot markierten Angaben zeigen die Veränderung gegenüber der aktuellen Situation. Es ist wichtig zu beachten, dass die aufgeführten Minimal- und Maximaltemperaturen die Werte aller Wohneinheiten berücksichtigen und nicht den kritischsten Wert einer einzelnen Nutzungseinheit widerspiegeln. Die Mitteltemperatur repräsentiert den Durchschnitt der täglichen Mittelwerte zwischen Mai und August über die 15 Wohnungen, was sowohl kühle als auch heiße Tage berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die größte Veränderung bei den Stunden über dem festgelegten Grenzwert stattfindet. Die Unterschiede in den Stunden über 25°C zwischen den Standorten variieren zwischen 12 und 29 Prozent und sind noch relativ gering. Jedoch ändert sich dieser

Umstand deutlich, wenn man die Stunden über 27 °C betrachtet. Der Anstieg am Standort Bregenz im Vergleich zu Klagenfurt und Wien ist exorbitant hoch. Dies liegt daran, dass der Wert in der Simulation von 2022 sehr niedrig war, und Bregenz im Verhältnis zu Klagenfurt und Wien nur 1:7 bzw. 1:50 an Stunden über 27 °C hatte.

Um einen Vergleich der Stundenanzahl über 25 °C an den verschiedenen Standorten zu ermöglichen, kann der Indikator der Übertemperaturhäufigkeit verwendet werden. Über das gesamte Jahr betrachtet, sind die Unterschiede mit 33 Prozent und 36 Prozent marginal. Der Anteil der Jahresstunden über 27 °C beträgt in Bregenz drei Prozent, in Klagenfurt vier Prozent und in Wien 13 Prozent. Der PDH-Wert basiert auf dem *PPD*-Wert und repräsentiert die Summe der Stundenanzahl. Nach *DIN EN ISO 7730* beträgt der kleinstmögliche *PPD*-Wert bei fünf Prozent an unzufriedenen Personen [103]. Dabei wird in *IDA ICE* der Wert nach *EN16798-1* für Gebäude ohne aktive Kühlung berechnet und ausgegeben [104].

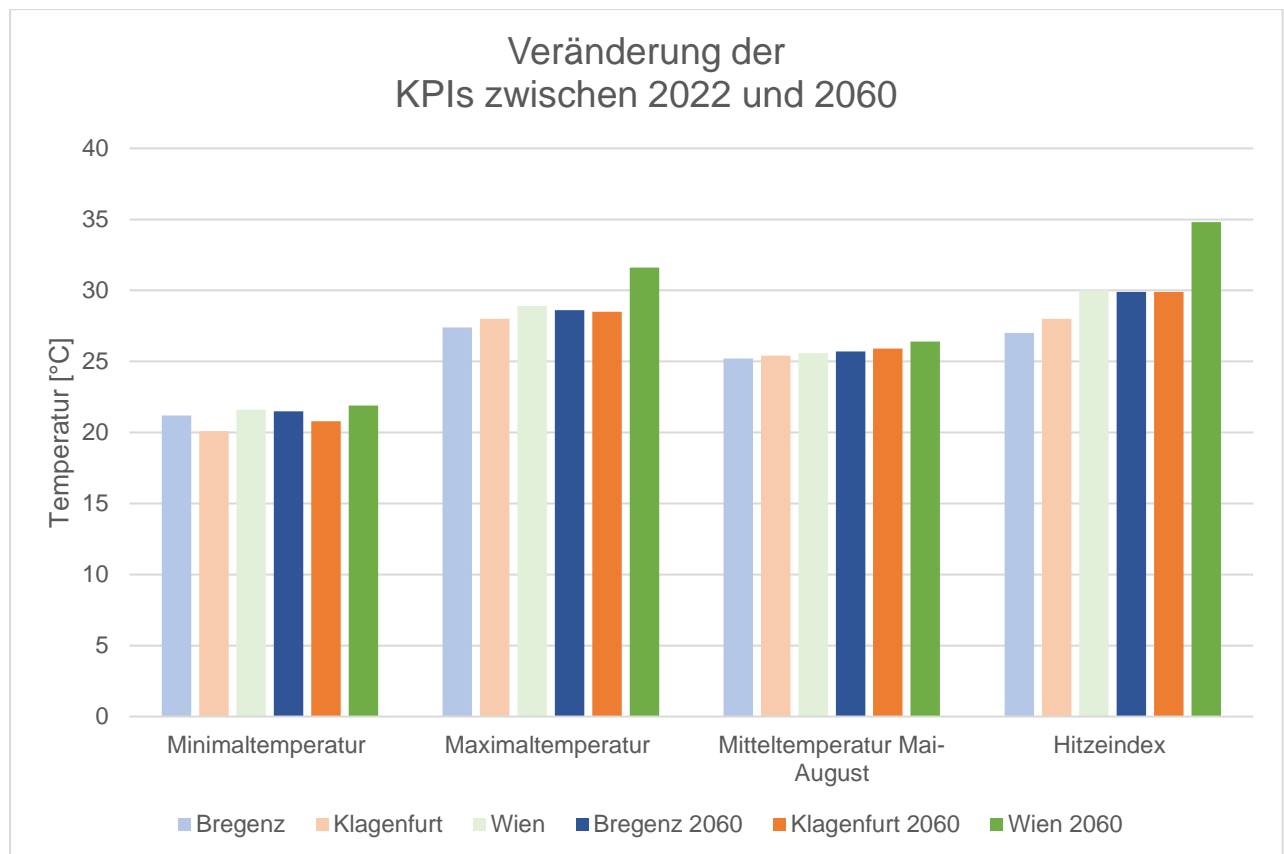


Abbildung 39: Entwicklung der KPI im Vergleich von 2022 und 2060

Den Simulationen zufolge ist ein Anstieg von ΔT zwischen dem niedrigstem und höchstem Tagestemperaturwert in Zukunft zu erwarten. Ein Auslöser dafür könnte das Verzeichnen von neuen Maximaltemperaturen sein, wie man es anhand vom Beispiel Wien erkennen kann. In diesem Fall ist die Erhöhung im Osten Österreichs um einiges höher als in Bregenz oder in

Klagenfurt. Die Veränderung der durchschnittlichen Minimaltemperaturen könnte im Sommer dazu führen, dass der Komfort darunter leidet oder RLT-Anlagen zum Einsatz kommen. Während dies im Winter einen niedrigeren Heizwärmebedarf aufgrund von höheren Temperaturen bedeutet. Die Abweichung des Hitzeindex bei Wien ist mit Vorsicht zu betrachten, da je nach relativer Luftfeuchtigkeit sich der Wert reduzieren kann. Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit kann durch gezieltes Lüften der Wohnung entgegengewirkt werden.

Mit großer Wahrscheinlichkeit kann nur gesagt werden, dass der Hitzeindex aufgrund von steigenden Lufttemperaturen steigen wird, jedoch ist die Größenordnung schwer zu prognostizieren.

Ergebnisse der Simulationen mit *RCP8.5* im Jahr 2060 in Wien

Um das laut Experten unwahrscheinliche Szenario des Pfades *RCP8.5* zu untersuchen wurde als Standort nur Wien ausgesucht, da dieser den Ergebnissen von *RCP4.5* zufolge die größte Hitzebelastung erwarten wird. Betrachtet wird das Szenario dennoch, um zu erfahren, inwieweit es sich von *RCP4.5* abweicht.

Im Vergleich zu den Klimadaten mit dem Szenario *RCP4.5* sind die Temperatursprünge geringer als die Veränderungen zu 2022. Die primäre Temperaturzunahme findet dabei in den Sommermonaten statt. Über das Jahr gesehen erhöht sich die mittlere Lufttemperatur um 1.1 °C, womit die Diskrepanz zur Gegenwart bei 3.1 °C liegt. Mit einer Maximaltemperatur von 38.1 °C liegt der Wert nicht weit entfernt vom gemessenen Rekordwert von 38.5 °C im Jahr 2013 in Wien [105].

Tabelle 9: Klimadaten für den Standort Wien im Jahr 2060 mit *RCP8.5*

	Wien
Jänner [°C]	4.4 +1 °C
Februar [°C]	6.3 +1.4 °C
März [°C]	9.6 +1 °C
April [°C]	14.9 +0.8 °C
Mai [°C]	18.9 +0.4 °C
Juni [°C]	23.8 +1 °C
Juli [°C]	26.4 +1.3 °C
August [°C]	26.1 +1 °C
September [°C]	20.3 +1.5 °C
Oktober [°C]	14.3 +0.9 °C
November [°C]	9.4 +0.9 °C
Dezember [°C]	5.0 +1 °C
Minimaltemperatur [°C]	-5.1 +1.1 °C

Maximaltemperatur [°C]	38.1 +1.4 °C
Jahresmitteltemperatur [°C]	15.0 +1.1 °C

Mit den größeren Temperatursteigerungen im Zeitraum zwischen Juni und August, sind auch die Temperatursprünge in diesen Monaten im Vergleich zu den Simulationen mit *RCP4.5* stärker gestiegen. Außerdem liegen im Juli und im August in sämtlichen Wohneinheiten keine durchschnittliche Temperatur unter 27 °C mehr vor, womit die Bewohnenden einer immensen Hitzebelastung ausgesetzt werden.

Tabelle 10: Resultate der Simulation 2060 mit RCP8.5 in Wien

KPI	Wien
Minimaltemperatur [°C]	21.9 +0.3 °C
Maximaltemperatur [°C]	32.3 +3.4 °C
Ø Mitteltemperatur [°C] Mai - August	27.2 +1.6 °C
Stunden > 25 °C [Kh/a]	49221 +7180 h
Ø Stunden > 25 °C pro Top [Kh/a]	3281.4 +479 h
Stunden > 27 °C [Kh/a]	21752 +19640 h
Ø Stunden > 27 °C pro Top [Kh/a]	1450.16 +1310 h
Übertemperaturhäufigkeit [%]	37 +5%
HI (Hitzeindex) [°C]	37 +7 °C
PDH [h]	16720 +1558 h

Ersichtlich wird die zukünftige Hitzeintensität in Wohngebäuden bei Betrachtung des Anstieges der Stunden über 27 °C und eine Übertemperaturhäufigkeit von 37 Prozent. Somit liegen mehr als ein Drittel der Jahresstunden bei Temperaturen über dem Grenzwert. Die Stunden an unzufriedenen Bewohnenden wächst um 7.4 Prozent und beträgt somit ein Achtel der Jahresgesamtstunden. Aufgrund der höheren Außentemperaturen in den Wintermonaten ist nicht davon auszugehen, dass der primäre Anstieg der Stunden in diesen Jahreszeiten verzeichnet wird.

Beantwortungen der ersten Forschungsfrage

Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit der Frage, wie sich der Überhitzungsgrad von Wohngebäuden unter dem zukünftigen Klima ändern wird. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse aus der Recherche und den Simulationen kann davon ausgegangen werden, dass die Jahresmitteltemperaturen in den Wohnungen zunehmen wird. Damit einhergehend werden die Maximaltemperaturen in Wohngebäuden in Österreich steigen. *RCP4.5* wird ein

Anstieg der Stundenanzahl über 25 °C und 27 °C mit sich bringen und Übertemperaturgradhäufigkeit zwischen 33 Prozent und 36 Prozent bedeuten. Die Hitzeintensität variiert je nach geographischem Standort und dem Nutzerverhalten der Menschen im Gebäude. Mit dem Anstieg der Temperaturen und der Stunden über dem gesetzten Grenzwert werden längere Hitzebelastungen über mehrere Tage zu erwarten sein. Falls das Szenario *RCP8.5* tatsächlich Realität wird, muss verstärkt auf passive Kühlungsstrategien gesetzt und über eine aktive Kühlung nachgedacht werden. Um zu überprüfen, ob künftig noch mit passiven Maßnahmen bei Eintreffen des Szenarios *RCP4.5* ein angenehmes Klima in Wohngebäuden gewährleistet werden kann, beschäftigt sich die zweite Forschungsfrage mit dieser Thematik.

Ergebnisse passive Maßnahmenstrategie in der Zukunft

Um das Potential von passiven Maßnahmen auf die sommerliche Überhitzung zu verdeutlichen, wurde für den Standort Bregenz mit dem Szenario *RCP4.5* folgende Parameter für jede einzelne Wohnung geändert:

- Die außenliegende Verschattung ist das gesamte Jahr vollständig geöffnet
- Es findet keine Nachtlüftung statt und die Belüftung erfolgt ausschließlich über die Lüftungsanlage

Dabei erreichte die kritischste Nutzeinheit eine Maximaltemperatur von 37.4 °C und verzeichnet über 3887 Stunden über 25 °C beziehungsweise 3412 Stunden über 27 °C. Im Zeitraum von Mai bis September 2060 beträgt keine Durchschnittstemperatur sämtlicher Wohnungen unter 31 °C.

Bei Änderung des Parameters der außenliegenden Verschattung auf vollständig geschlossen über das ganze Jahr ändern sich die Resultate wie folgt:

- Maximaltemperatur: 32.8 °C
- Stunden > 25 °C: 2790 h
- Stunden > 27 °C: 1967 h

Während den Sommermonaten werden in einigen Wohnungen Monatsdurchschnittswerte von 25 °C erreicht werden.

Es zeigt sich, dass bei vollständig geschlossenen Jalousien, zwar nicht die Temperaturen unter den Grenzwert von 27 °C verbessern, jedoch reduzieren sich die Anzahl an Stunden über 25 °C und 27 °C wesentlich. Grund dafür ist, dass der Eintrag der solaren Gewinne erheblich gesenkt werden kann und sich das Gebäude langsamer erhitzt. Allerdings ist eine Nachlüftungsoption angebracht, da die überschüssige Wärme nur begrenzt abgeführt werden

kann. Die zwei oben durchgeführten Fälle bilden dabei nicht die geplanten Maßnahmen ab, sondern sollen nur verdeutlichen, wie sich die Hitze im Gebäude in Sonderfällen verhält. Für die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage werden die beschriebenen Maßnahmenpakete aus Kapitel 4.5 umgesetzt.

Die Ergebnisse beziehen sich dabei auf die Veränderung im Vergleich zu den Resultaten von Tabelle 8.

Tabelle 11: Resultate Maßnahmenpaket 1 für RCP4.5 im Jahr 2060

KPI	Bregenz	Klagenfurt	Wien
Minimaltemperatur [°C]	21.6 +0.1 °C	20.9 +0.1 °C	21.9 +0 °C
Maximaltemperatur [°C]	29.3 +0.7 °C	28.9 +0.4 °C	32.3 +0.7 °C
Ø Mitteltemperatur [°C] Mai - August	25.7 +0 °C	25.8 +0.1 °C	26.5 +0.1 °C
Stunden > 25 °C [Kh/a]	50395 +6016 h	49165 +5362 h	51030 +3882 h
Stunden > 27 °C [Kh/a]	2411 -1273 h	2783 -2418 h	10098 -6470 h
Übertemperaturhäufigkeit [%]	38 +4%	35 +2%	39 +3%
HI (Hitzeindex) [°C]	29.7 -0.2 °C	30.1 +0.2 °C	36.1 +1.3 °C
PDH [h]	14871 +4258 h	15185 +4554 h	19409 +3847 h

Mit der Entfernung der Balkone bzw. Loggias zeigt sich, dass diese je nach Klimazone einen unterschiedlichen Einfluss haben können. Dabei wirkt sich diese Maßnahme nur gering auf die Minimal- und Maximaltemperatur aus. Vermehrt hat die Verschattung der Balkone eine Auswirkung auf die Stunden über den Grenzwerten. Die Stundenanzahl über 25 °C ist für sämtliche 15 Wohnungen zwischen acht Prozent und 14 Prozent gewachsen. Lediglich die Stunden unter 27 °C sind gesunken. Grund dafür könnte sein, dass weniger Speichermasse zur Verfügung steht und somit einfacher Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann.

Tabelle 12: Resultate Maßnahmenpaket 2 für RCP4.5 im Jahr 2060

KPI	Bregenz	Klagenfurt	Wien
Minimaltemperatur [°C]	21.3 -0.2 °C	20.6 -0.2 °C	21.4 -0.5 °C
Maximaltemperatur [°C]	28.7 +0.1 °C	29.0 +0.5 °C	30.3 -1.3 °C
Ø Mitteltemperatur [°C] Mai - August	25.6 -0.1 °C	25.8 +0.1 °C	26.2 -0.2 °C
Stunden > 25 °C [Kh/a]	43531 -848 h	45669 +1866 h	46042 -1106 h
Stunden > 27 °C [Kh/a]	1496 -2189 h	2199 -3002 h	8627 -7941 h

Übertemperaturhäufigkeit [%]	37 +3%	35 +2%	35 -1%
HI (Hitzeindex) [°C]	29.5 -0.4 °C	29.9 +0 °C	32.4 -2.4 °C
PDH [h]	14503 +3890 h	15195 +4564 h	18163 +2601 h

Die Erhöhung des Nachtluftwechsel bietet die Möglichkeit die Wärme während der kühleren Zeit abzugeben. Dabei werden die Fenster von 01.05 bis 30.09 im Zeitraum zwischen 22:00 und 06:00 Uhr geöffnet. Diese öffnen sich jedoch nur, wenn die Außentemperatur unter 20 °C liegt, um den Effekt des Temperaturunterschieds zu verwenden.

Mit der Nachtlüftung zeigt sich, dass sich die Mitteltemperatur von Mai bis August gesenkt hat. Die verzeichneten Maximaltemperaturen werden vor dem Einsatz der erhöhten Nachtlüftung im April erzielt, womit sich zeigt, dass diese, die Anzahl an Temperaturspitzen verringern kann. In Anbetracht der Obergrenze von 27 °C werden in sämtlichen Standorten erhebliche Rückgänge erzielt, womit von angenehmeren Temperaturen in den Wohnungen während den Nachstunden auszugehen ist. Aufgrund von höherem Luftwechsel erhöht sich der *PDH*-Wert, da Parameter wie Luftgeschwindigkeit einen Einfluss auf diesen Wert haben.

Tabelle 13: Resultate Maßnahmenpaket 3 für RCP4.5 im Jahr 2060

KPI	Bregenz	Klagenfurt	Wien
Minimaltemperatur [°C]	21.5 +0 °C	21.0 +0.2 °C	21.5 -0.4 °C
Maximaltemperatur [°C]	28.8 +0.2 °C	28.5 +0 °C	30.1 -1.5 °C
Ø Mitteltemperatur [°C] Mai - August	25.5 -0.2 °C	25.8 -0.1 °C	26.1 -0.3 °C
Stunden > 25 °C [Kh/a]	43484 -895 h	47053 +3250 h	48095 +947 h
Stunden > 27 °C [Kh/a]	551 -3134 h	1285 -3632 h	7702 -8866 h
Übertemperaturhäufigkeit [%]	33 -1%	35 +2%	37 +1%
HI (Hitzeindex) [°C]	29.7 -0.2 °C	29.3 -0.6 °C	31.9 -2.9 °C
PDH [h]	14150 +3537 h	14751 +4120 h	17649 +2087 h

Die Kombination von Sonnenschutzvorrichtung und Nachtlüftung führt zu ungleichmäßigen Auswirkungen bei den drei Ausgangspunkten. Identisch wie das Maßnahmen Paket 2 führt die Implementierung von passiven Maßnahmen zu einer deutlichen Reduktion der Maximaltemperatur und Stunden über 27 °C in Wien. Aufgrund dessen ist es empfehlenswert die Maßnahmen in dieser Region schleunigst umzusetzen. Zu einer Reduktion der Stundenanzahl kommt es auch in Vorarlberg und in Kärnten. Erkennbar ist, dass eine Verschiebung der Temperaturstunden von 27 °C auf 25 °C vorliegt.

Beantwortungen der zweiten Forschungsfrage

Die zweite Forschungsfrage beschäftigt sich mit der Beantwortung der Frage, ob künftig unter Anwendung von passiven Maßnahmen ein sommerlicher Wärmeschutz gewährleistet werden kann. Basierend auf den Ergebnissen, kann keine eindeutige Aussage über die Einhaltung der sommerlichen Überhitzung ausschließlich mit passiven Sonnenschutzmaßnahmen getroffen werden. Das liegt daran, dass es am Beispiel Bregenz durchaus möglich ist, die Kriterien für die Behaglichkeit für die Menschen einzuhalten. Andererseits zeigt der Standort Wien, dass es je nach eintreffendem Klimaszenario unrealistisch erscheint. Außerdem wird aus den unterschiedlichen Maßnahmenpakete ersichtlich, dass die Nachtlüftung einen größeren Einfluss hat als die verbesserte außenliegende Verschattung. Diese Aussage ist allerdings kritisch zu hinterfragen, da bei den Grundsimulationen bereits ein angemessener Grad an Verschattung angenommen wird, welcher jedoch Verbesserungspotential aufweist. Dennoch lässt sich aus den Resultaten schließen, dass die Umsetzung der Maßnahmen die Hitzebelastung deutlich reduzieren kann und in der Zukunft von Wichtigkeit sein wird.

6 Diskussion, Fazit und Ausblick

Diese Masterarbeit untersuchte den Einfluss des Klimawandels auf die sommerliche Überhitzung in Wohngebäuden anhand von Referenzgebäuden in Bregenz, Klagenfurt und Wien. Dabei wurden diese Standorte ausgewählt, um die ländlichen und städtischen Einflüsse miteinzubinden und die unterschiedlichen Klimaregionen in Österreich abzudecken. Mit den Ergebnissen kann jedoch nicht für jede Region eine Aussage getroffen werden, sondern dient eher zur Einschätzung der Auswirkungen in den verschiedenen Teilen Österreichs. Mit Hilfe der gemessenen Realdaten wurde versucht, das Nutzerverhalten einfließen zu lassen, jedoch sind dafür zu wenige detaillierte Informationen vorhanden. Es lässt sich beim Vergleich zwischen der Simulation 2022 und den gemessenen Werten erkennen, dass Diskrepanzen vorhanden sind, die jedoch nicht bei der Prognose für die Zukunft berücksichtigt werden können. Grund dafür ist, dass nicht angenommen werden kann, dass sich die Menschen künftig gleich verhalten werden wie heutzutage. Bis auf die Personenanzahl pro m² wurde für die Simulationen die Vorgaben der *SIA 2024* verwendet, womit sich dem Verhalten in der Realität nur angenähert wird. Die Abweichung der Simulation 2022 im Vergleich mit den Realdaten ist nicht ausschließlich nur dem Nutzerverhalten zu zurechnen, sondern beinhaltet zudem Fehler bei der Modellbildung des Referenzgebäudes. Allerdings ist dies nicht tragisch, da die simulierten Ergebnisse prozentual miteinander verglichen werden und somit die prozentuelle Veränderung gleich bleibt.

Bewertungskriterien der sommerlichen Überhitzung

Der Bewertungskoeffizient Übertemperaturgradstunden ist hinsichtlich der Festlegung des Grenzwertes kritisch zu bewerten. Grund dafür ist, dass im Winter häufiger Temperaturen über 25°C erreicht werden, je nachdem wie intensiv die Heizung verwendet wird. Dies bezieht sich allerdings nur auf die Realität, da im Modell eine konstante Solltemperatur von 24 °C vorgegeben ist. Somit kann keine detaillierte Aussage getroffen werden, wie viele Überschreitungsstunden im Sommer erlaubt sind und welcher Richtwert im Rahmen liegt. Außerdem zeigt die Studie Attia et al. [24] die Schwierigkeit zur Bewertung der sommerlichen Überhitzung. Grund dafür ist, dass in Europa verschiedene Bauschriften in unterschiedlichen Klimazonen existieren und kein einheitlicher Ansatz vorhanden ist, um diese Problematik zu begleichen. Außerdem werden in den meisten Methoden Wohnungen als eine Zone betrachtet, womit vereinzelte Räume überhitzen können. Die Wohnungen sind auch in dieser Arbeit als eine Zone betrachtet worden, da es schwierig ist, das Nutzerverhalten in den unterschiedlichen Räumen abzubilden und sich die Raumaufteilung von Wohnung zu Wohnung unterscheiden können. Weiters gehen einige Vorschriften zudem von einer aktiven Kühlung aus, womit die Rahmenbedingungen nicht angemessen ausgelegt sind. Dennoch sind die Ergebnisse dieser

Arbeit wichtig, um Erkenntnisse über die unterschiedliche Entwicklung der sommerlichen Überhitzung im Raum Österreichs in der Zukunft, zu gewinnen.

Für die Einhaltung des sommerlichen Komforts fokussieren sich viele Bewertungsmethoden auf KPI's wie *PMV* oder *PPD*. Der *PMV* repräsentiert einen Wert für das Empfinden von Wärme für den Menschen mit den Ziffernbereich von -3 für kalt bis +3 für heiß [41]. Allerdings ist das Empfinden von Menschen schwer einzuschätzen, da jedes Individuum Einflüsse unterschiedlich wahrnimmt und somit für die Zukunft nicht gesagt werden kann, ob die Hitze für alle ident spürbar ist.

Die sommerliche Überhitzung kann mit unterschiedlichen Auswertengrößen bewertet werden. Jedoch weisen diese je nach Indikator divergente Stärken und Schwächen auf. So handelt es sich bei der Maximaltemperatur um eine Momentaufnahme, womit nicht eingeschätzt werden kann, ob dieser Wert über einen längeren Zeitraum stattfindet oder nicht. Mit der Durchschnittstemperatur in den Sommermonaten vernachlässigt man die Verfälschung durch die kühleren Monate, jedoch ist nicht die Schwankungsbreite berücksichtigt. Die Übertemperaturhäufigkeit beinhaltet die Nutzerstunden, gibt jedoch keine Auskunft darüber, wie hoch der Wert überschritten ist. Dasselbe gilt für die Stundenanzahl über den Grenzwerten. Die Hitzeintensität für Menschen ist abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit, die je nach Umgebung und vorliegenden Einflüssen sich rasch verändern kann und schwer einzuschätzen ist. Daher liegt keine bekannte Methode vor, die diesen Aspekt miteinbezieht.

Resultierend aus all diesen Gründen, wurde eine Vielzahl an Auswertegrößen in dieser Arbeit gewählt, um die Aussagekraft der Resultate zu erhöhen. Dennoch sind einheitliche bzw. standardisierte Auswertegrößen essenziell, damit sie für Vergleiche der Hitzebelastung herangezogen werden können.

Klimadaten

Die Wahl der verwendeten Klimadatensätze können einen großen Einfluss auf die Endresultate haben. Dabei können gewisse betrachtete Jahre besser abschneiden, da eventuell keine besonderen Wetterphänomene aufgetreten sind. So zeigt die Untersuchung von Jentsch M. [106] im Rahmen der Entwicklung eines Sommerreferenzjahres für die Bewertung von sommerlicher Überhitzung in Gebäuden, dass es für ein Bürogebäude in derselben Ortschaft zu unterschiedlichen Ergebnissen bei den Übertemperaturgradstunden kommen kann. Grund dafür sind verschiedene Anwendungsmethoden zur Bestimmung von Referenzjahren für die Zukunft. TRY, SRY und DSY sind dabei gängige Methoden, die allerdings je nach Einsatzgebiet über einen anderen Fokus besitzen.

Vukadinovic et al. [107] belegen die Sichtweise für die schwere Prognostizierung der genauen Auswirkungen des Klimawandels auf Gebäude, basierend auf Vergangenheitsdatensätze. Je entfernter sich die Zeiträume befinden, desto schwieriger ist es, eine genaue Aussage zu treffen. Die Intensität von Veränderungen über die Zeit kann schwer bemessen und miteinkalkuliert werden. Unsicherheiten treten zudem bei der Wahl des gewählten Klimaszenarios auf. So kann nicht gesagt werden, welches Szenario mit Sicherheit eintreffen wird und wie sich dementsprechend die Lage ändern wird. Larsen et al. [22] verdeutlicht dabei, dass die Wahl zwischen *RCP2.6* und *RCP4.5* bedeutsam für den Temperaturverlauf in unterschiedlichen Regionen ist. So ist der Veränderungsgrad in der Alpenregion und höher gelegenen Region Europas stärker als in anderen Gebieten.

Mikroklima

Die Untersuchung der World Bank Group [108] über Einfluss von Mikroklimas in Städten verdeutlicht, dass dieser Punkt wichtig ist für die Entwicklung der Hitzebelastung in Gebäuden und deren Umgebung. Dabei sind Mikroklimas abhängig von diversen Parametern, die sich je nach Region unterscheiden können. Relevant sind Mikroklimas deshalb, da sie die Option der Nachtlüftung beeinflussen. Mit dem Anstieg der Anzahl an Tropennächten (Temperaturen über 20 °C) reduziert sich die Möglichkeit, während den Nachtstunden die Innenräume zu kühlen. Das Beispiel Wien verfügt laut der Studie über vier Tropennächte, was sich mit den verwendeten Klimadatensätze von Meteorornorm von fünf Nächten deckt. In der vorliegenden Arbeit wird das Mikroklima nur angeschnitten, indem das Windprofil von „Suburban“ in Bregenz auf „City Center“ geändert wurde, um die Regionsgegebenheiten zu integrieren. Oswald et al. [109] geben Aufschluss wie unterschiedliche Klimaanpassungsmaßnahmen in Klagenfurt die Wärmebelastung reduzieren. Die Kombination aus verschiedenen Maßnahmen verbessert zu dem die Luftqualität und verfügt zudem das Potenzial, die Anzahl an Hitzetagen über 30 °C bis zum Jahr 2100 von 40 auf 30 zu reduzieren.

Passive Sonnenschutzmaßnahmen/ Kühlmaßnahmen

Für die Vermeidung von sommerlicher Überhitzung ist nicht die Bauweise des Gebäudes ausschlaggebend, sondern die Verschattung der transparenten Bauteilen und ein ausreichender Anteil an Luftwechsel zur Kühlung während den Nachtstunden [110]. Dabei gilt zu beachten, dass es nicht die eine Lösung gibt, um angenehme Innentemperaturen zu ermöglichen, sondern es eine Mischung aus verschiedenen Maßnahmen benötigt, um die Hitzeproblematik zu bewältigen. Neben den Optionen von Sonnenschutzvorrichtungen und der Nachtlüftung gibt es noch Möglichkeiten wie die Kombination von Bauteilaktivierung mit Sohlplattenkühlung, welche durchaus einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung von Überhitzung beitragen kann [93]. Die passiven Maßnahmen im Leitfaden der *BOKU Wien* [99] erhalten in etwa die selben

Resultate in Bezug auf den Temperaturbereich bei Anwendung von Sonnenschutzmaßnahmen in Kombination mit der Nachtlüftung, womit die Ergebnisse als plausibel einzuordnen sind. Der Unterschied zu der vorliegenden Arbeit darin, dass im Leitfaden nicht die Überhitzungsintensität betrachtet wird und keine Variation an Standorten stattfindet.

Fazit

Die Entwicklung der sommerlichen Überhitzung in Wohngebäuden ist abhängig von Faktoren wie dem Gebäudetyp, dem Gebäudealter, der Gebäudeart, dem Standort und vielen weiteren Effekten. Für den betrachteten Fall im Jahr 2060 mit dem *RCP4.5* in Österreich kann gesagt werden, dass je nach Region die Hitzebelastung verschieden stark stattfinden wird. Aufgrund des stärkeren Temperaturanstiegs während den Sommermonaten in Wien zeigt sich, dass die Übertemperaturgradstunden und die Maximaltemperaturen sich höher verändern als bei den anderen beiden. Vor allem im Temperaturbereich über 27 °C steigen die Stunden schneller als die beiden anderen Standorte. Generell lässt sich für sämtliche Standorte sagen, dass künftig Innentemperaturen von über 25 °C der Normalfall sein wird und es gilt die 27 °C Grenze zu vermeiden. In Bezug auf die Übertemperaturgradstunden > 25 °C ist die prozentuale Veränderung mit +29 Prozent in Bregenz am höchsten. Grund dafür ist, dass in der Simulation von 2022 ein weitaus niedrigerer Wert vorliegt. Dasselbe gilt für die Veränderung bei den Temperaturen > 27 °C. Im Fall vom Klimaszenario *RCP8.5* für Wien ist mit einer weitaus gravierenderen Entwicklung für die Hitzeintensität zu rechnen. Dabei steigt die Mitteltemperatur zwischen April und September um 1.6 °C und die jährliche Stundenanzahl über 25 °C beläuft sich auf 38 Prozent gegenüber 2022.

Die Ergebnisse zeigen, dass die These von Hamdy et al. [27] bezüglich des Empfindlichkeitsgrad von Wohnungen im Mittelgeschoss oder Dachgeschoss bestätigt werden kann. So ist der Überhitzungsgrad in den oberen Geschossen um einiges höher als das Erdgeschoss oder der erste Stock. Außerdem sind die Wohnungen mit Südwestausrichtung wesentlich stärker betroffen. Die Personenanzahl bei derselben Ausrichtung zeigte bei der Auswertung der Messdaten, dass diese zu einem erheblichen ΔT von bis zu 2K im Sommer führen kann. Der Anstieg der mittleren Temperatur verläuft im Mai und im Juli in Bregenz und Klagenfurt stärker, wie in den restlichen Monaten. Daher ist es wichtig, sich nicht nur auf einen Monat zu fokussieren, da dieser zu anderen Ergebnissen führen kann.

Für die passiven Sonnenschutzmaßnahmen zeigt sich, dass bereits während der Planungsphasen sich Gedanken über die Integrierung der Maßnahmen gemacht werden sollte. So ergibt sich aus den Resultaten, dass Balkone primär zur Reduzierung der Übertemperaturgradstunden führen, während die Jalousien die Innentemperatur und die Anzahl an Stunden senken. In Kombination mit der Nachtlüftung wird anschließend die überschüssige Wärme

abgeführt und ermöglicht angenehme Temperaturen. Jedoch wird es mit der steigenden Außenlufttemperatur und der Anzahl an Tropennächten vermehrt schwerer sein, nur mit passiven Maßnahmen den gesetzlichen sommerlichen Wärmeschutz in Teilen von Österreich zu gewährleisten.

Mit dieser Arbeit ist es möglich eine Abschätzung zu erhalten, wie sich die Hitzebelastung in Wohngebäuden in weiterer Ferne entwickeln könnte und in welcher Form es sich auswirken wird. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass künftig passive Maßnahmen durchaus die Temperaturen und Stundenanzahl reduzieren können.

Ausblick

Die sommerliche Überhitzung wird in der Zukunft eine wesentliche Rolle bei Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden spielen. Dabei sollte der Fokus nicht primär auf aktive Kühlmaßnahme liegen, sondern vorerst auf der Umsetzung der passiven Maßnahmen. So sollte bei der Planung auch die Ausrichtung des Gebäudes eine Rolle spielen. In dem betrachteten Fall wurde dies nicht inkludiert, da es sich um ein fast quadratisches Gebäude handelt und somit die Problematik nur von einer Wohnung zur nächsten verschieben würde. Wohnungen mit der Möglichkeit zur Querlüftung zwischen Norden und Süden, verfügen über das Potential die Nordseite länger geöffnet zu lassen und genügend kaltem Wind in den Morgen- und Abendstunden vorzuweisen.

Es besteht Bedarf für die Beurteilung der Hitzeintensität eine geeignete einheitliche Bewertungsgröße zu finden, die sämtliche Einflüsse berücksichtigt und somit eine gute Aussage treffen kann. Dabei sollten Wohnungen nicht als Einzelzone und nur zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet werden. Weiters muss die Betrachtung von Wärmeinseln und Mikroklimas mit einfließen, da diese die Hitzebelastung wesentlich beeinflussen. So können Ansätze entstehen mit denen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden und somit der Komfort in Städten und Wohnungen verbessert wird.

Bewusstseinsbildende Maßnahmen hinsichtlich effektiver Temperaturreduziermaßnahmen für Wohnungen in städtischen Gebieten können zur Erhöhung des Komforts in bestehenden Wohnungen führen. Somit kann auch bei Bestandsgebäuden ohne zusätzliche Investitionen die Wohnqualität erhöht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, „Treibhausgase“, *Treibhausgase*, o.J. <https://www.umweltbundesamt.at/klima/treibhausgase> (zugegriffen 16. April 2023).
- [2] „Umweltkontrollbericht - Umweltsituation in Österreich“, Wien, 978-3-99004-647-0, 2022. Zugegriffen: 11. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0821.pdf>
- [3] „Klimaschutzbericht“, Wien, 978-3-99004-641-8, 2022. Zugegriffen: 14. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0816.pdf>
- [4] „2022 unter den drei wärmsten Jahren der Messgeschichte“. ZAMG, 22. Dezember 2022. Zugegriffen: 12. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/2022-unter-den-drei-waermsten-jahren-der-messgeschichte>
- [5] „Indikator: Heiße Tage“. Umweltbundesamt, 14. Dezember 2022. Zugegriffen: 12. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>
- [6] L. Dr.-Ing. HABIL. Rouvel, „Bauphysik Grundlagen“, in *Bauphysik*, 2000, S. 114. Zugegriffen: 13. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://www.gebsimu.de/Rouvel_Sommerlicher_Waermeschutz_Bauphysik_2000_2_und_2000_3.pdf
- [7] C. Amann, A. Rehbogen, und I. Schardinger, „Endbericht - Masterplan Wärme“, Amt der Vorarlberger Landesregierung, Bregenz, 2021. Zugegriffen: 10. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://vorarlberg.at/documents/302033/472360/SIR+2021_Masterplan+W%C3%A4rme+Endbericht+final.pdf/8d309796-853f-43c2-55cb-604cf04568de?t=1652787228434
- [8] „Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung“, Berlin, 143/09-S-2018/DE, 2018. Zugegriffen: 18. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Heat_System_Benefit/143_Heat_System_benefits_WEB.pdf
- [9] Nackler Joachim, „Sommerlicher Wärmeschutz - Vergleich von Berechnungsansätzen und Entwicklung eines Planungsinstrumentes für Entwurfsfindung und Nachweis“, TU Wien, Wien, 2017. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://www.thesim.at/downloads/Dissertation_Nackler.pdf
- [10] R. Rahif, D. Amaripadath, und S. Attia, „Review on Time-Integrated Overheating Evaluation Methods for Residential Buildings in Temperate Climates of Europe“, *Energy Build.*, Bd. 252, S. 111463, Dez. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111463.
- [11] *Low-Tech Gebäude Prozess Planung Umsetzung*. Konstanz: Partner des Interreg Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein Projekts, 2021. Zugegriffen: 10. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://vorarlberg.at/documents/302033/472360/EIV+et+al.+2021_Lowtech-Geb%C3%A4ude_Buch_2021_ibk.pdf/473e6180-1759-a32f-d2a8-318aaa31bda0?t=1663161086929
- [12] Pitha, U., Zluwa, I., Scharf, B., Lapin, K., Besener, I., M., Virgolini, J., Kapus, S., Preiss, J., Enzi, V., Jesner, L., und Oberbichler, C., Fricke, J., Fritthum, R. & Dyk, G., „Leitfaden Dachbegrünung“, Wien, 2021. Zugegriffen: 16. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/gruendaecher-leitfaden.pdf>
- [13] Rechtsinformationssystem des Bundes, „RIS - Bautechnikverordnung - Landesrecht konsolidiert Vorarlberg, Fassung vom 14.01.2023“, 14. Januar 2023. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrVbg&Gesetzesnummer=20000735> (zugegriffen 14. Januar 2023).
- [14] Österreichisches Institut für Bautechnik, Hrsg., „OIB-Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz April 2019“. 2019. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oib.or.at/sites/default/files/richtlinie_6_12.04.19_1.pdf

- [15] Österreichisches Institut für Bautechnik, Hrsg., „OIB-Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz“. 2023. Zugegriffen: 1. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oib.or.at/sites/default/files/aenderungen_oib-rl_6_ausgabe_mai_2023.pdf
- [16] R. B. GmbH, „Projekteinhalt und Ziele des Energieinstituts“, *Rhomburg Bau GmbH*. <https://www.rhomburg.com/de/studienprojekt-lerchenstrasse/projekteinhalt-energieinstitut> (zugegriffen 17. Januar 2023).
- [17] C. Tuholske *u. a.*, „Global urban population exposure to extreme heat“, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Bd. 118, Nr. 41, S. e2024792118, Okt. 2021, doi: 10.1073/pnas.2024792118.
- [18] M. Santamouris und D. Kolokotsa, „Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art“, *Energy Build.*, Bd. 57, S. 74–94, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>.
- [19] T. Frank, „Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland“, *Energy Build.*, Bd. 37, Nr. 11, S. 1175–1185, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.019>.
- [20] M. Mulville und S. Stravrovavdis, „The impact of regulations on overheating risk in dwellings“, *Build. Res. Inf.*, Bd. 44, Nr. 5–6, S. 520–534, Aug. 2016, doi: 10.1080/09613218.2016.1153355.
- [21] M. A. D. Larsen, S. Petrović, A. M. Radoszynski, R. McKenna, und O. Balyk, „Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe“, *Energy Build.*, Bd. 226, S. 110397, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110397>.
- [22] M. A. D. Larsen, S. Petrović, A. M. Radoszynski, R. McKenna, und O. Balyk, „Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe“, *Energy Build.*, Bd. 226, S. 110397, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110397.
- [23] N. Artmann, H. Manz, und P. Heiselberg, „Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation“, *Renew. Energy*, Bd. 33, Nr. 12, S. 2589–2598, Dez. 2008, doi: 10.1016/j.renene.2008.02.025.
- [24] S. Attia *u. a.*, „Overheating calculation methods, criteria, and indicators in European regulation for residential buildings“, *Energy Build.*, Bd. 292, S. 113170, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113170.
- [25] R. Rahif, D. Amaripadath, und S. Attia, „Review on Time-Integrated Overheating Evaluation Methods for Residential Buildings in Temperate Climates of Europe“, *Energy Build.*, Bd. 252, S. 111463, Dez. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111463.
- [26] F. M. Baba, H. Ge, L. (Leon) Wang, und R. Zmeureanu, „Do high energy-efficient buildings increase overheating risk in cold climates? Causes and mitigation measures required under recent and future climates“, *Build. Environ.*, Bd. 219, S. 109230, Juli 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109230.
- [27] M. Hamdy, S. Carlucci, P.-J. Hoes, und J. L. M. Hensen, „The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study“, *Build. Environ.*, Bd. 122, S. 307–323, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>.
- [28] C. Morgan, J. A. Foster, A. Poston, und T. R. Sharpe, „Overheating in Scotland: contributing factors in occupied homes“, *Build. Res. Inf.*, Bd. 45, Nr. 1–2, S. 143–156, Feb. 2017, doi: 10.1080/09613218.2017.1241472.
- [29] M. Alrasheed und M. Mourshed, „Domestic overheating risks and mitigation strategies: The state-of-the-art and directions for future research“, *Indoor Built Environ.*, Bd. 32, Nr. 6, S. 1057–1077, Juli 2023, doi: 10.1177/1420326X231153856.
- [30] H. Breesch und A. Janssens, „Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis“, *Sol. Energy*, Bd. 84, Nr. 8, S. 1453–1467, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.05.008.
- [31] Pr. A. Kaddour *u. a.*, „Simulation Investigation of Natural Ventilation on the Thermal Comfort in Arid Regions: Case Ghardaïa“, *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics*, Bd. 17, S. 9–15, Feb. 2022, doi: 10.18280/ijdne.170102.

- [32] H. Breesch und A. Janssens, „Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis“, *Sol. Energy*, Bd. 84, Nr. 8, S. 1453–1467, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.05.008>.
- [33] M. Santamouris und D. Kolokotsa, „Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art“, *Energy Build.*, Bd. 57, S. 74–94, Feb. 2013, doi: [10.1016/j.enbuild.2012.11.002](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002).
- [34] M. Estes Jr, „Urban heat island mitigation strategies“, S. 1–4, Jan. 2000.
- [35] C. Linares, J. Díaz, M. Negev, G. S. Martínez, R. Debono, und S. Paz, „Impacts of climate change on the public health of the Mediterranean Basin population - Current situation, projections, preparedness and adaptation“, *Environ. Res.*, Bd. 182, S. 109107, März 2020, doi: [10.1016/j.envres.2019.109107](https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109107).
- [36] D. Crawley, J. Hand, M. Kummert, und B. Griffith, „Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs.“, U.S Department of energy, Washington, 0360–1323, 2008. Zugegriffen: 19. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/222537377_Contrasting_the_Capabilities_of_Building_Energy_Performance_Simulation_Programs/link/5a71fa83aca2720bc0d9d8aa/download
- [37] „Fachhochschule FHV University of Applied Sciences“. <https://www.fhv.at/> (zugegriffen 11. Juli 2023).
- [38] „GeoSphere Austria“. <https://www.geosphere.at/> (zugegriffen 11. Juli 2023).
- [39] „Zeitreihen“, *Meteonorm (de)*. <https://meteonorm.com/meteonorm-zeitreihen> (zugegriffen 11. Juli 2023).
- [40] „Startseite | Energieinstitut Vorarlberg“. <https://www.energieinstitut.at/> (zugegriffen 11. Juli 2023).
- [41] H. Christina, „Kühle Gebäude im Sommer“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2023. Zugegriffen: 1. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_14-2023_kuehle_gebaeude_im_sommer.pdf
- [42] B. Chimani, M. Hofstätter, S. Kienberger, und H. Truhetz, „ENDBERICHT ÖKS15 | KLIMASZENARIEN FÜR ÖSTERREICH“, 2015. Zugegriffen: 4. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/anpassungsstrategie/publikationen/oeks15.html
- [43] „RIS - Bautechnikverordnung - Landesrecht konsolidiert Vorarlberg, Fassung vom 30.01.2023“. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrVbg&Gesetzesnummer=20000735&FassungVom=2023-01-30> (zugegriffen 11. Juli 2023).
- [44] redM-S. ch Brüttsellen-Zurich info@redM-Software ch, Marcel Rossi, CH-8306, „SIA-Shop Produkt - ,SIA 2024 / 2021 D - Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik (Normenwerk => Architekt)““. <http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/sia%202024/d/2021/D/Product> (zugegriffen 11. Juli 2023).
- [45] L. Vorarlberg, Hrsg., „Kreditinformationsblatt zum Neubauförderungsantrag- Hauptmerkmale, Kosten und Risiken eines Neubauförderungskredits“. 2022. Zugegriffen: 12. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://vorarlberg.at/documents/302033/472819/Kreditinformations-blatt+zum+Neubauantrag+%28RL+2020+++2021%29.pdf/88463f32-207c-5fc8-96f3-f2a4a5aa78ef>
- [46] „What is a Key Performance Indicator (KPI)? Guide & Examples“, *Qlik*. <https://www.qlik.com/us/kpi> (zugegriffen 12. Juni 2023).
- [47] B. Chimani und M. Hofstätter, „ÖKS15 als Basis für Klimakommunikation und Klimaservices“, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, 2.0, 2016. Zugegriffen: 14. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://klimaszenerien.at/oeks-15/>
- [48] „Bevölkerung Vorarlberg 2023“. Zugegriffen: 13. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://vorarlberg.at/documents/302033/472238/Bev%C3%B6lkerung+M%C3%A4rz+2023.pdf/7211192e-4b40-f12a-c186-e9b4f90b601f?t=1681366346277>

- [49] J. Stoll, „IPCC-Bericht: Klimawandel verläuft schneller und folgenschwerer“, *Umweltbundesamt*, 9. August 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/ipcc-bericht-klimawandel-verlaeuft-schneller> (zugegriffen 10. März 2023).
- [50] J. Berger, „Kyoto-Protokoll“, *Umweltbundesamt*, 25. Juli 2013. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/kyoto-protokoll> (zugegriffen 11. März 2023).
- [51] o.A., „1. Hauptsatz“, *IV. Die Hauptsätze der Thermodynamik*. https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/thermodynamik/IN-HALT/HS1.HTM (zugegriffen 22. März 2023).
- [52] H.-J. Lüdecke und R. Link, „Der Treibhauseffekt“. 2010. Zugegriffen: 20. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://220749.webhosting66.1blu.de/co2Klima/Erklaerung-WieCO2Wirkt.pdf>
- [53] „Figure 2: Global heat flows (Kiehl and Trenberth, 1997).“, *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Global-heat-flows-Kiehl-and-Trenberth-1997_fig2_242180386 (zugegriffen 20. März 2023).
- [54] promet, Hrsg., „Numerische Klimamodelle – Was können sie, wo müssen sie verbessert werden?“, Nr. 3/4, S. 11, Dez. 2002.
- [55] johanna, „Der Treibhauseffekt - natürlich vs. anthropogen“, *Nachhaltig in Graz*, 8. April 2021. <https://nachhaltig-in-graz.at/der-treibhauseffekt-natuerlich-vs-anthropogen/> (zugegriffen 16. April 2023).
- [56] IEA, „Global CO2 emissions in 2019 – Analysis“, *IEA*, 2020. <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019> (zugegriffen 24. März 2023).
- [57] Statista, „Weltweite Treibhausgasemissionen bis 2019“, *Statista*, 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/311924/umfrage/treibhausgasemissionen-weltweit/> (zugegriffen 24. März 2023).
- [58] Bea (Name), „CO2-Konzentration 423 ppm – so hoch wie noch nie!“, 2023. <https://nachhaltig-in-graz.at/co2-konzentration-aktuell/> (zugegriffen 6. März 2023).
- [59] „Summary for Policymakers“, IPCC, Cambridge, New York, 2014. Zugegriffen: 7. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf
- [60] S. Wilke, „Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen“, *Umweltbundesamt*, 27. August 2013. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen> (zugegriffen 24. März 2023).
- [61] X. Lan, „VERWENDUNG VON NOAA-GML-DATEN“. 2023. Zugegriffen: 5. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_ann-mean_gl.txt
- [62] O. US EPA, „Understanding Global Warming Potentials“, 12. Januar 2016. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> (zugegriffen 16. April 2023).
- [63] „Mikroklima - Klima Wissen“, o.J. <https://klima.org/wissen/mikroklima/> (zugegriffen 7. März 2023).
- [64] „Nachhaltiges Bauen: Neuer Fokus auf das Mikroklima“, o.J. <https://www.klimawandelanpassung.at/newsletter/nl30/kwa-nachhaltig-bauen-mikroklima> (zugegriffen 7. März 2023).
- [65] „Stricker - Städtische Grünflächen und -Räume.pdf“. Zugegriffen: 11. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/publikationen/kompass_themenblatt_natur_stadt_2015_net.pdf
- [66] „ZAMG Urban Modelling“, Wien, 2017. Zugegriffen: 14. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: [zamg_broschuere_stadtklima_20170421.pdf](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/neues-computermodell-zur-untersuchung-von-hitze-in-staedten)
- [67] „Neues Computermodell zur Untersuchung von Hitze in Städten — ZAMG“, 2020. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/neues-computermodell-zur-untersuchung-von-hitze-in-staedten> (zugegriffen 6. Juli 2023).
- [68] M. Stangl u. a., „Klimastatusbericht Österreich 2021“, CCCA, Graz, 2022. Zugegriffen: 12. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter:

- https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/Klimastatusbericht/KSB_2021/Klimastatusbericht_OEsterreich_2021_20220412.pdf
- [69] C. Tuholske u. a., „Global urban population exposure to extreme heat“, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Bd. 118, Nr. 41, S. e2024792118, Okt. 2021, doi: 10.1073/pnas.2024792118.
- [70] „Klimastatusbericht_OEsterreich_2021_20220412.pdf“. Zugegriffen: 4. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/Klimastatusbericht/KSB_2021/Klimastatusbericht_OEsterreich_2021_20220412.pdf
- [71] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Hitze“, *Klimawandelanpassung*, o.J. <https://www.klimawandelanpassung.at/kwa-allgemein/kwa-klimaszenarien/kwa-szen-hitze> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [72] GeoSphere Austria, „Lufttemperatur“, o.J. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur> (zugegriffen 1. April 2023).
- [73] „alpenklima - Klimazustand in den Zentral- und Ostalpen“, DWD, GeoSphere Austria und Meteo Schweiz, 2023. Zugegriffen: 18. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/zweiter-bericht-zum-alpenklima-in-deutschland-oesterreich-und-der-schweiz>
- [74] GeoSphere Austria, „Hitze“, o.J. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/alpenraum/hitze> (zugegriffen 15. Mai 2023).
- [75] „RCP- und SSP-Szenarien“. Hamburger Bildungsserver, o.J. Zugegriffen: 1. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://bildungsserver.hamburg.de/rcp-ssp-szenarien-253632>
- [76] „Emissionsszenarien“. GeoSphere Austria, o.J. Zugegriffen: 16. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/emissionsszenarien>
- [77] F. Kreienkamp, B. Früh, S. Kotlarski, C. Linke, M. Olefs, und I. Schauser, „Empfehlungen für die Charakterisierung ausgewählter Klimaszenarien“. 2022. Zugegriffen: 23. April 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_news/2022/szenariennamen-stand_20220315/at_download/file
- [78] „Primer to Climate Scenarios“, *Primer to Climate Scenarios*. <https://climatescenarios.org/primer/mitigation/> (zugegriffen 5. Mai 2023).
- [79] „Integrierte Bewertungsmodelle (IAMs) und Energie-Umwelt-Wirtschaft (E3)-Modelle | UNFCCC“. <https://unfccc.int/topics/mitigation/workstreams/response-measures/modelling-tools-to-assess-the-impact-of-the-implementation-of-response-measures/integrated-assessment-models-iams-and-energy-environment-economy-e3-models> (zugegriffen 5. Mai 2023).
- [80] Umweltbundesamt, „Klimaszenarien“, 2023. <https://www.klimawandelanpassung.at/kwa-allgemein/kwa-klimaszenarien> (zugegriffen 5. Mai 2023).
- [81] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Klimaszenarien für Österreich“, o.J. https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/anpassungsstrategie/publikationen/oeks15.html (zugegriffen 7. Mai 2023).
- [82] „RCP-Szenarien | Climate Data Check“, o.J. <https://cdatac.de/index.php/extrapol/rcp/> (zugegriffen 23. April 2023).
- [83] „Emissions Scenario Pathways | Climate Watch“. <https://www.climate-watchdata.org/pathways/scenarios/200> (zugegriffen 3. Juli 2023).
- [84] Coast Adapt, Australian Government, und NCCARF, Hrsg., „What are the RCPs?“ o.J. Zugegriffen: 18. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://coastadapt.com.au/sites/default/files/infographics/15-117-NCCARFINFOGRAPHICS-01-UPLOADED-WEB%2827Feb%29.pdf>
- [85] „ÖKS15: Neue Daten zum Klimawandel für Österreich“. <https://www.klimawandelanpassung.at/newsletter/nl22/kwa-oeks15> (zugegriffen 12. Juli 2023).
- [86] „Neue Klimaszenarien für Österreich — ZAMG“, 2022. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/neue-klimaszenarien-fuer-oesterreich> (zugegriffen 6. Juli 2023).

- [87] C. Nadler, „Auslegungskriterien der thermischen Behaglichkeit für Heiz- und Kühllastberechnungen“.
- [88] „Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit [Passipedia DE]“, 2022. https://passipedia.de/grundlagen/bauphysikalische_grundlagen/thermische_behaglichkeit/einflussgroessen_auf_die_thermische_behaglichkeit (zugegriffen 21. Juni 2023).
- [89] K. Schild und W. M. Willems, *Wärmeschutz: Grundlagen – Berechnung – Bewertung*, 3. Auflage. in *Detailwissen Bauphysik*. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2022.
- [90] „mz-sommerlicher_waermeschutz-2015-2.pdf“. Zugegriffen: 2. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.juwoe.de/de/downloads/pdf/Broschuere_MZ_Verbaende/mz-sommerlicher_waermeschutz-2015-2.pdf
- [91] „RIS - Bautechnikverordnung - Landesrecht konsolidiert Vorarlberg, Fassung vom 27.06.2023“, 2023. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrVbg&Gesetzesnummer=20000735> (zugegriffen 27. Juni 2023).
- [92] I. N. Rendón-Enríquez, U. Scherf, und M. W. Tausch, „Impulse für Jugend Forscht & Co“, 2016, [Online]. Verfügbar unter: https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiedidaktik/files/publications/pdn_8_65_16-elektrochrome_fenster.pdf
- [93] A. N. Radermacher, „Potenziale zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens von Gebäuden und Bewertung am Beispiel der Sohlplattenkühlung Passive Kühlsysteme“, S. 202, 2020, doi: 10.17170/KOBRA-202010201975.
- [94] J. Scherret, „Natürliche und maschinelle Lüftung. Änderungen ÖNORM 2019“, *Archiphysik*, 14. Januar 2020. <https://archiphysik.at/natuerliche-und-maschinelle-lueftung-aenderungen-oenorm-2019/> (zugegriffen 3. Juli 2023).
- [95] „Features“, *Meteonorm (de)*. <https://meteonorm.meteotest.ch/meteonorm-features> (zugegriffen 21. Juli 2023).
- [96] „Österreich - Temperatur 2022“, *Statista*, 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1010233/umfrage/temperatur-in-oesterreich/> (zugegriffen 21. Juli 2023).
- [97] „Klimamonitoring — ZAMG“, 2023. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring/?station=11104¶m=t&period=period-y-2022&ref=1> (zugegriffen 21. Juli 2023).
- [98] N. O. and A. A. US Department of Commerce, „What are El Nino and La Nina?“ <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html> (zugegriffen 24. Juli 2023).
- [99] C. Inigo, D. Österreicher, und M. Treberspurg, „Hitze! vermeiden - Vermeidung sommerlicher Überwärmung im Wohnbau“, Wien, Nov. 2017. Zugegriffen: 8. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agendajosefstadt.at/files/bezirk_8/projekte/2019/Begruenung/leitfaden_HitzeVermeiden_MA20_2017.pdf
- [100] W. M. Willems, K. Schild, und S. Dinter, *Vieweg-Handbuch Bauphysik. 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung*, 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2006. Zugegriffen: 12. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-8348-9123-5_4
- [101] K. Schild, *Wärmebrücken: Berechnung und Mindestwärmeschutz*. in *Detailwissen Bauphysik*. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2018.
- [102] L. Rothfus, „The Heat Index ‚Equation‘ (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index)“. 1990. Zugegriffen: 15. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.weather.gov/media/ffc/ta_htindx.PDF
- [103] A. Dentel und U. Dietrich, „Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden“.
- [104] „DIN EN 16798-1:2022-03, Energetische Bewertung von Gebäuden_ - Lüftung von Gebäuden_ - Teil_1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik_ - Modul M1-6; Deutsche Fassung EN_16798-1:2019“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3327351.
- [105] Stadt, „Lufttemperatur in Wien 1955 bis 2022 - Offizielle Statistik der Stadt Wien“, 2023. <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/temperatur-zr.html> (zugegriffen 26. Juli 2023).
- [106] M. F. Jentsch, „Entwicklung eines Sommerreferenzjahres zur Bestimmung der sommerlichen Überhitzung von Gebäuden“.

- [107]M. Vukadinovic, C. Kempkes, und A. Maas, „AUSWIRKUNGEN KLIMATISCHER VERÄNDERUNGEN AUF DIE ÜBERHITZUNG VON GEBÄUDEN“, Sep. 2020.
- [108]World Bank, *Analysis of Heat Waves and Urban Heat Island Effects in Central European Cities and Implications for Urban Planning*. Washington: World Bank, Washington, DC, 2020. doi: 10.1596/34335.
- [109]S. M. Oswald u. a., „Using urban climate modelling and improved land use classifications to support climate change adaptation in urban environments: A case study for the city of Klagenfurt, Austria“, *Urban Clim.*, Bd. 31, S. 100582, März 2020, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100582.
- [110]J. N. Nackler, „SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ - Vergleich von Berechnungsansätzen und Entwicklung eines Planungsinstrumentes für Entwurfsfindung und Nachweis“, Technische Universität Wien, Wien, 2017. Zugegriffen: 1. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://architektur-bauforschung.at/wp-content/uploads/2020/05/20170512_TU-Bib_DissNac_Small.pdf

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Dornbirn, am 01.08.2023

Lucian Armin Mikio Kellner