



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

MASTER-THESIS
STUDIENGANG MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING
mit Vertiefung BUILDING TECHNOLOGIES
am Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau INEB

**Nutzung der freien Kühlung mittels mechanischer
Lüftung zur Verbesserung der Nachtauskühlung**

Philippe MARCLAY

Betreut durch
Prof. Dr.-Ing. Achim GEISLER

19.07.2024

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Thema der thermischen Gebäudesimulation im Zusammenhang mit der Nachtauskühlung. Als Grundlage dient ein bestehendes und validiertes EnergyPlus™-Modell, welches die natürliche Fensterlüftung mittels Airflow Network simulieren kann. Als Grundlage für das Modell dient ein Bürogebäude im urbanen Teil der Stadt Basel. Um die Realität noch besser abbilden zu können und weitere Fragestellungen beantworten zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit die real vorhandene mechanische Lüftungsanlage im Modell ergänzt. Ziel ist es, Möglichkeiten und Hürden im Zusammenhang mit dem Modellieren komplexer Anlagentechnik in thermischen Simulationsmodellen festzustellen. Darüber hinaus sollen neue Erkenntnisse zur Nutzung der mechanischen Lüftungsanlage als Teil der freien Kühlung gewonnen werden. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss der Lüftungsanlage, als Ergänzung zur natürlichen Nachtauskühlung über die Fensterlüftung, gering ist. Der Modellierungsaufwand hingegen ist gross und eine automatische Datenübernahme aus dem bestehenden 3D-BIM Modell des Gebäudes ist nicht möglich. Zudem müssen Vereinfachungen aufgrund von erreichten Grenzen bei der Simulationssoftware gemacht werden. Ein zusätzliches Element dieser Arbeit stellt die Automatisierung von Simulationdurchführung und -auswertung dar. Durch die Nutzung von Wetterprognosedaten wird ermöglicht, den Betrieb des Gebäudes optimaler vorhersehen und regulieren zu können. Dies soll durch die Anpassung der Regelung im Gebäudeleitsystem einen positiven Effekt auf die Behaglichkeit für die Gebäudenutzenden haben. Ein Ansatz dazu wurde erarbeitet und die Möglichkeiten davon werden aufgezeigt.

Abstract

This work deals with the topic of thermal simulation in connection with night cooling. The basis for this is an existing and validated EnergyPlus™ model, which can simulate natural window ventilation using the Airflow Network. The model is based on an office building in the urban part of the city of Basel. To better represent reality and answer further questions, the ventilation system in the model will be supplemented as part of this work. The aim is to identify possibilities and hurdles associated with modelling complex building systems in thermal simulation models. Furthermore, new insights into the use of the mechanical ventilation system as part of free cooling should be gained. It turns out that the influence of the ventilation system, as a supplement to natural night cooling via window ventilation, is very low. However, the modelling effort is high, and automatic data transfer from the existing 3D BIM model of the building is not possible. Additionally, simplifications must be made due to limitations reached in the simulation software. Another element of this work is the automation of simulation execution and evaluation. By using weather forecast data, it should be possible to predict and regulate the building's operation more optimally. This should have a positive effect on the comfort of the building's occupants by adjusting the control in the building management system. An approach to this was developed, and its possibilities are demonstrated.

Abkürzungsverzeichnis

ABL	Abluft
API	Application Programming Interface
AUE BS	Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt
AUL	Aussenluft
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFT	Conduction Finite Difference
CondFD	Conduction Transfer Function
DRY	Design Reference Year
DT	Digital Twin
epw	EnergyPlus-Weatherfile (spez. Dateiformat für Wetterdaten in EnergyPlus™)
Erl	EnergyPlus™ runtime language
FOL	Fortluft
GLS	Gebäudeleitsystem
IDD	Input Data Directory (Liste aller EnergyPlus™ Elemente)
IDF	Input Data File (Modell-Datei für EnergyPlus™ Simulation)
IFC	Industry Foundation Classes (Standard im Bauwesen zur digitalen Beschreibung von Gebäudemodellen)
MPC	model-based predictive control
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
NAK	Nachtauskühlung
Objekt «AUE BS»	Objekt Amt für Umwelt und Energie an der Spiegelgasse 15, 4051 Basel
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
TH	Treppenhaus
VAV	Variable Air Volume (Variable Luftmenge)
VP1	Vertiefungsprojekt 1
VP2	Vertiefungsprojekt 2
ZUL	Zuluft

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis.....	X
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Problem- und Fragestellung	1
1.3 Zielsetzung	2
1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit	3
1.5 Abgrenzung	3
2 Grundlagen	4
2.1 Objekt «AUE BS»	4
2.1.1 Multizonen-Simulationsmodell des Objekts «AUE BS»	4
2.1.2 Raumgruppen.....	6
2.1.3 Ausgangslage der verfügbaren Informationen	7
2.2 Theorie	8
2.2.1 Digitaler Zwilling.....	8
2.2.2 MPC – Model Predictive Control	8
2.2.3 Multizonen-Simulationsmodelle	9
2.2.4 Airflow Network (AFN)	10
2.3 Literaturübersicht	11
3 Simulationsautomatisierung in EnergyPlus™	12
3.1 Thermischen Gebäudesimulationen in EnergyPlus™ für die Betriebsoptimierung	12
3.2 Ziel der Automatisierung.....	12
3.3 Geeignete Faktoren für die Automatisierung	13
3.3.1 Vorgegebene Faktoren für die thermische Gebäudesimulation	13
3.3.2 Evaluation der Faktoren zur Automatisierung	14
3.3.3 Umsetzung für das Objekt «AUE BS» im EnergyPlus™-Simulationsmodell.....	15
3.4 Werkzeuge zur automatisierten Modellanpassung in EnergyPlus™	16
3.4.1 Python-Modul «ppy».....	16
3.4.2 Python-Modul «pyidf».....	16
3.4.3 Python-Modul «epsim».....	17
3.5 Automatisierte Bereitstellung der Wetterdaten für EnergyPlus™.....	17
3.5.1 Evaluation Lieferanten von Wettervorhersagedaten	17
3.5.2 Abrufen von Wetterprognosedaten und generieren einer epw-Datei	18
3.6 Automatisierte Simulation und Auswertung von Varianten	20
3.7 Prozess zur automatisierten Gebäuderegulierung.....	21
4 Nachtauskühlung durch Fensterlüftung in Räumen	23
4.1 Simulierter Luftvolumenstrom	23
4.2 Berechnung des Luftvolumenstroms bei einseitiger Fensterlüftung	23
4.2.1 Methode nach Warren & Parkins	24
4.2.2 Methode nach De Gids & Phaff	25
4.3 Vergleich simulierter und berechneter Luftvolumenstrom.....	25
5 Implementieren der Lüftungsanlage in bestehendes Simulationsmodell.....	26
5.1 Grundlagen der Anlagentechnik im «AUE BS».....	26
5.1.1 Zentrale Luftaufbereitung	26
5.1.2 Fernwärme	27
5.1.3 Luftverteilung / Kanalnetz im Gebäude	27
5.2 Werkzeuge zur Modellierung der Anlagentechnik in EnergyPlus™	29

5.3	Struktur und Implementieren der Anlagentechnik in EnergyPlus™	30
5.3.1	Gesamtsystem «HVAC»	31
5.3.2	AirLoopHVAC	31
5.3.3	AFN / Verknüpfung der Komponenten.....	32
5.4	Zentrale Lüftungsanlage (Supply Side).....	34
5.4.1	Aussenluft	34
5.4.2	Wärmetauscher	34
5.4.3	Ventilator	34
5.4.4	Lufterhitzer im Monoblock (Coil:Heating:Water)	35
5.5	Luftverteilung in die Zone (Demand Side).....	35
5.5.1	Kanal-Verzweigungen	35
5.5.2	Kanalsegmente	36
5.5.3	Überströmung in Zonen	37
5.5.4	Lufteinlässe / -auslässe pro Zone	37
5.5.5	Lufterhitzer im Zoneneinlass (AirTerminal / Coil:Heating:Electric).....	37
5.5.6	Schalldämpfer	38
5.6	Heizungsinstallation	38
5.7	Generelle Vereinfachungen	39
5.7.1	Zonen im 01.UG	39
5.7.2	Variabler Volumenstrom.....	39
5.7.3	Verzicht auf Komponenten (Schalldämpfer, Rohrbögen).....	39
5.7.4	Anzahl Zu- und Abluftkanäle bzw. Lüftungsauslässe pro Zone	39
5.8	Finale Implementierung der Anlagentechnik im Modell.....	40
5.8.1	Hydraulischer Abgleich des Modells	40
5.8.2	Prüfen der Funktionsweise des Simulationsmodells	41
6	Einfluss der Nutzung der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung	42
6.1	Initiale Simulation	42
6.1.1	Grafische Auswertung.....	42
6.1.2	Erkenntnisse für die weitere Bearbeitung	44
6.2	Methode zur quantifizierten Auswertung	44
6.3	Randbedingungen und Simulationsparameter	45
6.3.1	Betriebszeit der Lüftungsanlage.....	45
6.3.2	Nächtliche Aussentemperatur als primäre Randbedingung	46
6.3.3	Öffnungszustand der Klappen zum Treppenhaus und Dämmung der Lüftungskanäle als weitere Randbedingungen.....	46
6.4	Modell-Konfigurationen.....	47
6.5	Auswertung der Simulationsvarianten.....	48
6.5.1	Kalte Nächte (03.-09.06.2023).....	49
6.5.2	Tropennächte (19.-25.08.2023).....	50
6.5.3	Referenzzeitraum (13.-19.07.2023).....	51
6.5.4	Quantifizierte Ergebnisse	51
6.5.5	Differenzierte Betrachtung Tag- und Nachttemperaturen	55
6.5.6	Fazit der Simulationsergebnisse.....	56
7	Optimieren der bestehenden Nachtauskühlung	57
7.1	Möglichkeiten zur Optimierung der Nachtauskühlung	57
7.1.1	Anpassen der zeitlichen Verfügbarkeit der NAK.....	57
7.1.2	Senken der unteren Zieltemperatur	57
7.2	Optimierungsvarianten der Nachtauskühlung	58
7.3	Auswertung der Optimierungsvarianten.....	59
7.3.1	Senken der Zieltemperatur ohne zeitliche Anpassung	59
7.3.2	Senken der Zieltemperatur mit zeitlicher Anpassung	61
7.3.3	Quantifizierte Ergebnisse	62
7.3.4	Erweiterter Betrachtungszeitraum.....	63
7.4	Temperatureindringtiefen und Wärmespeicherung	64

7.4.1	Decken / Böden.....	64
7.4.2	Wände	65
7.4.3	Fazit zur Temperatureindringtiefe.....	65
8	Einfluss der Lufttemperatur und Strahlungswärme auf die operative Raumtemperatur.....	67
8.1	Erkenntnisse aus dem Objekt «AUE BS»	67
8.1.1	Einfluss der Nachtauskühlung auf die operative Raumtemperatur	67
8.1.2	Steuerung der Nachtauskühlung	68
8.2	Theoretischer Hintergrund	69
8.3	Grafische und Quantifizierte Auswertung.....	70
8.4	Methode zur Korrektur in EnergyPlus™.....	71
9	Resultate.....	73
9.1	Resultate Fensterlüftung zur Nachtauskühlung von Räumen.....	73
9.2	Resultate Automatisierung der Simulation und Auswertung von Varianten.....	73
9.3	Resultate Einfluss der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung	73
9.4	Resultate Optimierung der Nachtauskühlung.....	74
9.5	Resultate Einfluss der Lufttemperatur und Strahlungswärme auf die operative Raumtemperatur.....	74
10	Erkenntnisse und Diskussion	75
10.1	Erkenntnisse zu den Resultaten	75
10.2	Diskussion und Ausblick.....	76
	Literaturverzeichnis	78
	Theoretische Grundlagen.....	81
	Anhang 1: Skript «eppyAUE»	85
	Anhang 2: Skript «meteomatics_epw»	88
	Anhang 3: Skript «AUEbuildingregulation»	89
	Anhang 4: «Lüftungspläne».....	92
	Anhang 5: «Modellierung in EnergyPlus™».....	95
	Anhang 6: «Auswertung der Simulationen»	98
	Anhang 7: Programmablauf Nachtauskühlung	101
	Anhang 8: «Übersicht Temperaturverlauf Sommer»	102
	Anhang 9: «Auswertung operative Raumtemperatur»	103
	Anhang 9: «EMS-Programm»	104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Ansicht des EnergyPlus-Modells des Objekts «AUE BS».....	5
Abbildung 2. Darstellung des Multizonen Modells für das Beispiel der Stockwerke 1-5. Die Punkte stellen anhand ihrer Farbe eine Zone dar. Die Balken ein Element, durch welches ein Luftaustausch stattfindet.	5
Abbildung 3. Luftströme an den Aussenklappen der Fassade a) - c) sowie durch die Oblichter d) und die Klappen im Treppenhaus f) - h) ins Treppenhaus e) gemäss dem Beschrieb im Text.	6
Abbildung 4. Zonen im Objekt «AUE BS».	7
Abbildung 5. Übersicht über die Charakteristiken der Datenflüsse in der digitalen Repräsentation eines Objekts unterteilt nach Reifegrad (Darstellung aus [13]).....	8
Abbildung 6. Darstellung eines Beispiels für ein Airflow Network (Darstellung aus [18, S. 1084]). ...	10
Abbildung 7. Subprozess für die automatisierte Erstellung einer epw-Datei.....	19
Abbildung 8. Methode zur Automatisierung von Simulation und Auswertung von Varianten.....	20
Abbildung 9. Neue Methode «AUEbuildingregulation» zum Generieren von Vorgaben zur Regulierung des Gebäudes. Die rot hinterlegten Elemente gehören zum finalen Prozess, werden aber im erarbeiteten Skript aktuell nicht umgesetzt.	22
Abbildung 10. Ausgabe des Setpoint für Temperatur und Zeit für die Nachtauskühlung.....	22
Abbildung 11. Automatisierte Aussenklappe im Objekt «AUE BS» zum Luftwechsel bzw. als Nachströmöffnung für die Nachtauskühlung	24
Abbildung 12. Vereinfachte Darstellung der Lüftungsanlage; Luftaufbereitung ohne Kanalnetz zu den Zonen. (Eigene Darstellung basierend auf Elementen aus [9]).....	26
Abbildung 13. Beispiel eines schallgedämmten Überströmelement der Firma Durrer Technik, wie es im Gebäude «AUE BS» verbaut ist. (Bild aus [52])	27
Abbildung 14. Darstellung Überströmöffnungen im 01.OG aus [7].	28
Abbildung 15. Übersicht über die Zu- und Abluftöffnungen im der Raumgruppe «Grossraumbüro»....	28
Abbildung 16. Schematische Darstellung des AirLoopHVAC des Modells «AUE BS» (eigene Darstellung).	32
Abbildung 17. AFN-Anbindung der Zonen anhand des Beispiels von der Zone O1 020.	33
Abbildung 18. Ergänzte Darstellung des AFN mit den Knotenpunkten der Lüftungsanlage.....	33
Abbildung 19. Fehlermeldung aus EnergyPlus bei mehr als einem modellierten Ventilator im AFN....	34
Abbildung 20. Schematische, eigene Darstellung des modellierten PlantLoop (vergrösserbar)	38
Abbildung 21. Links: Erstes Ergebnis der Simulation für die Periode vom 31.07. – 04.08.2023 für die Grossraumbüros O1 020 (oben) und O5 020 (unten) ohne merklichen Unterschied zwischen den beiden Szenarien. Rechts: Zweites Ergebnis der Simulation für die Periode vom 01.- 16.07.2023 für die Grossraumbüros O1 020 (oben) und O5 020 (unten) mit einem Unterschied zwischen den beiden Szenarien welche jedoch auf das Wochenende (08.-09.07.2023 bzw. 15.07) zurückzuführen ist.	43
Abbildung 22. Einteilung der eigenen Begriffsdefinition die die Grafik über den zulässigen Bereich der empfundenen Temperatur in Büro- und Wohngebäuden aus der SIA 180 [25, S. 25].....	45
Abbildung 23. Aussentemperaturen im Zeitraum vom 01.06. - 31.08.2023.	46
Abbildung 24. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für das Grossraumbüro O1 020 bei kühlen Aussentemperaturen (hellblau) betrachtet über drei Varianten. Variante 1-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 1-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 1-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb.....	49
Abbildung 25. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für den Druckerraum O1 002 betrachtet über drei Varianten. Variante 1-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 1-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 1-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb	50
Abbildung 26. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für das Grossraumbüro O1 020 bei Tropennächten (hellblau) betrachtet über drei Varianten. Variante 2-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 2-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 2-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb.....	50
Abbildung 27. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für das Grossraumbüro O1 020 während dem Referenzzeitraum betrachtet über drei Varianten. Variante 3-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung	

und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 3-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 3-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb	51
Abbildung 28. Darstellung des oszillierenden Verhaltens der Aussenklappen, wenn die gemessene Raumtemperatur in °C in der Cafeteria O7 020 in der Nacht vom 07.08.2023 unter 21°C fällt. Der Anstieg der Raumtemperatur zu Beginn ist auf den Umstand der Sonneneinstrahlung auf den Sensor zurückzuführen.	58
Abbildung 29. Temperaturverläufe und Öffnungszustände der Aussenklappen für das Grossraumbüro O1 020 für die Periode vom 19. - 25.08.2023. Die Öffnungszustände der Aussenklappen sind bezeichnet mit «FE».....	59
Abbildung 30. Temperaturverläufe und Öffnungszustände der Aussenklappen für das Grossraumbüro O1 020 für die Periode vom 03.-09.06.2023. Die Öffnungszustände der Aussenklappen sind bezeichnet mit «FE».....	60
Abbildung 31. Vergleich der Variante 6-5 (Zieltemperatur 19 °C) und der Variante 6-8 (Zieltemperatur 16 °C).....	61
Abbildung 32. Effekte auf die Raumtemperaturen bei unterschiedlichen Zeitvorgaben für die Schliessung der Aussenklappen am Morgen. Insbesondere der Effekt der Lüftungsanlage ist feststellbar.	61
Abbildung 33. Vergleich der Varianten 6-5 und 6-15 welche das Zustandekommen des «negativen Effekts» aufzeigt und gleichzeitig zeigt, dass der Betrieb der Lüftungsanlage ab 07:00 Uhr den Raum wieder abkühlt.....	62
Abbildung 34. Auszug aus der Simulation über den gesamten Sommer. Feststellbare Unterschiede bei der Raumtemperatur bei Verwendung verschiedener Zieltemperaturen der Nachtauskühlung.	63
Abbildung 35. Auszug aus der Norm SN EN ISO 7726 zur operativen Raumtemperatur.	69
Abbildung 36. Vergleich der gemessenen und der simulierten operativen Raumtemperatur für die Räume O1 020 (oben) und O5 020 (unten).	70
Abbildung 37. Vergleich der gemessenen (hellblau) und der korrigierten operativen Raumtemperatur (grün/violett) für die Räume O1 020 (oben) und O5 020 (unten).	70
Abbildung 38. Darstellung der Öffnungszustände der Aussenklappe am Beispiel des Raum O1 020....	72
Abbildung 39. Darstellung des «Neutral Pressure Level» in der Mitte der Gebäudehöhe. Bei kühleren Aussentemperaturen als Innentemperaturen dringt die Luft unter dem NPL ins Gebäude ein und verlässt dieses über dem NPL wieder. (Darstellung angepasst aus [65]).....	84
Abbildung 40. Darstellung des verzweigten Lüftungskanalnetz im Gebäude «AUE BS». Rot sind die Zuluftkanäle und gelb die Abluftkanäle. Dazu grau und grün Kanäle, welche isoliert sind.	92
Abbildung 41. Konfiguration des AirLoopHVAC für das Modell «AUE BS».....	95
Abbildung 42. Ursprünglich geplante Darstellung des AFN bevor die Limitationen der Luftverteilung festgestellt wurden (vergrösserbar).	96
Abbildung 43. Verknüpfung der regulären EnergyPlus™ Elemente mit den AFN-Elementen aus [38, S. 1099].	97
Abbildung 44. Programmablauf Nachtauskühlung.	101
Abbildung 45. Temperaturverlauf der Grossraumbüro O1 020 über den gesamten Sommer mit einer variierenden Zieltemperatur der Nachtauskühlung von 19°C (orange), 18°C (grün) und 16°C (hellblau)	102
Abbildung 46. Auswertung für den Raum O1 020. Reguläre (oben) und korrigierte Simulation (unten).	103
Abbildung 47. Auswertung für den Raum O5 020. Reguläre (oben) und korrigierte Simulation (unten).	103
Abbildung 48. EMS-Programm zum Verwenden der operativen Raumtemperatur statt der Lufttemperatur für die Steuerung der Aussenklappen.	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Symbolverzeichnis	X
Tabelle 2. Raumnummern pro Raumgruppe und Geschoss.	7
Tabelle 3. Evaluation verschiedener Anbieter von Wettervorhersagedaten über die erforderlichen Parameter für eine epw-Wetterdatei	18
Tabelle 4. Konfigurationsvarianten für die zeitliche und temperaturabhängige Öffnung der Aussenklappen.	21
Tabelle 5. Materialisierung verschiedener Lüftungskanäle im Objekt «AUE BS».	29
Tabelle 6. Parameter zur Erfassung eines Lüftungskanales im AFN.	36
Tabelle 7. Simulationszeiträume und -einstellungen für die Initiale Simulation.	42
Tabelle 8. Definierte Simulationsparameter für die EnergyPlus™-Simulationen.	47
Tabelle 9. Konfigurationsvarianten für die primären Simulationsdurchgänge.	48
Tabelle 10. Modellkonfigurationen für vergleichende Varianten der Klappen zum Treppenhaus und Oblichter.	48
Tabelle 11. Modellkonfigurationen für vergleichende Varianten der gedämmten Zu- und Abluftkanäle.	48
Tabelle 12. Kennzahlen für die einzelnen Zonen der Raumgruppe «Grossraumbüro» zu allen drei Zeiträumen für die Varianten mit der Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb (x-2) und im Dauerbetrieb (x-3).....	52
Tabelle 13. Kennzahlen für die Periode der Kalten Nächte für die einzelnen Zonen der Raumgruppe «Grossraumbüro» zu den Varianten mit geschlossenen Klappen und gedämmten Kanälen	53
Tabelle 14. Kennzahlen für die Periode der Tropennächte für die einzelnen Zonen der Raumgruppe «Grossraumbüro» zu den Varianten mit geschlossenen Klappen und gedämmten Kanälen	53
Tabelle 15. Quantifizierte Auswertung der Periode der kalten sowie der neutralen Nächte für den Zeitraum Tagsüber (von 07:00 – 19:00) im Vergleich mit den ganztägigen Werten.	56
Tabelle 16. Varianten zur Vorgabe der unteren Zieltemperatur sowie der zeitlichen Verfügbarkeit am Morgen.....	59
Tabelle 17. Quantifizierte Auswertung der Raumgruppe «Grossraumbüro» für die Optimierungsvarianten.....	62
Tabelle 18. Temperaturwerte [°C] für die Grossraumbüros (geschossweise) um 08:00 Uhr pro Tag.	63
Tabelle 19. Materialisierung der Innenwände.	65
Tabelle 20. Quantifizierte Auswertung der operativen und der korrigierten Raumtemperatur.	71
Tabelle 21. Variablen zur Bestimmung A-Faktors	83
Tabelle 22. Verteilung der Luftmengen pro Zone und Angaben zu Überströmungen von Raum zu Raum.....	94
Tabelle 23. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Sitzungszimmer»	98
Tabelle 24. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Archiv».....	98
Tabelle 25. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Druckerraum»	98
Tabelle 26. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «WC/Lager»	99
Tabelle 27. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Erdgeschoss»	99
Tabelle 28. Zusammenstellung der Simulationszeiten.....	100

Symbolverzeichnis

Tabelle 1. Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
cd	Durchlassfaktor (0.6)	[-]
F_{Wsg}	Faktor Wetterschutzgitter (limitierendes Element)	[-]
H	Höhe Öffnung	m
B	Breite Öffnung	m
A	Fläche (hier: Öffnungsfläche = HxB)	m ²
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
θ_i	Temperatur innen	K
θ_e	Temperatur aussen	K
T_a	Lufttemperatur (Air)	°C
T_o	Operative Temperatur	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	W / mK
t	Periodenlänge / Zeit	s
ρ	Dichte	kg / m ³
c	Spezifische Wärmespeicherkapazität	J / kgK
d	Dicke	m
σ	Temperatureindringtiefe	m

1 Einleitung

In diesem Kapitel geht es darum, die Ausgangslage für die vorliegende Master-Thesis darzulegen, die Fragestellung zu formulieren und auch die Abgrenzung zu definieren. Ebenso wird vorgestellt, wie die Arbeit aufgebaut ist und welches Ziel sie verfolgt.

1.1 Ausgangslage

Gebäude spielen eine entscheidende Rolle im Kontext des globalen Energieverbrauchs, wobei Schätzungen zufolge bis zu 40 % des weltweiten Energiebedarfs auf ihren Betrieb zurückzuführen sind [1]. In der Schweiz, wo die Energie-Versorgungssicherheit zwar aktuell gewährleistet ist, besteht dennoch ein kontinuierlicher Bedarf, den Energieverbrauch im nationalen Gebäudepark zu reduzieren.

Im Zuge der zunehmenden Digitalisierung im Baubereich eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Optimierung der Betriebsprozesse von Gebäuden. Digitale Zwillinge, die eine virtuelle Repräsentation physischer Gebäude bieten, stehen im Mittelpunkt dieser Entwicklung. Sie ermöglichen detaillierte Berechnungen und Simulationen in der Planungsphase aber auch während der Nutzung. Dies unterstützt nicht nur eine materielle und konstruktive Optimierung, sondern bietet auch erhebliche Potenziale zur Verbesserung des Gebäudebetriebs. Die Simulationsgrundlagen können während der Betriebsphase dazu genutzt werden, vorausschauende Entscheidungen bezüglich verschiedener operativer Strategien zu treffen. Anders als in der Industrie sind digitale Zwillinge im Bereich des Gebäudebetriebs aber mehr unkontrollierbaren äusseren Einflüssen wie dem Wetter oder dem Nutzerverhalten ausgesetzt. Zudem gibt es im Gebäudebetrieb auch öfter Veränderungen in der Nutzung oder tägliche Unterschiede z.B. bedingt durch neue Arbeitsformen wie dem Home-Office. Diese Komplexität erschwert Verallgemeinerungen, die ein einfaches Aufsetzen eines digitalen Zwillings ermöglichen würden. Lokale Unterschiede und vielfältige Einflussfaktoren müssen berücksichtigt werden, um eine präzise und effektive Betriebsüberwachung und -optimierung zu gewährleisten. Diese Vielschichtigkeit ist denn auch die Hauptmotivation, um im Bereich von digitalen Zwillingen im Gebäudebereich weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Im Rahmen der beiden Vertiefungsprojekte (VP1 und VP2) im ersten und zweiten Semester wurde eine Grundlage geschaffen, welche sich mit der Validierung und Optimierung von Simulationsmodellen befassen. Zudem wurden Aspekte der Dimensionierung einzelner Elemente der Nachtauskühlung wie Öffnungen und Klappen betrachtet. Weiter wurde auch die Wichtigkeit des Detaillierungsgrades von Temperatursensoren und Modellen generell erläutert. Zudem wurde eine Methode zur Visualisierung der in EnergyPlus™ simulierten Temperaturveränderung durch die Nachtauskühlung aufgezeigt. Diese bestehenden Elemente werden in dieser vorliegenden Arbeit weiter genutzt und verbessert.

1.2 Problem- und Fragestellung

Ziel der Master-Thesis ist die vertiefte Bearbeitung der Themen Nachtauskühlung, thermische Simulation, und digitaler Zwilling. Beim digitalen Zwilling geht es insbesondere auch um die

Visualisierung der Betriebszustände zum verbesserten Verständnis der Funktionsweise. Basierend auf den Erkenntnissen aus dem VP1 und VP2 sollen folgende Forschungsfragen untersucht werden.

1. **Automatisierung der Modellanpassung** In welchen Fällen lassen sich in EnergyPlus™ automatisierte Modellanpassungen vornehmen, um ein Modell zu optimieren, ohne die Veränderung im Modell direkt vorzunehmen? In welchem Umfang und welcher Tiefe lassen sich die Anpassungen im Modell in einem Workflow automatisch durchlaufen, um so die optimale Einstellung zu finden? In welchen Fällen im Kontext des digitalen Zwillings machen diese Automatisierungen auch Sinn?
2. **Einfluss der Lüftungsklappen auf die Nachtauskühlung** Welchen Einfluss haben die Lüftungsklappen bzw. das Treppenhaus mit den Oblichtern (Kamineffekt) auf die Nachtauskühlung? Welche Luftmengen werden bei einer einseitigen Fensterlüftung pro Stockwerk umgesetzt? Kann die Nachtauskühlung auch ohne Kamineffekt, sondern nur über die einseitige Fensterlüftung funktionieren?
3. **Einfluss der Nutzung der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung** Wie verändert sich die Effektivität der Nachtauskühlung eines Gebäudes, wenn die natürliche Nachtauskühlung über den Kamineffekt durch die zusätzliche freie Kühlung über eine mechanische Lüftung ergänzt wird? Können die Raumtemperaturen nachhaltig, das heisst über den ganzen Tag, tiefer gehalten werden, ist der Effekt neutral oder gibt es gar eine Verschlechterung der Raumkonditionen?
4. **Nutzung der mechanischen Lüftung zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit** Wie lässt sich die freie Kühlung über die mechanische Lüftung dahingehend optimieren, dass sie nur dann eingesetzt wird, wenn die thermische Behaglichkeit für die Nutzer im Gebäudeinnern dies erfordert? Kann so die Betriebszeit der mechanischen Lüftung während der Nacht reduziert werden, sodass unter Wahrung des Komforts für die Nutzer der Stromverbrauch reduziert werden kann?
5. **Methodik zum Einfluss der Lufttemperatur und Strahlungswärme auf die Raumtemperatur:** Wie kann eine Methodik mittels EMS oder Python entwickelt werden, die es erlaubt, pro Zeitschritt individuelle Vorgaben für die Lufttemperatur und Strahlungswärme in einem EnergyPlus-Modell zu definieren, um die Genauigkeit der Simulation der Raumtemperatur zu verbessern?

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Master-Thesis ist die Betrachtung der freien Kühlung mittels mechanischer Lüftung als Ergänzung zur natürlichen Nachtauskühlung über den Kamineffekt anhand vom Beispiel des Gebäudes «AUE BS». Es geht darum zu verstehen, ob und falls ja, in welchem Umfang ein Mehrwert geschaffen werden kann, wenn die beiden Elemente in einem Hybrid-System genutzt werden. Dies sowohl energetisch aber auch im Bereich des Komforts für die Gebäudenutzerschaft. Um diese Untersuchung zu ermöglichen, soll die im digitalen Modell des Gebäudes «AUE BS» bisher noch nicht vorhandene mechanische Lüftungsanlage ins EnergyPlus-Modell integriert werden. Dadurch kann analysiert werden, inwiefern die freie Kühlung durch die mechanische Lüftung in Kombination

mit der natürlichen Nachtauskühlung zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit der Nutzer, während des Tages beitragen kann. Ein besonderes Augenmerk wird daraufgelegt, die freie Kühlung nur dann als Ergänzung zur natürlichen Nachtauskühlung zu nutzen, wenn es die besagte thermische Behaglichkeit erfordert. Dies um ein Optimum zwischen Energieeffizienz und damit verbundener Kostenreduktion sowie Nutzerkomfort zu ermöglichen. Dabei kann auch eine Orientierung am «model predictive control»-Ansatz (MPC) [2] stattfinden. Falls ein Mehrwert erkennbar ist, kann auch die Visualisierung der Luftströme und Temperaturverläufe im Modell genutzt werden, um die dynamischen Effekte der Kühlung und deren Einfluss auf das Gebäude besser zu verstehen.

1.4 Methodik und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit umfasst mehrere Themengebiete, und unterschiedliche Fragestellungen, welche teilweise aber aufeinander aufbauen. Es ist daher essenziell die Arbeiten in der richtigen Reihenfolge durchzuführen, da gewisse Teilergebnisse im weiteren Verlauf verwendet werden. Daher werden die Themen aus der Problem- und Fragestellung in einzelne Arbeitspakete (AP) aufgeteilt und so individuell bearbeitet. Zunächst wird die Methode zur Simulationsautomatisierung in EnergyPlus™ bearbeitet, da dadurch Potenzial entsteht, welches in der weiteren Bearbeitung der Fragestellung genutzt werden kann. Anschliessend wird die Funktionsweise der Fensterlüftung durch die händische Berechnung der Luftmengen plausibilisiert. Danach wird der intensivste Teil bearbeitet. Die Modellierung der Anlagentechnik im bestehenden Modell erfolgt Schritt für Schritt um die Funktionsweise fortwährend feststellen und dokumentieren zu können. Hier wird auch ein Augenmerk daraufgelegt, die Prozesse genau festzuhalten, um Erkenntnisse für spätere Arbeiten gewinnen zu können. Mit dem erweiterten Simulationsmodell werden dann verschiedene Varianten erstellt und ausgewertet. Anhand dieser Resultate wird dann der Effekt der mechanischen Lüftungsanlage auf die Nachtauskühlung beurteilt. Daraus ergeben sich verschiedene Optimierungsvarianten, welche erarbeitet werden. Zuletzt wird der Effekt der Strahlungswärme und Lufttemperatur auf die operative Raumtemperatur weiter untersucht, um Erkenntnisse für zukünftige Arbeiten zu gewinnen.

1.5 Abgrenzung

In dieser Arbeit werden keine CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics), welche mit CFD-Programmen erstellt werden, betrachtet. Dies schliesst auch wissenschaftliche Arbeiten ein, welche ausschliesslich Erkenntnisse aus solchen Simulationen behandeln. Der Fokus liegt auf zonalen Strömungssimulationen. Zudem werden für die Betriebsdaten und die Analyse der Arbeits- und Datenflüsse ausschliesslich die Werte des Objekts «AUE BS» betrachtet. Innerhalb des Gebäudes werden nur die Geschosse ab dem 01.OG bis zum 07.OG betrachtet. Die beiden Untergeschosse werden nicht näher betrachtet, da sie von der Nachtauskühlung nicht tangiert sind. Zudem werden detaillierte Auswertungen ausschliesslich für die Raumgruppe der Grossraumbüros und Cafeteria gemacht da sich die Gebäudenutzenden primär in diesen Räumen über eine längere Zeitdauer aufhalten.

2 Grundlagen

Das Kapitel Grundlagen soll eine einheitliche Ausgangslage schaffen, welche dazu dient, das bearbeitete Objekt sowie die grundlegenden Konzepte, welche in dieser Arbeit behandelt werden, zu verstehen.

2.1 Objekt «AUE BS»

Für alle praktischen Arbeiten in dieser Master-Thesis, welche einen Bezug zur Realität haben, wird das Objekt «AUE BS» beigezogen. Das Bürogebäude an der Spiegelgasse 15 in Basel wurde 2021 neu gebaut und stellt dem Amt für Umwelt und Energie der Stadt Basel (AUE BS) Arbeitsplätze für rund 70 Angestellte zur Verfügung. Es handelt sich dabei um ein «Leuchtturmprojekt» in Sachen Nachhaltigkeit und soll eine Vorbildwirkung in Sachen Energieeffizienz, Bauökologie und Architektur entfalten. Das Objekt umfasst 2'100m² Energiebezugsfläche und hat an der gesamten Fassade eine installierte Photovoltaikanlage von ca. 1'100m² Fläche. Gebaut wurde im «Minergie-A-ECO»-Standard. Minimale Raumlüftung mit Wärmerückgewinnung, Fernwärmenutzung, optimale Tageslichtnutzung und effiziente Beleuchtung sowie eine stark wärmegeämmte Gebäudehülle bilden das Herzstück des Gesamtenergiekonzepts. Mittels Betonholzverbunddecken sowie der Nachströmung über das Treppenhaus ist zudem eine Nachtauskühlung möglich. [3]

2.1.1 Multizonen-Simulationsmodell des Objekts «AUE BS»

Parallel zur realen Errichtung des Gebäudes wurde am Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau (INEB) der FHNW schrittweise ein digitales Modell vom Objekt zu thermischen Simulationszwecken in EnergyPlus™ (Version 22.2) aufgebaut [4]. Das Modell, beinhaltet in der aktuellen Ausgangslage, das heisst vor dem Bearbeiten dieser Master-Thesis folgende Elemente:

- Gebäudegeometrie
- Thermale Zonen
- Detaillierte Materialisierung der verbauten Komponenten (Wände, Decken, Fenster, etc.)
- Öffnungen (Türen, Fenster, Klappen, etc.) für die Nachtauskühlung
- Zonales Strömungsnetzwerk (Airflow-Network) für die Infiltration
- Interne Lasten (Personenbelegung, Beleuchtung und elektrische Geräte)
- Automatische Beschattung
- Einfluss der Nachbargebäude (Schattenwurf)
- Photovoltaikanlage (an der Fassade)

Eine Visualisierung davon ist in Abbildung 1 zu sehen. Wie beschrieben ist im bestehenden Simulationsmodell bereits ein Airflow Network (AFN) zur Simulation der Nachtauskühlung über die natürliche Fensterlüftung implementiert. Die Abbildung 2 zeigt dabei anhand des Beispiels für die Stockwerke 1-5 auf, wie die Knotenpunkte des Multizonen Modells miteinander verknüpft sind.

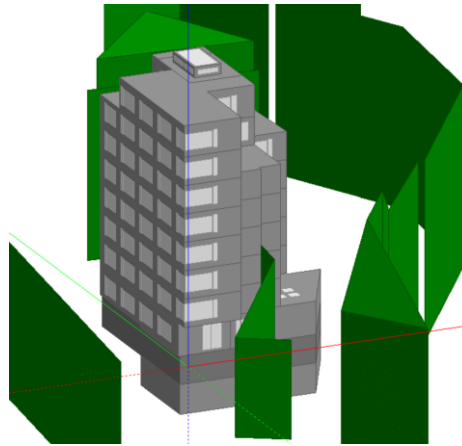


Abbildung 1. Ansicht des EnergyPlus-Modells des Objekts «AUE BS».

Wie beschrieben ist im bestehenden Simulationsmodell bereits ein Airflow Network zur Simulation der Nachtauskühlung über die natürliche Fensterlüftung implementiert. Die Abbildung 2 zeigt dabei anhand des Beispiels für die Stockwerke 1-5 auf, wie die Knotenpunkte des Multizonen Modells miteinander verknüpft sind.

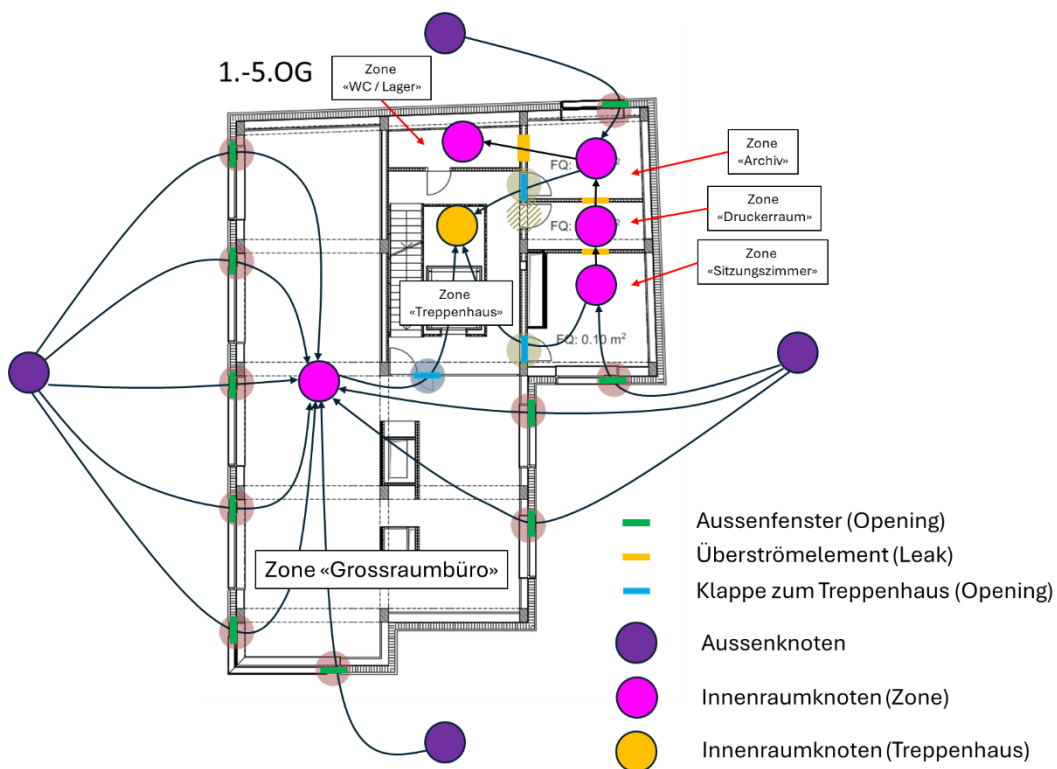


Abbildung 2. Darstellung des Multizonen Modells für das Beispiel der Stockwerke 1-5. Die Punkte stellen anhand ihrer Farbe eine Zone dar. Die Balken ein Element, durch welches ein Luftaustausch stattfindet.

Das Grundprinzip der Nachtauskühlung im Objekt «AUE BS» ist, dass Luft von den Aussenknoten ins Gebäudeinnere strömt (Innenraumknoten). Von dort strömt die Luft dann durch die Klappen zum Treppenhaus hin. Über den Kamineffekt strömt die Luft weiter nach oben, wo sie durch die Oblichter entweicht. Eine frühere Auswertung [5] des Airflow Network hat jedoch ergeben, dass die Luftströme durch die Aussen- wie auch die Klappen zum Treppenhaus bi-direktional sind. Je nach

Wind- und Druckverhältnissen können Luftströme auch durch die Aussenklappen wieder ins freie Strömen. Aus dem Prinzipschema der Nachtauskühlung in Abbildung 3 ist ersichtlich, welche Konfigurationen von Luftströmen möglich sind.

Durch die Aussenklappen an der Fassade kann

- a) Luft ins Gebäude strömen (gewünschtes Szenario)
- b) bi-direktional Luft ein- und ausströmen
- c) Luft nur aus dem Gebäude ausströmen.

Über Klappen strömt die Luft dann von den Büroräumen ins Treppenhaus, welches als Kamin dient.

- e) die Luft steigt im Treppenhaus dank dem Kamineffekt auf
- d) über die Oblichter entweicht die Luft aus dem Gebäude (gewünschtes Szenario).

Diese Luftströme können aber sowohl nur ausströmend, einströmend oder bi-direktional sein. Die Luftströme im Kamin können ebenfalls auf- oder absteigend oder bi-direktional sein.

Bei den Klappen zum Treppenhaus ist ebenfalls möglich, dass

- f) Luft vom Büro in Treppenhaus strömt (gewünschtes Szenario)
- g) Luft bi-direktional ein- und ausströmt
- h) Luft nur vom Treppenhaus ins Büro strömt.

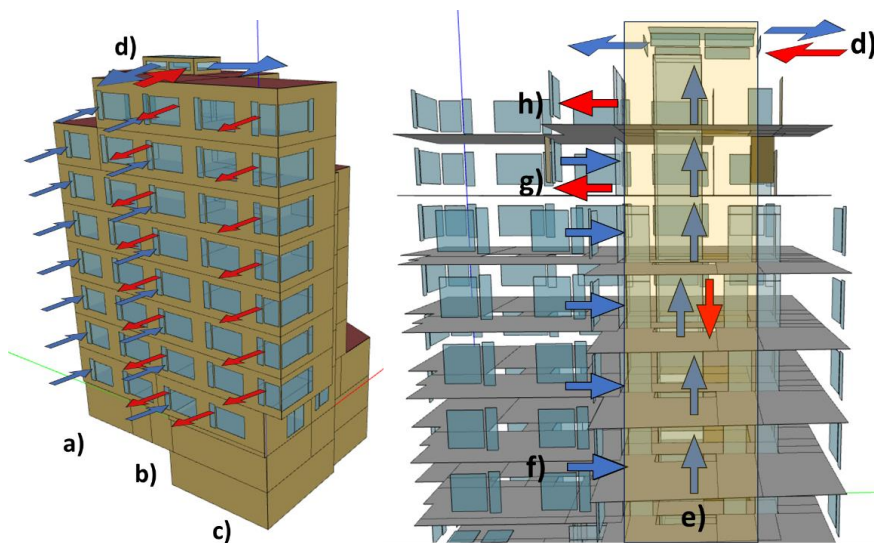


Abbildung 3. Luftströme an den Aussenklappen der Fassade a) - c) sowie durch die Oblichter d) und die Klappen im Treppenhaus f) - h) ins Treppenhaus e) gemäss dem Beschrieb im Text.

2.1.2 Raumgruppen

Das Objekt «AUE BS» wurde als achtgeschossiges Bürogebäude geplant und gebaut. Dazu kommen noch zwei Untergeschosse, in welchen Garderoben und Technikräume untergebracht sind. Die Büroräume werden durch das Amt für Umwelt und Energie der Stadt Basel als Arbeitsplätze für die verschiedenen Abteilungen genutzt. Grob lässt sich das Gebäude unterteilen in den Empfangsbereich und Beratungszimmer im Erdgeschoss, darüber sechs Geschosse mit Grossraumbüros, Sitzungszimmer, Archiv- und Druckerräume sowie WC-Anlagen oder Lagerräume. In der obersten

Etage befindet sich der Aufenthaltsraum für die Mitarbeitenden, welcher als «Cafeteria» bezeichnet wird. Eine Übersicht dazu ist in der Abbildung 4 zu finden.

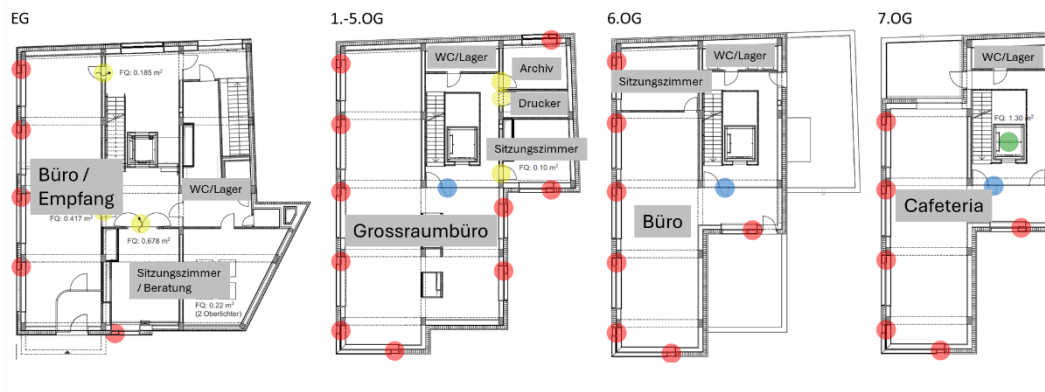


Abbildung 4. Zonen im Objekt «AUE BS».

Die Räume im Untergeschoss (Technik, Lager und Garderoben) werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, da sie für die Nachtauskühlung nicht von Interesse sind.

Die Tabelle 2 zeigt die Raumnummern pro Raumgruppe. Auf diese Nummern wird in dieser Arbeit referenziert. So ist klar, dass O + Nummer das Geschoss und der zweite Teil der Bezeichnung die Raumgruppe (beispielsweise 020 für Grossraumbüro) darstellt.

Tabelle 2. Raumnummern pro Raumgruppe und Geschoss.

Raumgruppe	EG	01.OG	02.OG	03. OG	04.OG	05.OG	06.OG	07.OG
Grossraumbüro	-	O1 020	O2 020	O3 020	O4 020	O5 020	O6 020	-
Sitzungszimmer	E0 006	O1 010	O2 010	O3 010	O4 010	O5 010	-	-
Druckerraum	-	O1 002	O2 002	O3 002	O4 002	O5 002	-	-
Archiv	-	O1 001	O2 001	O3 001	O4 001	O5 001	-	-
WC / Lager	E0 004/5	WC OG01	WC OG02	O3 031	WC OG04	O5 031	WC OG06	O7 031
Büro	E0 009	-	-	-	-	-	O6 024	-
Cafeteria	-	-	-	-	-	-	-	O7 020
Beratung	E0 007	-	-	-	-	-	-	-

2.1.3 Ausgangslage der verfügbaren Informationen

Bei der im realen Gebäude «AUE BS» verbauten mechanischen Lüftungsanlage handelt es sich gemäss Anlagebeschrieb um eine Lüftungsanlage mit je einem Zu- und Abluftventilator. Dazu kommt ein Enthalpie-Plattenwärmetauscher und ein Warmwasser-Lufterhitzer welcher über die Fernwärme gespeisen wird. Durch die Bauherrschaft wurden Anlagebeschrieben, Prinzipschemen und technischen Datenblättern [6], [7], [8] und [9] zur Verfügung gestellt. Diese dienen in dieser Arbeit als Grundlage für die Ergänzung der Anlagentechnik im Simulationsmodell. Die Anlagentechnik (insbesondere die Lüftungsanlage) wird im Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** «Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.» erläutert, in dem es um die Modellierung der Anlage im Simulationsmodell geht, da dazu eine Verknüpfung der Komponenten erforderlich ist.

2.2 Theorie

Im Abschnitt Theorie wird auf verschiedene Konzepte eingegangen, welche im Kontext der Anlagentechnik im digitalen Zwilling von Bedeutung sind. Dies beinhaltet Begriffe aus dem Bereich des digitalen Zwillings, der Lüftungstechnik sowie der zonalen Strömungssimulation.

2.2.1 Digitaler Zwilling

In dieser Arbeit geht es im Kontext des digitalen Zwillings darum, eine physische Anlage, in diesem Fall ein gesamtes Gebäude, zu überwachen und die betriebliche Effizienz zu verbessern. Das generelle Konzept dahinter sieht vor, dass in einem digitalen Zwilling Echtzeit-Daten aus Objekt zu Informationen verarbeitet und genutzt werden [10]. Ein digitaler Zwilling besteht abstrakt betrachtet aus vier Komponenten [11]. Diese bestehen aus dem realen Objekt, der virtuellen Repräsentation (Modell) davon, dem Datenfluss vom realen Objekt zum digitalen Modell und dem umgekehrten Informationsfluss vom Modell zum physischen Objekt zurück. In diesem Zusammenhang wird auch vom «Reifegrad» eines digitalen Zwillings gesprochen. Dabei geht es darum die Art und Weise des Datenflusses zwischen der digitalen Repräsentation und dem realen Gebäude zu definieren. Während bei einem digitalen Modell der Datenfluss in beide Richtungen manuell erfolgt, ist er bei einem vollständig ausgereiften digitalen Zwilling bi-direktional automatisch. Der digitale Zwilling kann somit automatisiert Daten aus dem realen Objekt beziehen, diese verarbeiten und anschliessend auch automatisch wieder Einfluss auf die Steuer- und Regeltechnik des Gebäudes einfließen lassen. Dazwischen befindet sich ein weiterer Entwicklungsstand, der als «digitaler Schatten» bezeichnet wird. Bei diesem ist jeweils ein Datenfluss manuell und der andere automatisiert. [12] Die Abstufung ist in Abbildung 5 ersichtlich.

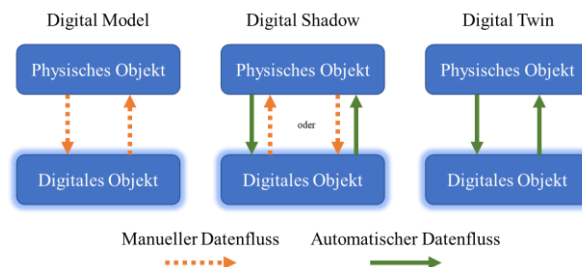


Abbildung 5. Übersicht über die Charakteristiken der Datenflüsse in der digitalen Repräsentation eines Objekts unterteilt nach Reifegrad (Darstellung aus [13]).

Der Entwicklungsstand der digitalen Repräsentation des Objekts «AUE BS» in dieser Arbeit entspricht mehrheitlich einem digitalen Modell. Es sind halb-automatisierte Mechanismen zum Abrufen von Daten aus dem Gebäude eingerichtet. Eine automatisierte Einflussnahme auf die Steuer- und Regeltechnik ist jedoch nicht implementiert und auch nicht vorgesehen.

2.2.2 MPC – Model Predictive Control

Im Kontext von Betrieb und Optimierung von Gebäuden ist Model Predictive Control (MPC) eine fortschrittliche Regelungsstrategie, bei der ein Modell des Systems in das übergeordnete Steuerungssystem integriert wird. Bei jedem Steuerungsschritt werden verschiedene mögliche Sollwertkonfigurationen simuliert und getestet, bevor die beste Option ausgewählt wird, um im realen

System angewendet zu werden. Im Gegensatz zu regelbasierten Ansätzen, die Sollwerte basierend auf festen Zeitplänen oder spezifischen Bedingungen festlegen, verwendet MPC-Optimierungsalgorithmen, um die optimalen Sollwerte zu bestimmen. Dies ermöglicht eine dynamischere und genauere Steuerung des Systems, da es auf aktuelle und vorhergesagte Zustände reagiert. [14] Ein Hauptvorteil von MPC ist die Fähigkeit, zukünftige Störungen und Anforderungen zu berücksichtigen und so den Energiebedarf eines Gebäudes vorwegzunehmen und das thermische Verhalten gemäss den definierten Regelungszielen zu optimieren. MPC integriert die Beschränkungen direkt in das Optimierungsproblem, das bei jedem Abtastschritt gelöst wird. Diese Technik war bis vor kurzem aufgrund des hohen Rechenaufwands in der Praxis schwer umzusetzen. Mit der Entwicklung neuer Prozessoren und Cloud-Computing hat MPC jedoch an Popularität gewonnen und wird zunehmend in verschiedenen Gebäudetypen und Energiesystemen angewendet. [15] Insgesamt ist vor allem die proaktive Störungsbewältigung hervorzuheben. Durch die Vorhersage zukünftiger Zustände kann MPC proaktiv auf Störungen reagieren und so die Systemleistung verbessern. [16] Auch Hilliard et al., [17] heben als wesentlichen Vorteil von MPC seine Fähigkeit hervor, zukünftige Zustände vorherzusagen und die optimalen Steuerungsaktionen über einen bestimmten Zeithorizont zu berechnen. Die Modellierung kann mit verschiedenen Typen von Modellen erfolgen, darunter auch mit komplexen Simulationsmodelle wie EnergyPlus™. Diese ermöglichen detaillierte Simulationen, erfordern jedoch auch höhere Rechenzeiten. Für die Berechnung der optimalen Steuerungsaktionen werden verschiedene Optimierungsalgorithmen eingesetzt. Die Vorteile bei der Nutzung von MPC im Betrieb und der Optimierung von Gebäuden umfassen signifikante Energieeinsparungen, Reduktion der Betriebskosten, Verbesserung des thermischen Wohlbefindens der Bewohner und die Senkung von CO₂-Emissionen durch die Reduktion des Energieverbrauchs. Jedoch gibt es trotz der zahlreichen Vorteile von MPC noch Herausforderungen, die weiter erforscht werden müssen. Eine der grössten Herausforderungen ist die Genauigkeit der verwendeten Modelle, die entscheidend für die Leistungsfähigkeit von MPC ist. Ein weiterer Punkt ist der erhebliche Rechenaufwand, der durch die Optimierung über lange Zeithorizonte und komplexe Modelle entsteht. Besonders hervorzuheben ist die Notwendigkeit der Berücksichtigung interner und externer Bedingungen wie Wettervorhersagen und Belegungspläne, da Prognoseungenauigkeiten die Leistung von MPC erheblich beeinträchtigen können. Daher sind robuste Strategien notwendig, um diese Unsicherheiten zu bewältigen. [17] Zusammenfassend bietet MPC ein vielversprechendes Werkzeug zur Optimierung des Gebäudebetriebs. Durch den Einsatz fortschrittlicher Modellierungs- und Optimierungstechniken kann es die Energieeffizienz, die Kosten und den Komfort signifikant verbessern. Derzeit sind aber noch hohe Hürden in Bezug auf Modellgenauigkeit, Rechenaufwand und Unsicherheiten durch Prognoseungenauigkeiten zu bewältigen.

2.2.3 Multizonen-Simulationsmodelle

Beim bestehenden Simulationsmodell des Objekts «AUE BS» handelt es sich um eine Multizonen-Modell, welches in EnergyPlus™ in einem AirflowNetwork realisiert wurde. Nachstehend wird daher erläutert, wie ein solches Modell aufgebaut ist.

Multizonen-Luftströmungsmodelle werden dazu verwendet, um Luftströmungen zwischen verschiedenen Zonen in einem Gebäude und der Aussenwelt zu berechnen. Diese werden durch

Druckkräfte verursacht, welche durch Wind, Kamineffekte und Ventilatoren entstehen. Multizonen-Modelle basieren auf einem Netzwerkansatz, bei dem das Gebäude in Zonen oder Knoten unterteilt wird, welche Räume mit perfekt durchmischter Luft darstellen. Jede Zone wird durch ihre Temperatur, ihren Druck und möglicherweise ihre Schadstoffkonzentrationen charakterisiert. Die Knoten sind durch Leitwerte (Luftströmungselemente) verbunden, die die Luftströmungswege (Risse, Öffnungen, Kanäle usw.) modellieren. Druckkoeffizienten, die den lokalen Winddruck an der Gebäudeaussenwand in Beziehung zum Referenzwinddruck setzen, können externen Knoten zugewiesen werden. Dabei werden sowohl Windeffekte als auch Auftriebseffekte aufgrund von Luftdichteunterschieden berücksichtigt. Zusätzlich werden Druck und Strömungen, die durch Komponenten eines mechanischen Belüftungssystems (Ventilatoren, Kanäle) verursacht werden, ebenfalls einbezogen. Durch die Erhaltung der Luftmasse wird ein System von nichtlinearen Gleichungen aufgebaut und iterativ für die Zonenpressungen gelöst, was Luftströmungsraten durch alle Leitwerte ergibt. Aus diesen werden die zonenbezogenen Strömungen bestimmt. [18]

Unterschied Zonales Modell und Multi-Zonen Modell

Der Unterschied zwischen dem «Zonalen Modell» und dem «Multizonen-Modell» besteht darin, dass bei ersterem eine Zone ein Teilvolumen der Luft in einem Raum darstellt, während in letzterem eine Zone ein spezifischer Raum darstellt, der durch Luftleitwerte mit anderen Räumen verbunden ist.

2.2.4 Airflow Network (AFN)

Beim Airflow Network in EnergyPlus™ handelt es sich um ein druckbasiertes, Multizonen-Luftstromnetz, welches Infiltration und mechanische Lüftung simulieren kann. Es besteht aus einer Reihe von Knotenpunkten (Zonen), die durch Komponenten (Oberflächen, Öffnungen, Kanäle) miteinander verbunden sind. Die Luftströmungen in diesem Netzwerk werden basierend auf Druckunterschieden simuliert, die durch Wind, thermischen Auftrieb und mechanische Lüftung erzeugt werden. Die zugrundeliegende Berechnungsmethode erlaubt es, ein hybrides Lüftungssystem zu modellieren. Die Abbildung 6 zeigt die Verknüpfung der Komponenten zu einem Netzwerk mittels Knotenpunkte.

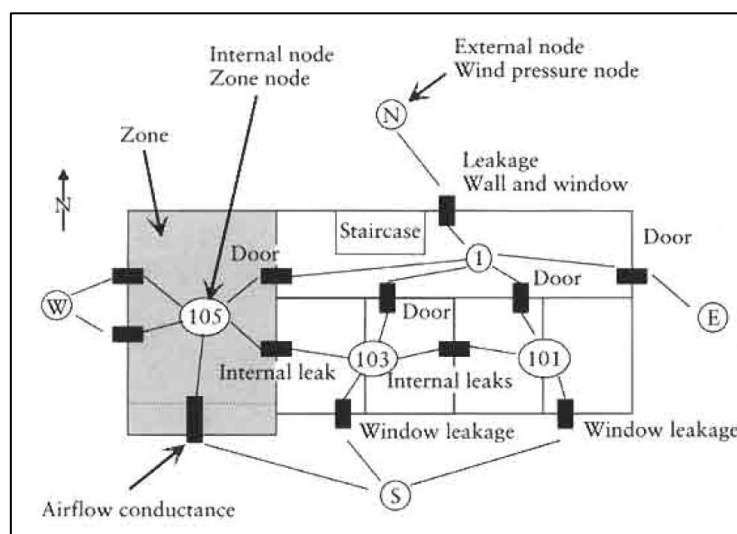


Abbildung 6. Darstellung eines Beispiels für ein Airflow Network (Darstellung aus [18, S. 1084]).

Die Grundlage des Airflow Networks bildet die Erhaltung des Luftmassenstroms. Die Menge Luft, welche durch eine Verbindung in eine Zone einströmt, muss aus dieser auch wieder herausströmen. Erst bei Erreichen einer ausgeglichenen Bilanz dieser beiden Werte, d.h. die reinströmende Luft ist gleich der ausströmenden Luft, konvergiert das Modell und gilt als korrekt und stabil. Das Kriterium zur Konvergenz ist dabei der festgelegte Toleranzwert, welcher unterschritten werden muss. Dabei besteht die Möglichkeit mittels Konvergenz.

Die Gesamte Berechnung basiert auf drei aufeinanderfolgenden Schritten:

- **Druck- und Luftstromberechnung**
Bestimmen des Drucks an jedem Knoten und die Luftströmung durch jede Verbindung.
- **Berechnung der Knotenpunkttemperatur und Luftfeuchtigkeit**
Berechnen der Temperatur und die Feuchtigkeit an jedem Knoten basierend auf den Strömungen und den äusseren Bedingungen.
- **Berechnung der sensiblen und latenten Last**
Ermitteln der Lasten, die durch die Luftströmung und die Leitungssysteme verursacht werden, um die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Zonen zu regulieren.

Das AFN in EnergyPlus™

In früheren Untersuchungen von Gu (2007) [19] und Miller et al., (2014) [20] wurde festgestellt, dass das AFN-Simulationsmodell nur ein einzelnes Luftverteilungssystem zulässt. Darin enthalten darf auch nur ein einziger Ventilator sein. Die Luftverteilung in die Zone beschränkt sich auf ein Luftverteilungs-Terminal vom Typ `AirTerminal:SingleDuct:VAV:Reheat`. An dieser Tatsache hat sich bis heute nichts verändert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Systemgrenze in der EnergyPlus™ Version 22.2 ebenfalls festgestellt.

2.3 Literaturübersicht

In Bezug auf die verschiedenen Handlungsfelder gibt es unterschiedliche Mengen an Literatur, welche zur Verfügung steht. Diese ist untenstehend aufgeführt:

Simulationsautomatisierung: Erste Ansätze zu den Zielen der Automatisierung werden in [21], [22], [23] und [24] gefunden. Normative Vorgaben sind in [25] und [26] zu finden. Entsprechende Werkzeuge finden sich in [27] und [28]. Anbieter von Wetterdaten finden sich in [29], [30], [31], [32], [33] und [34]. Die für die epw-Datei benötigten Wetterdaten lassen sich über [30] automatisiert bereitstellen.

Fensterlüftung: Eine Übersicht über verschiedene Methoden zur Berechnung der einseitigen Fensterlüftung findet sich in [35]. Detaillierte Angaben dazu finden sich in [36] und [37].

Implementieren der Anlagentechnik in EnergyPlus™: Neben den Dokumentationen «Input-Output Reference» [38] und der «Engineering Reference» [39], welche durch das U.S. Department of Energy bereitgestellt wird, finden sich nutzbare Informationen in [18] [19], [20] und.

Einfluss der Strahlungswärme und Lufttemperatur auf die operative Raumtemperatur: Erläuterungen und Ansätze zu diesem Thema finden sich in [40]. Fortführende Punkte sind in [41], [42] und [43] zu finden.

3 Simulationsautomatisierung in EnergyPlus™

Varianten miteinander zu vergleichen und darauf basierend Entscheidungen zu fällen, gehört zu einem der Kernpunkte bei der Arbeit mit Gebäudesimulationsmodellen. In der Betriebsphase stehen im Zusammenhang mit der Optimierung nutzungsbezogene Parameter wie Auslastung von Räumen durch Personen, interne (elektrische) Lasten, Beschattung oder auch Wetterdaten im Zentrum. Weiter haben anlagebezogene Einstellungen wie Öffnungszeiten von Klappen zur Nachtauskühlung einen Einfluss auf die Ergebnisse von Gebäudesimulationen. Verschiedene Konfigurationen sollen verglichen werden, um die ideale Kombination zu finden. In diesem Kapitel geht es darum, der Frage nachzugehen, in welchen Fällen es sinnvoll ist, in EnergyPlus™-Gebäudesimulationsmodellen automatisierte Modellanpassungen vorzunehmen, um die Optimierung effizienter zu gestalten. Es wird ermittelt in welchem Umfang und welcher Tiefe sich Anpassungen im Modell in einem Workflow automatisch durchlaufen lassen, um so die optimale Einstellung zu finden.

3.1 Thermischen Gebäudesimulationen in EnergyPlus™ für die Betriebsoptimierung

Die thermische Simulation in EnergyPlus™ basiert auf einem Modell, welches sich grob in verschiedene Ebenen einteilen lässt. Dazu gehören:

- Gebäudestruktur, Gebäudehülle und deren Materialisierung
- Fenster und Beschattung
- Thermische Zonen auf Grundlage von Räumen und Zonen
- Nutzungsbedingte interne Lasten (Personenbelegung, Beleuchtung, elektrische Geräte)
- Optional: Luftströmungs-Netzwerk (AirflowNetwork)

Während in der Planungsphase für eine neues Gebäude insbesondere die Dimensionierung und Ausrichtung der Gebäudestruktur und die Materialisierung der Bauteile eine grosse Rolle für die Optimierung spielt, wandelt sich der Fokus in der Optimierung im Betrieb. Die starren Bauteile des Gebäudes werden in dieser Phase als fix betrachtet. Eine Veränderung von Material und Struktur ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr, oder zumindest nur bedingt, vorgesehen. Somit fallen in den Rahmen der Betrachtung mehr die nutzungsspezifischen Elemente wie interne Lasten, Personenbelegung, die Beschattung und Betriebszeiten von Anlagen. Darunter fällt auch die Regelungstechnik der Nachtauskühlung. Essenziell ist zu evaluieren, welche Ziele die Automatisierung verfolgt und welche Faktoren sich dazu eignen, um den Gebäudebetrieb zu optimieren.

3.2 Ziel der Automatisierung

Die Automatisierung eines digitalen Vorgangs zu erstellen, ist durch den technologischen Fortschritt heutzutage in sehr vielen Fällen möglich. Der Aufwand, welcher damit einhergeht, ist jedoch nicht zu unterschätzen. Es ist daher sehr wichtig vor einem Automatisierungsvorhaben klar zu definieren, wozu dieses dienen soll. Aus einer Literaturrecherche wurden folgende Ziele der Automatisierung im Kontext der Gebäudesimulation als erstrebenswert erachtet:

- Reduktion der zeitlich benötigten Ressourcen und somit der personellen Kosten für die Erstellung und Anpassung der Simulationsmodelle [21]

- Erhöhung der Genauigkeit durch Nutzung standardisierter Eingaben und Vorlagen [21]
- Möglichkeit zur bessere Integration in Standardprozesse [22]
- Vermeiden der Datenredundanz durch die Möglichkeit der automatisierten Datenübernahme statt des mehrfachen Ablegen derselben Daten [22]
- Unterstützung beim Vergleich von Varianten und der Entscheidungsfindung [22]
- Visualisierung von Ergebnissen lassen sich einfacher und einheitlicher realisieren [23]
- Automatisierte Methoden lassen sich einfacher skalieren und auf verschiedene Gebäudetypen sowie Nutzungsszenarien anwenden [24]

In der vorliegenden Arbeit ist das primäre Ziel der Automatisierung, das bestehende digitale Modell einen Schritt näher an den «digitalen Zwilling» zu bringen. Das Simulationsmodell soll das reale Gebäude in Echtzeit widerspiegeln. Dadurch wird dem Gebäudebetreiber ermöglicht, das Gebäude basierend auf vorausschauenden Prognosen zu betreiben, dass sowohl eine hohe Energieeffizienz aber auch ein ansprechender Komfort in Bezug auf die thermische Behaglichkeit der Nutzer besteht.

3.3 Geeignete Faktoren für die Automatisierung

Im Zusammenhang mit thermischen Gebäudesimulationen gibt es Vorgaben, welche eingehalten werden müssen. Bevor eine Beurteilung der Eignung der Automatisierung erfolgt, sollen diese Vorgaben erläutert werden. Anschliessend sollen aus diesen Faktoren diejenigen evaluiert werden, welche sich für die Automatisierung eignen und auch sinnvoll umgesetzt werden können. Ziel soll sein, einen Mehrwert schaffen zu können und nicht die Möglichkeit zu schaffen, alle möglichen Parameter automatisiert verstellen zu können, da dies sonst weder der Zielvorgabe dieser Arbeit entspricht noch mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen möglich wäre.

3.3.1 Vorgegebene Faktoren für die thermische Gebäudesimulation

In Anlehnung an den Abschnitt 5.2.6 «Simulation» der SIA Norm 180 [25] und den Anhang E «Randbedingungen für Simulationsrechnungen» der SIA Norm 382/1 [26] wird zunächst darauf eingegangen, welche Berechnungsvoraussetzungen zur vertieften Beurteilung bei der Simulation der sommerlichen Raumlufttemperatur einzuhalten sind.

Die folgenden Punkte müssen demnach zwingend vorhanden bzw. erfüllt sein:

- Zeitschritt: Zeitschritt von 1 Stunde oder kleiner
- Klimadaten: Station, die das Klima am Gebäudestandort am besten repräsentiert
- Beobachtungsperiode: Für sommerliche Raumlufttemperaturen vom 16.4 – 15.10.2011
- Sonnenschutz: Kennwerte und Steuerungsstrategie des geplanten bzw. bestehenden Sonnenschutzes.
- Externe Wärmeeinträge: Solarstrahlung
- Interne Wärmeeinträge: Personen, Beleuchtung und elektrische Geräte
- Aussenluft-Volumenstrom: Während und ausserhalb der Betriebszeit
- Nutzungszeit: Betriebszeiten des Gebäudes
- Betriebszeit der Anlage: 1h vor Nutzungsbeginn bis 1h nach Nutzungsbeginn

Diese Punkte müssen in einem Simulationsmodell mindestens enthalten sein, um einen verlässlichen Simulationsdurchlauf zur Ermittlung der sommerlichen Raumlufttemperatur durchzuführen. Sie decken sich auch mit den Angaben, welche Moser et al., (2001) [18, S. 1087] in ihrer Arbeit gemacht haben. In der vorliegenden Arbeit geht es primär auch um die Betrachtung des Effektes der Nachtauskühlung, also um die sommerlichen Raumlufttemperaturen, womit bei Einhalten dieser Vorgaben, die Simulation der Norm entspricht. Weitere mögliche Aspekte werden aufgrund fehlender Betrachtungsmöglichkeiten für die vorliegende Arbeit sowie aus ressourcentechnischen Gründen nicht betrachtet.

3.3.2 Evaluation der Faktoren zur Automatisierung

Basierend auf den erarbeiteten Grundlagen, werden in diesem Absatz Faktoren ermittelt, welche sich für die Automatisierung von Gebäudesimulationen eignen. Dazu wird bei den verschiedenen Faktoren angegeben, in welchem Kontext sich diese Funktion eignen würde.

- **Nutzungsbezogene Parameter**

- Personenbelegung:

- Personenbelegungen in Büroräumen können durch Sensordaten oder Buchungssysteme in Echtzeit erfasst werden. Ebenso können Erhebungen dazu gemacht werden, um gewisse Belegungsmuster zu erkennen. Diese Informationen können in das Simulationsmodell integriert werden, um die internen Wärmequellen präzise abzubilden.

- Interne (elektrische) Lasten:

- Durch Smart Metering kann der Energieverbrauch von Geräten und Beleuchtung in Echtzeit erfolgen. Diese Daten können in das Simulationsmodell eingespeist werden, um die internen Lasten dynamisch abzubilden. Eine gewisse Relevanz geht hiervon aus, da der Energieverbrauch von elektrischen Geräten und Beleuchtung stark schwanken kann.

- **Wetterdaten**

- Wetterdaten sind entscheidend für die Genauigkeit von Gebäudesimulationen. Automatisierte Schnittstellen zu Wetterdiensten können aktuelle und prognostizierte Wetterbedingungen in das Simulationsmodell integrieren. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Anpassung der Simulation an die aktuellen Umweltbedingungen. Durch die Verwendung von Echtzeit-Wetterdaten können die Auswirkungen von Temperaturschwankungen, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Sonneneinstrahlung präzise modelliert werden, was zu einer realitätsnahen Entscheidungsgrundlage führt.

- **Beschattung**

- Beschattungssysteme werden meist automatisch, basierend auf der gegenwärtigen Sonneneinstrahlung, angesteuert, um den Wärmeeintrag ins Gebäude möglichst gering zu halten. Gebäudenutzende verstellen diese Einstellungen aber oft, sodass die Storen nur die halbe Fensterfläche verdecken, um einen Bezug zur Aussenwelt zu haben. [5] Die automatische Übernahme des Zustands der Beschattung aus der Realität ins Modell kann dazu beitragen, den realen Wärmeeintrag besser darzustellen. Dies weil das Modell grundsätzlich von einer optimalen Steuerung ohne situativen Einfluss der Gebäudenutzenden ausgeht.

- **Anlagenbezogene Einstellungen**

Öffnungszeiten der Klappen und Zieltemperatur der Nachtauskühlung:

Die Klappen zur Nachtauskühlung werden automatisch basierend auf definierten Parameter gesteuert. Dazu gehört die Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur. Auch eine definierte Zieltemperatur, bei der die Klappen wieder schliessen, um die Räume nicht zu unterkühlen ist festgelegt. Eine situative Anpassung der unteren Zieltemperatur könnte aber beispielsweise vor einer bevorstehenden Hitzeperiode helfen, das Gebäude insgesamt kühler zu halten. Dies kann durch automatisierte Simulationsvarianten überprüft werden und so eine Legitimation für eine Verletzung der Behaglichkeitsgrenze nach unten darstellen.

Lüftungsanlagen:

Die Betriebszeiten und Luftvolumenströme von Lüftungsanlagen können dynamisch angepasst werden, um den aktuellen Anforderungen gerecht zu werden. Sensoren überwachen die Luftqualität und Belegung, während Automatisierungssysteme die Lüftungsraten entsprechend anpassen. Die Simulation dieser Prozesse hilft, die Effizienz und den Komfort zu optimieren, indem sie die realen Betriebsbedingungen präzise widerspiegelt. Nebst der Lüftungsanlage kann auch eine situative Kühlung (optional, im Gebäude AUE BS nicht vorhanden) mittels verschiedener automatisierter Simulationsvarianten betrachtet werden. So kann eine Grundlage geschaffen werden, welche ein effizienter Umgang mit Energieressourcen ermöglicht.

3.3.3 Umsetzung für das Objekt «AUE BS» im EnergyPlus™-Simulationsmodell

Nach erfolgter Evaluation möglicher Kriterien, welche sich für die Automatisierung eignen, werden die folgenden Parameter gewählt, um sie im Zusammenhang mit der Simulationsautomatisierung für das Objekt «AUE BS» weiterzuverfolgen. Danach wird eine Methode zur Automatisierung dieser Parameter erarbeitet.

- **Wetterdaten:** Um eine täglich vorausschauende Optimierung im Gebäudebetrieb zu ermöglichen, erfolgt die automatisierte Beschaffung und Bereitstellung von Wetterprognosedaten als epw-Wetterdatei.
- **Personenbelegung:** Bei der Besichtigung des Objekts «AUE BS» konnte festgestellt werden, dass die Personenbelegung nicht einer 100 %-igen Auslastung der Arbeitsplätze entsprach. Auf Nachfrage konnte ermittelt werden, dass die Belegung wochentagabhängig ist und variiert. Aus diesem Grund macht es Sinn, die Personenbelegung zu automatisieren, um Anpassungen einfach vornehmen zu können, um näher bei der Realität zu sein. Da aber keine sensorbasierte oder anderweitige Erhebung der Belegung im Gebäude erfolgt, soll eine vereinfachte Methode zur Anwendung kommen, welche sich zukünftig auch anpassen lässt. So können zu einem späteren Zeitpunkt, falls reale Belegungsdaten erhoben werden, diese verknüpft werden.
- **Untere Zieltemperatur der NAK:** Die definierte untere Zieltemperatur von 19 °C dient dazu, sicherzustellen dass die Temperatur in den Büroräumen bei Arbeitsbeginn nicht unbehaglich tief ist. Möglicherweise kann aber durch eine tiefere Zieltemperatur ein positiver Effekt für den ganzen Tag erzielt werden, wenn die Raumtemperaturen dadurch tiefer

bleiben. Somit könnte eine kurze Phase der Unbehaglichkeit bei Arbeitsbeginn legitimiert werden. Daher soll eine automatisierte Änderung ermöglicht werden, sodass dieser Parameter einfacher ausgewertet werden kann.

3.4 Werkzeuge zur automatisierten Modellanpassung in EnergyPlus™

Es stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, um Anpassungen an einem EnergyPlus™-Modell vorzunehmen. Grundsätzlich handelt es sich beim Simulationsmodell um eine textbasierte IDF-Datei (input data file). Diese Datei lässt sich mit einem beliebigen Texteditor wie z.B. Notepad++ bearbeiten. EnergyPlus™ bietet zudem im Softwarepaket einen eingebauten «IDF-Editor». Diese Anwendung bietet eine benutzerfreundlichere Oberfläche zum Bearbeiten des Simulationsmodells. Die Daten werden in tabellarischer Übersicht dargestellt und sind in Gruppen zusammengefasst, was das Auffinden und Bearbeiten vereinfacht. Weiter können Simulationsmodelle auch mit dezidierten Softwaretools wie OpenStudio [44] (frei verfügbar) oder DesignBuilder [45] (zahlungspflichtig) bearbeitet werden. Doch all diese Methoden haben gemeinsam, dass sie keine Automatisierung zulassen, sondern Anpassungen Schritt für Schritt individuell vorgenommen werden müssen. Um ein Simulationsmodell aber schnell und präzise anpassen zu können, beispielsweise um verschiedene Varianten miteinander vergleichen zu können kann auf eine fortgeschrittenere Anwendung programmiertem Python-Skript zurückgegriffen werden. Dazu bestehen verschiedene Bibliotheken (Module), welche nachstehend erläutert werden.

3.4.1 Python-Modul «eppy»

«eppy» [27] [46] ist ein Modul, welches auf Python [47] aufbaut. Es ermöglicht das Suchen und Navigieren in bzw. Ändern und Ausführen von EnergyPlus™ IDF-Dateien (input data file) auf systematische Weise mittels weniger Code-Zeilen. «eppy» nutzt das Input Data Dictionary (IDD-Datei), welches in jeder Version von EnergyPlus™ enthalten ist, um alle verfügbaren EnergyPlus-Objekte und -Daten zu identifizieren, die für die jeweilige Version spezifisch sind, so dass sie auch nach grösseren Aktualisierungen von EnergyPlus™ relevant bleiben.

«eppy» ist keine Benutzeroberfläche und hat auch keine eigene vordefinierte Logik, um Optimierungen oder Simulationsläufe von verschiedenen Varianten durchzuführen. Aber die Skriptsprache erlaubt es, die genannten Punkte so zu organisieren, dass ein Automatismus hergestellt werden kann. Damit lassen sich nach eigenen Vorstellungen und Bedürfnissen Skripts schreiben, welche genau das gewünschte in der IDF-Datei tun. Nebst dem Bearbeiten des Modells und dem automatischen Durchführen der Simulation hat «eppy» auch Funktionen zur Auswertung eingebaut. Damit wird auch eine Grundlage gebildet, um die Ergebnisse von verschiedenen Varianten einfacher miteinander vergleichen zu können. Hinter «eppy» steckt neben dem Entwickler eine breite Gemeinschaft, welche das Modul laufend betreut und weiterentwickelt, was die Zuverlässigkeit und Langfristigkeit der Anwendung stärkt. Aus diesem Grund wird mit diesem Modul gearbeitet.

3.4.2 Python-Modul «pyidf»

Das Modul «pyidf» [28] bietet gegenüber «eppy» eine andere Herangehensweise an die Bearbeitung und Erstellung von IDF-Dateien, indem es eine stark typisierte, objektorientierte API (Application Programming Interface) verwendet, die jedes Element von EnergyPlus™ als eine Klasse

repräsentiert. Diese strengere Strukturierung kann jedoch die Flexibilität einschränken, wenn es um komplexe und nicht standardmässige Manipulationen geht. Des Weiteren ist pyidf weniger weit verbreitet als eppy. Die Grundlage für den Quellcode basiert auf der EnergyPlus™-Version 8.4.0 und die letzten Aktualisierungen liegen bereits knapp 10 Jahre zurück. Dies deutet darauf hin, dass dieses Modul nicht mehr betreut wird und auf dem aktuellen Stand belassen wird, was für zukünftige Weiterentwicklungen von EnergyPlus™ möglicherweise zu Problemen führen kann

3.4.3 Python-Modul «epsim»

Das Modul «epsim» wurde 2022 am Institut für Nachhaltigkeit und Energie der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik an der FHNW entwickelt. Es stellt eine Schnittstelle zur Verfügung, welche es ermöglicht, Simulationsvorgaben in Python zu definieren, welche dann in EnergyPlus™ übertragen werden. Ebenso stehen einige individuelle Vorlagen zur Auswertung der Simulationsergebnisse zur Verfügung.

3.5 Automatisierte Bereitstellung der Wetterdaten für EnergyPlus™

Um in EnergyPlus™ thermische Simulationen im Zusammenhang mit der Nachtauskühlung durchführen zu können, werden umfassende, möglichst auf den Standort des Gebäudes zugeschnittene Wetterdaten benötigt [5] [26, S. 74]. Diese Wetterdaten müssen im epw-Format (EnergyPlus-Weatherfile) vorliegen. Bei diesem Format handelt es sich um ein einfaches, textbasiertes, kommagetrenntes Dateiformat, welches stündliche Wetterdaten von einem definierten Standort beinhaltet [48]. Im Simulations-Durchlauf werden aus der epw-Datei nebst den hinterlegten Wetterdaten auch weitere Angaben wie z.B. die Koordinaten bzw. der Gebäudestandort entnommen.

Wetterdaten für Modelljahre (DRY: Design Referece Year) stehen für eine Vielzahl von Standorten als epw-Datei auf unterschiedlichen Plattformen [49] [50] zur freien Verfügung. Diese basieren jedoch auf Werten aus der Vergangenheit. Damit lassen sich die Vorgaben gemäss SIA 180 Anhang C bzw. SIA 382-1 Anhang E erfüllen. Um im Zusammenhang mit einem digitalen Zwilling und dem MPC-Ansatz aber auch thermische Simulationen mit vorausschauendem Charakter durchführen zu können, sind fortwährend aktuelle Wetterprognosedaten erforderlich. Da solche Daten für einen spezifischen Standort nicht tagesaktuell als epw-Datei verfügbar sind, wird nachstehend erläutert, wie im Rahmen dieser Arbeit eine Schnittstelle entwickelt wurde, um stündliche Wettervorhersagedaten für thermische Simulationen in EnergyPlus™ bereitzustellen.

3.5.1 Evaluation Lieferanten von Wettervorhersagedaten

Nebst dem staatlichen Wetterdienst «MeteoSchweiz» [29] bieten verschiedene Anbieter historische Wetterdaten wie auch Wetterprognosedaten an [30], [31], [32], [33] und [34]. In der EnergyPlus™ Dokumentation «AuxiliaryPrograms» wird vorgegeben, welche Werte eine epw-Datei mindestens enthalten muss, damit das Programm die thermische Simulation durchführen kann. Bei der Evaluation und Auswahl eines Dienstleisters, welcher Wetterdaten und Wettervorhersagedaten bereitstellt, wird darauf geachtet, dass all diese Parameter abgedeckt werden. Dazu sollen die Daten zudem möglichst präzise auf den Standort des Gebäudes passen. Weiter steht auch die Möglichkeit zur automatisierten Datenabfrage im Zentrum. Die Daten sollen möglichst einfach über eine

Schnittstelle abrufbar sein, sodass sie möglichst ohne Aufwand in eine epw-Datei transferiert werden können. In Tabelle 3 ist die Evaluation aller Anbieter für die erforderlichen Parameter ersichtlich.

Tabelle 3. Evaluation verschiedener Anbieter von Wettervorhersagedaten über die erforderlichen Parameter für eine epw-Wetterdatei

Erforderliche Parameter	IDA Meteo Schweiz [29]	Meteomatics [30]	Open Weather [31]	Meteotest [32]	SRF Meteo [33]	Meteologix [34]
Temperatur	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Rel. Luftfeuchte	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Druck	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Globalstrahlung	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Direktnormalstrahlung	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Diffusstrahlung	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Niederschlag	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
Windgeschwindigkeit Windrichtung	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
mindestens stündliche Vorhersagedaten	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
Daten als csv/JSON	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
API-Abfrage	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Kalibrierte historische Wetterdaten	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
Erfüllte Kriterien	11/12	12/12	8/12	10/12	7/12	9/12

Im Rahmen der Recherche zu den verschiedenen Anbietern wurde festgestellt, dass die Beschaffung von Wettervorhersagedaten aus «open-source»-Quellen, also ohne Bezahlung, nicht in der benötigten Qualität und Auflösung möglich ist. So stellt OpenWeather zwar eine kostenlose API mit Wettervorhersagedaten zur Verfügung, diese beinhaltet jedoch nur eine Auflösung von 3h und enthält auch nicht die wichtigen Parameter der Solarstrahlung. Mit der Erkenntnis, dass für akkurate und komplette Wettervorhersagedaten, welche automatisiert zur Verfügung gestellt werden, ein finanzieller Aufwand anfällt, wurde entschieden die Lösung zu wählen welche alle Anforderungen aus einer Hand erfüllt. Daher wird mit der API von Meteomatics, für welche auch ein Modul (Python-Library) mit dem Namen «meteomatics», weitergearbeitet.

3.5.2 Abrufen von Wetterprognosedaten und generieren einer epw-Datei

Das Abrufen der Wetterprognosedaten und generieren einer epw-Datei, mit welcher direkt Simulationen durchgeführt werden können, erfordert einen neuen, automatisierten Prozessablauf. Dieser basiert auf einer Kombination der Python-Modulen «meteomatics» und «pyepw».

In einem ersten Schritt werden über die API-Schnittstelle von Meteomatics die Wettervorhersagedaten der benötigten Parameter für den gewünschten Zeitraum (Vergangenheit und Zukunft) aus dem Internet abgerufen. In einem zweiten Schritt werden die abgerufenen Daten mit dem Modul «pyepw» in der epw-Vorlagedatei beim entsprechenden Zeitstempel dem korrekten Parameter zugewiesen. Zum Schluss wird die epw-Datei in ihrer aktualisierten Form neu gespeichert. Die Abbildung 7 zeigt die Verknüpfung der Komponenten des Systems auf. Die dadurch bereitgestellte epw-Datei kann anschliessend für die Simulation des EnergyPlus™ Modells für den abgerufenen Zeitraum genutzt werden. Das gesamte Skript ist in Anhang 2: Skript «meteomatics_epw» ersichtlich. Nachstehend werden die relevanten Teilschritte erläutert.

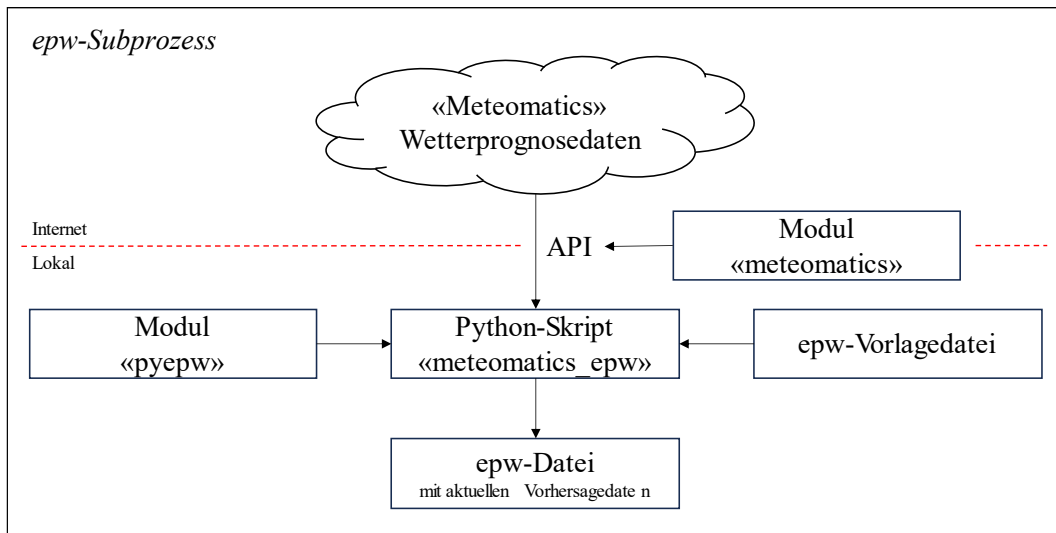


Abbildung 7. Subprozess für die automatisierte Erstellung einer epw-Datei.

Folgende Schritte werden dabei ausgeführt:

1. Aufrufen der Meteomatics-API mittels Benutzername und Passwort (Legitimation)
2. Abfrage der erforderlichen Parameter für das definierte Zeitfenster
3. Überführen der temporär bereitgestellten Wetterdaten in eine epw-Vorlagedatei mittels «pyepw»-Modul
4. Abspeichern der epw-Datei mit den aktualisierten Wetterdaten

Die API von Meteomatics ermöglicht den Zugriff auf aktuelle Wetterbedingungen, historische Daten sowie Vorhersagen. Die API nutzt HTTP-Anfragen und liefert die Daten im csv-Format. Es ist möglich, die Vorhersagedaten für eine beliebige Koordinate abzurufen, somit auch für den exakten Standort des Gebäudes «AUE BS» mit den Koordinaten (47.5595 / 7.5871). Dazu nutzt das Vorhersagemodell von Meteomatics Werte von mehreren umliegenden Wetterstationen und kann so eine präzise Vorhersage für den gewünschten Punkt herleiten. Die aus der API-Abfrage zurückgelieferten Werte lassen sich jedoch nicht direkt für die Simulation nutzen. Eine Überführung der Daten in eine epw-Datei ist erforderlich. Dieser Schritt wird erreicht mit einem Python-Skript, welches csv-Format weiterverarbeitet. Das Modul «pyepw» [51] basiert auf ebenfalls Python und dient dazu, epw-Dateien zu konfigurieren. In der Programmbibliothek bestehen zwar einige Fehler, welche vor der Anwendung jedoch selbstständig behoben werden können. Die Problematik ist, dass in der epw-Datei Werte, welche nicht vorhanden sind durch «pyepw» mit dem Code 999 (statt leer) gekennzeichnet werden. In der Programmbibliothek sind für gewisse Parameter aber Grenzwerte hinterlegt. Dies betrifft folgende Werte:

- *opaque_sky_cover* (max. 10)
- *total_sky_cover* (max. 10)
- *wind_speed* (max. 40)
- *wind_direction* (max. 360)

Diese Grenzwertvorgaben müssen im Sub-Skript «epw.py» manuell auf 999.99 geändert werden, sodass auch Felder ohne Werte möglich sind für diejenigen Tage in der Vergangenheit oder Zukunft, welche nicht simuliert werden und entsprechend noch keine Wetterdaten enthalten.

3.6 Automatisierte Simulation und Auswertung von Varianten

Die Automatisierung der Simulation und Auswertung von Varianten basiert auf dem Python-Modul «eppy» und dem Skript «meteomatics_epw.py». Sie wird anhand des Beispiels der Gebäude «AUE BS» erläutert, lässt sich aber generalisiert auch für andere EnergyPlus™-Simulationsmodelle anwenden. Die Abbildung 8 zeigt das gesamte System, wie das Skript «eppyAUE» die Inputdateien bearbeitet, welche Module dazu verwendet werden und wie zum Schluss ein Output generiert wird.

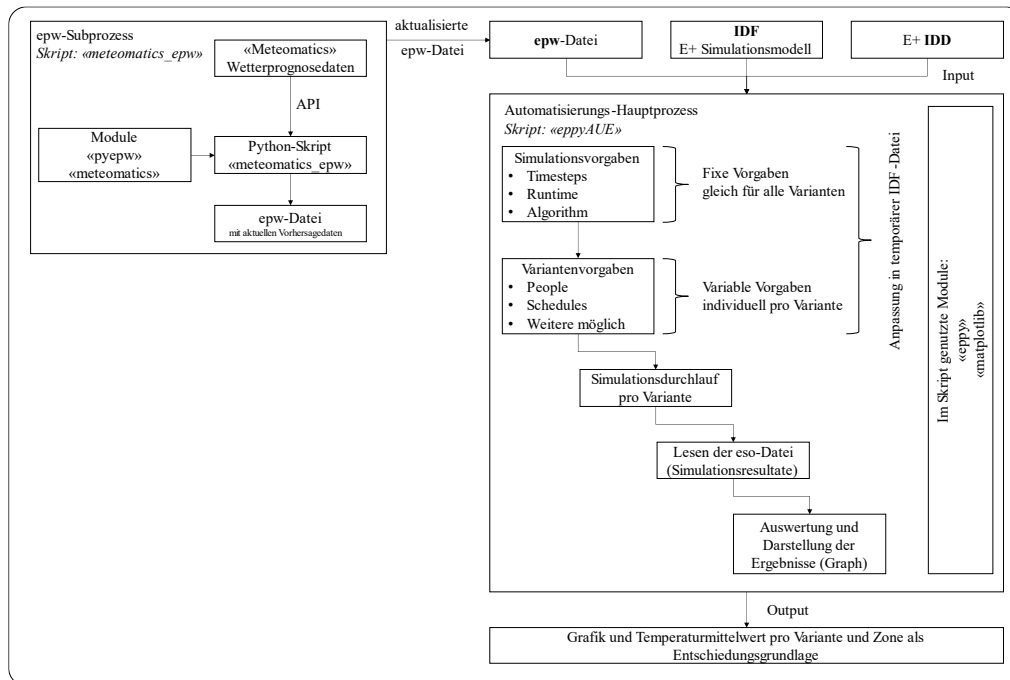


Abbildung 8. Methode zur Automatisierung von Simulation und Auswertung von Varianten.

Das Skript «eppyAUE» führt folgende Aktionen aus:

1. Aktualisieren der epw-Wetterdatei über den Subprozess «meteomatics_epw»
2. Laden der IDF-, IDD- und epw-Datei als Input für die weiteren Schritte
3. Generieren einer Temporären IDF pro Variante
4. Generelle Simulationenvorgaben (Zeitschritte, Laufzeit, Algorithmus) im Modell anpassen
5. Variantenbezogene Vorgaben (Personenbelegung, Zeitplan für Nachtauskühlung, weitere jederzeit möglich) im Variantenmodell anpassen.
6. Simulation pro Variante durchführen
7. Simulationsergebnis pro Variante automatisch auswerten
8. Berechnen des Temperaturmittelwert pro Variante und Zone
9. Erzeugen eines Ergebnisgraph für die Temperaturentwicklung pro Variante und Zone über den gesamten Simulationszeitraum

Durch die Automatisierung der Simulation und Auswertung in EnergyPlus™ wird die Effizienz und Genauigkeit bei der Analyse von Betriebszuständen gesteigert. Das Skript «eppyAUE.py» automatisiert den gesamten Prozess, von der Datenaktualisierung bis zur Ergebnisdarstellung, und ist auf andere Modelle als das «AUE BS» übertragbar. Dies führt zu einer Zeitersparnis und besseren Entscheidungsgrundlage. Das gesamte Skript ist im Anhang 1: Skript «eppyAUE» zu finden.

3.7 Prozess zur automatisierten Gebäuderegulierung

Basierend auf der erarbeiteten Lösung zur Automatisierung wird eine zusätzliche Methode erarbeitet, welche die im Kapitel 7 gewonnenen Erkenntnisse (Anpassung der Zieltemperatur und zeitliche Anpassung) zur Optimierung der Nachtauskühlung verwendet. Dabei geht es insbesondere um die Beurteilung von Varianten und den damit verbundenen Aktionen, welche daraus ergriffen werden, um das Gebäude entsprechend zu regulieren. Das oberste Ziel dabei ist immer, Vorgaben zu erhalten, welche es ermöglichen das Gebäude optimal zu betreiben, indem die richtigen Zeitpläne und Sollwerte eingestellt werden. In Abbildung 9 ist die Struktur der neuen Methode ersichtlich.

Wichtig zu beachten ist, dass es sich dabei um einen Ablauf handelt, der Ideal ist und bei dem real noch nicht alle Elemente umgesetzt werden. Diese Elemente, welche zwar zum Workflow gehören, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht implementiert wurden, sind mit roter Farbe hinterlegt. Weiter sind auch insgesamt neun Varianten definiert, welche miteinander verglichen werden sollen. Davon sind momentan drei vorhanden. Dadurch kann die Methodik aufgezeigt werden, doch auch zeitlichen Gründen wurde auf die komplette Programmierung verzichtet. Das komplette Skript «AUEbuildingregulation» ist im Anhang 3: Skript «AUEbuildingregulation» zu finden. Nachstehend wird auf den Ablauf eingegangen. Der Prozess beginnt täglich mit einer automatischen Initialisierung um 12:00 Uhr. Dabei werden die aktuellen Wetterdaten über die Meteomatics-API abgerufen und in die epw-Wetterdatei integriert. Parallel dazu werden die Belegungszahlen der verschiedenen Zonen des Gebäudes aus einer definierten Datenbank abgerufen. Diese Daten können in einem fortgeschrittenen Stadium aber auch über Sensoren im Gebäude erfasst werden und dann in die Datenbank übertragen werden, von wo aus sie dann weiter genutzt werden können. Nach dem Anpassen der Personenbelegungszahl werden die automatische Simulation der verschiedenen Varianten gestartet. Die Varianten unterscheiden sich in Bezug auf die Zieltemperatur der Nachtauskühlung sowie der Zeitdauer, in der die Aussenklappen geöffnet sind. In Tabelle 4 sind die Konfigurationen ersichtlich.

Tabelle 4. Konfigurationsvarianten für die zeitliche und temperaturabhängige Öffnung der Aussenklappen.

Temperatur Zeit	bis 08:00 Uhr	bis 06:00 Uhr	bis 05:00
Setpoint: 19°C	Variante 1 (Standard)	Variante x ₁	Variante x ₂
Setpoint: 17 °C	Variante x ₃	Variante 2	Variante x ₄
Setpoint: 16°C	Variante x ₅	Variante x ₆	Variante 3

Wie beschrieben, werden nur die Fett markierten Varianten im Skript umgesetzt. Die definierten Varianten werden simuliert und anschliessend ausgewertet. Hierbei werden Temperaturdiagramme generiert, welche die Temperaturverläufe der unterschiedlichen Varianten darstellen. Anhand dieser Diagramme wird die Integralflächen unter den Temperaturkurven berechnet, um die Effizienz der Varianten gegenüber der Standardeinstellung (19°C, bis 08:00h) zu bewerten. Auf Grundlage dieser Berechnungen erfolgt die Entscheidung für die optimale Variante. Dabei wird entweder die Variante mit der grössten Integralfläche gewählt und darauf geachtet, dass die Temperatur um 08:00 Uhr nicht unter 19 °C liegt. Die Variante, welche die festgelegten Kriterien am besten erfüllt, wird schliesslich ausgewählt. Daraufhin werden die Vorgaben des Temperatur-Setpoints sowie für das Zeitprogramm zur Öffnung und Schliessung der Aussenklappe generiert. Diese können dann im Gebäudeleitsystem (momentan händisch, bei einer Schnittstelle aber auch automatisiert) angepasst werden. Dies ist in Abbildung 10 zu sehen. Der Prozess endet mit dem Abschluss des Zyklus und

dem Warten auf die nächste Simulation. Dieser automatisierte Ablauf ermöglicht eine Optimierung und Regelung der Nachtauskühlung, welche auf Simulationen und der Auswertung von den generierten Daten basiert.

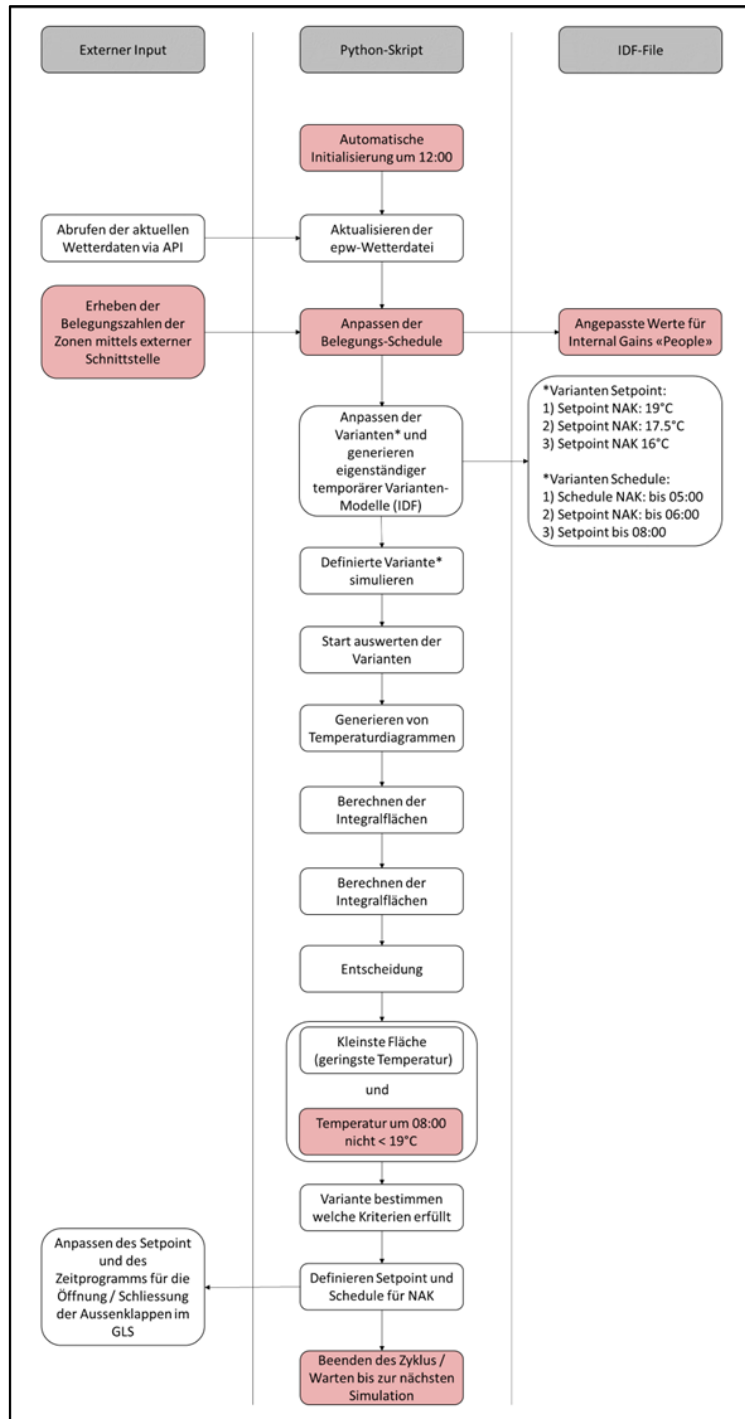


Abbildung 9. Neue Methode «AUEbuildingregulation» zum Generieren von Vorgaben zur Regulierung des Gebäudes. Die rot hinterlegten Elemente gehören zum finalen Prozess, werden aber im erarbeiteten Skript aktuell nicht umgesetzt.

```
Durchschnittliche prozentuale Differenz für Variante 2: 0.67 %
Durchschnittliche prozentuale Differenz für Variante 3: 7.27 %
Beste Variante: Variante 1 mit einer durchschnittlichen prozentualen Differenz von 0.00 %
Setpoint Temperature: 19 °C
Setpoint Time:
T1: 08:00:00, VUT1: 1
T2: 19:30:00, VUT2: 0
T3: 00:00:00, VUT3: 1
```

Abbildung 10. Ausgabe des Setpoint für Temperatur und Zeit für die Nachtauskühlung.

4 Nachtauskühlung durch Fensterlüftung in Räumen

Im Rahmen des VP2 wurde im Rahmen von verschiedenen Simulationsszenarien festgestellt, dass die Nachtauskühlung der Räume im Objekt «AUE BS» auch ohne Kamineffekt, sondern über die reine Fensterlüftung funktioniert [5]. In diesem Kapitel soll daher vorab untersucht werden, ob diese Simulationsergebnisse aus EnergyPlus™ plausibel sind, oder ob es sich um eine fehlerhafte Berechnung handelt. Dazu werden anhand des Beispiels der Raumgruppe «Sitzungszimmer» eine händische Berechnung des Luftvolumenstroms vorgenommen. Dazu wird das Verfahren der einseitigen Fensterlüftung angewendet da die Sitzungszimmer über eine Aussenklappe verfügen. Das Verfahren der Querlüftung, wie es für die Raumgruppe «Grossraumbüro benötigt würde, wird nicht betrachtet.

4.1 Simulierter Luftvolumenstrom

Um den Luftvolumenstrom im Objekt «AUE BS» näher zu betrachten, wird als Beispielraum der Raum O5 010 ausgewählt. Dieser wurde bereits im VP2 ausgewertet und dabei konnte festgestellt werden, dass die simulierte operative Raumtemperatur bei geschlossener Klappe zum Treppenhaus gegenüber der Variante mit offener Klappe zum Treppenhaus und Oblicht, unverändert bleibt. Um bei der Berechnung ein möglichst aussagekräftiges Resultat zu erhalten, wird ein Zeitpunkt gewählt, bei dem die Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur möglichst gross ist.

Bei der Auswertung der Simulation können für den 08. August 2023 zwischen 07:00 und 08.00 Uhr folgende mittleren Werte der entsprechenden Parameter festgestellt werden:

- Aussentemperatur: 12,6 °C (real gemessener Wert)
- Operative Raumtemperatur: 20,9 °C (in EnergyPlus™ simulierter Wert)
- Windgeschwindigkeit: 5 m/s (real gemessener Wert)
- Luftvolumenstrom Aussenklappe: 0.029 m³/s (in EnergyPlus™ simulierter Wert)

Der von EnergyPlus™ simulierte Luftvolumenstrom beträgt somit hochgerechnet auf eine ganze Stunde 104.4 m³/h für den Raum O5 010. In EnergyPlus™ wurde bei der Aussenklappe ein «WidthFactor» von 0.26 eingesetzt, welcher die Durchlässigkeit der Öffnung für Luftströme aufgrund des Wetterschutzgitters reduzieren soll. Der «DischargeCoefficient» hingegen wurde auf 1.0 belassen. Somit ergibt sich eine Durchlässigkeit der Öffnung von 26 %.

4.2 Berechnung des Luftvolumenstroms bei einseitiger Fensterlüftung

Zur Berechnung des Luftvolumenstroms bei einseitiger Fensterlüftung mit einer Öffnung pro Raum bestehen mehrere Ansätze. Plesner et al., [35] haben in ihrer Arbeit verschiedene Ansätze vorgestellt und untersucht. Sie kamen zum Schluss, dass für einfache und schnelle Berechnungen zur groben Einschätzung von Luftvolumenströmen keine CFD-Berechnungen nötig sind, sondern dass einfache Berechnungsmethoden ausreichen. Zum besseren Vergleich und zur gegenseitigen Überprüfung sollen in dieser Arbeit zwei der vorgestellten gängigen Berechnungsmethoden angewandt werden. Diese werden nachstehend erläutert. Weiter wird auf den Umstand der «Wetterschutzgitter» im Objekt «AUE BS» hingewiesen. Die Aussenklappen sind zum Schutz vor äusseren Einflüssen wie

Regen und als Sicherheitselement mit Wetterschutzgitter ausgerüstet. Wie diese Aussenklappe mit diesem baulich festverbundenen Element aussieht, ist in der Abbildung 11 zu sehen



Abbildung 11. Automatisierte Aussenklappe im Objekt «AUE BS» zum Luftwechsel bzw. als Nachströmöffnung für die Nachtauskühlung

Dieses Wetterschutzgitter stellt einen Widerstand dar, durch welchen der Luftstrom beim Ein- und Austritt beeinträchtigt wird. Die Berechnungen werden um einen zusätzlichen limitierenden Faktor ergänzt werden. Dieser wird als F_{Wsg} (Faktor Wetterschutzgitter) in der Gleichung ergänzt.

Um den Luftvolumenstrom zu berechnen, werden die beiden Methoden nach Warren & Parkins sowie De Gids & Phaff angewandt. Bei der händischen Berechnung wird für den «Discharge Coefficient» (C_d) wie in der Literatur vorgeschlagen ein Wert von 0.6 gewählt. Um nun ebenfalls auf eine Gesamtdurchlässigkeit der Aussenklappe von den im Simulationsmodell definierten 26 % zu kommen, wird der Faktor des Wetterschutzgitters (F_{Wsg}) basierend auf eigenen Annahmen auf 0.45 festgelegt. Zusätzlich sind folgende Werte bekannt:

- Höhe der Aussenklappe: 1.79m
- Breite der Aussenklappe: 0.22m

Anhand dieser Angaben sowie den erläuterten Formeln wird Luftvolumenstrom berechnet.

4.2.1 Methode nach Warren & Parkins

Die Berechnungsmethode von Warren & Parkins [37, S. 20] basiert auf dem Auftrieb bzw. dem Druckunterschied zwischen dem Gebäudeinnern und der Aussenwelt. Sie deckt sich auch mit der Methode, welche in der SIA 382/5 «Mechanische Lüftung in Wohngebäuden» eingesetzt wird. Die Berechnungsformel und Berechnung dieser Methode ist in der Gl. 1 und Gl. 2 ersichtlich.

$$q_v = F_{Wsg} \cdot c_d \cdot (H \cdot B) \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{g \cdot H \cdot \frac{\theta_i - \theta_e}{\theta_e}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit den obenstehenden Werten lässt sich nun der Luftvolumenstrom q_v pro Sekunde durch die Ausenklappe des Raums O5 010 mit der Methode von Warren & Parkens in der Gl. 6 berechnen

$$q_v = 0.45 \cdot 0.6 \cdot (1.79 \text{ m} \cdot 0.22 \text{ m}) \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 1.79 \text{ m} \cdot \frac{293.9 \text{ K} - 285.6 \text{ K}}{285.6 \text{ K}}} = 0.025 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (\text{Gl. 2})$$

Der berechnete Luftvolumenstrom beträgt somit hochgerechnet auf eine ganze Stunde $90 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.2.2 Methode nach De Gids & Phaff

Die Berechnung nach De Gids & Phaff [36, S. 4] bezieht neben dem Auftrieb bzw. den Druckunterschieden zusätzlich auch die Windgeschwindigkeit mit ein. Die Berechnung erfolgt in zwei Gleichungen (Gl. 3 und Gl. 4). Zunächst wird in der Gl. 3 aus [36] die mittlere Luftgeschwindigkeit in der Öffnung U_m ermittelt.

$$U_m = C_t + C_w \cdot U_{10}^2 + C_{st} \cdot H_{window} \cdot \text{abs}(\theta_i - \theta_e) \text{ [m/s]} \quad (\text{Gl. 3})$$

Daraus lässt sich abgeleitet aus [35] der Volumenstrom q_v in der Gl. 4 berechnen.

$$q_v = 3.6 \cdot 500 \cdot A_{ow} \cdot U_m^{0.5} \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (\text{Gl. 4})$$

Nach diesen Gleichungen wird zunächst die Luftgeschwindigkeit nach der Methode von De Gids & Phaff in Gl. 5 berechnet.

$$U_m = 0.01 + 0.001 \cdot 5 \text{ m/s} + 0.0035 \cdot 1.79 \text{ m} \cdot \text{abs}(285.6 \text{ K} - 293.9 \text{ K}) = 0.087 \text{ [m/s]} \quad (\text{Gl. 5})$$

Danach wird in Gl. 6 der Luftvolumenstrom q_v berechnet.

$$q_v = 0.45 \cdot 3.6 \cdot 500 \cdot 0.39 \text{ m}^2 \cdot 0.087 \text{ m/s}^{0.5} = 0.026 \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Berechnung mit der Methode nach De Gids & Phaff ergibt einen leicht höheren Wert. Hochgerechnet auf eine ganze Stunde ergibt dies einen Wert von $93.6 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.3 Vergleich simulierter und berechneter Luftvolumenstrom

Verschiedene Faktoren wie Druckverhältnisse, Temperaturdifferenzen, Windstärke aber auch Grösse und insbesondere Höhe der Öffnung beeinflussen den Luftaustausch zwischen einem Raum und dem Aussenbereich. Beide Methoden, welche zur händischen Berechnung angewandt wurden, haben einen vergleichbar hohen Luftvolumenstrom ergeben, wie er auch in der Simulation von EnergyPlus™ festgestellt wurde. Das AirflowNetwork von EnergyPlus™ kann also auch bei fehlendem Kamineffekt, d.h. verschlossenen Öffnungen zum Treppenhaus oder den Oblichtern die korrekten Berechnungen zur Ermittlung der Luftvolumenströme durchführen. Die weitergehenden Untersuchungen zum Wärmetausch werden hier nicht weitergeführt, da das validierte Modell diese Berechnungen bereits verlässlich aufgezeigt hat.

5 Implementieren der Lüftungsanlage in bestehendes Simulationsmodell

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie die mechanische Lüftungsanlage im bestehenden Simulationsmodell (siehe Kapitel 0) ergänzt bzw. modelliert wird. Dazu wird erläutert welche Möglichkeiten zur Modellierung in EnergyPlus bestehen, welche Daten erforderlich sind und wie iterative vorgegangen wurde. Zudem werden die Hürden dabei aufgezeigt.

5.1 Grundlagen der Anlagentechnik im «AUE BS»

In diesem Kapitel werden die Kernelemente der realen Lüftungsanlage erläutert. Darauf basierend erfolgt die Modellierung der Komponenten in EnergyPlus™. Da dies so detailliert wie möglich erfolgen soll, wird bereits hier ein Augenmerk auf die Vollständigkeit und Tiefe der Daten gelegt. Die Anlage wird nachstehend nach ihrer Gliederung erläutert. Aus dem IFC-Modell (3D-IFC BIM-Modell) konnten die Kanalspezifikationen (Längen, Breiten und Höhen) detailliert entnommen werden. Ebenso konnten weitere Elemente wie beispielsweise Kulissenschalldämpfer, Bogenstücke, etc. identifiziert werden. Es fehlten jedoch Angaben zum U-Wert (Wärmeübergangskoeffizienten).

5.1.1 Zentrale Luftaufbereitung

Die Aufbereitung der Luft findet zentral im 02.UG in der Technikzentrale statt. Dort befindet sich die Lüftungsanlage in Form eines Monoblocks. Dieser Monoblock bedient sämtliche mechanisch belüfteten Zonen im ganzen Gebäude. In Abbildung 12 ist eine vereinfachte, schematische Darstellung der Anlage zu sehen, welche auf dem Schema des Gebäudetechnikplanes basiert [9].

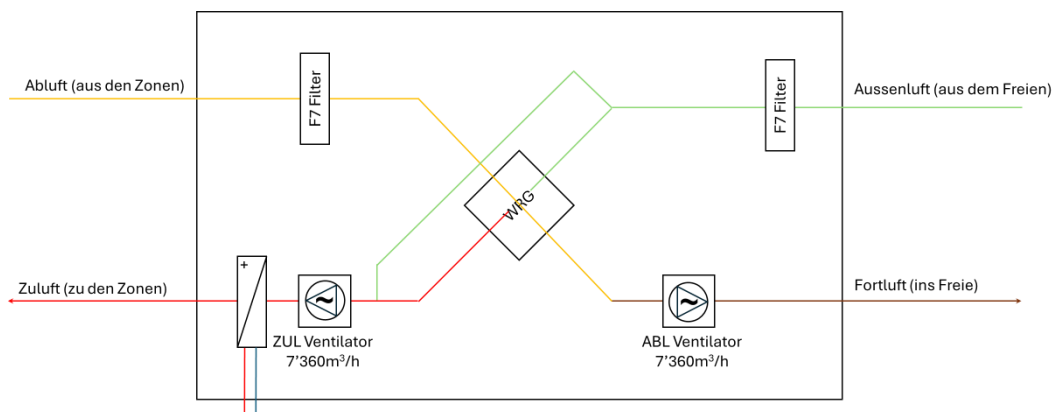


Abbildung 12. Vereinfachte Darstellung der Lüftungsanlage; Luftaufbereitung ohne Kanalnetz zu den Zonen. (Eigene Darstellung basierend auf Elementen aus [9])

Die Lüftungsanlage umfasst folgende Komponenten:

- Zu- und Abluftfilter (F7)
- Wärmerückgewinnung (Enthalpie-Plattentaucher) mit Bypass, Rückgewinn: 24kW
- Zuluftventilator: 7'360m³/h
- Luftherhitzer über Fernwärme: 25.7kW
- Abluftventilator: 7'360m³/h

Die Anlage lässt sich über das Gebäudeleitsystem zeitlich steuern. Eine Auswertung der Betriebsdaten hat gezeigt, dass die Anlage zu den Betriebszeiten, d.h. von Montag bis Freitag von 07:00 – 19:00 Uhr konstant dasselbe Luftvolumen von 7'360 m³/h aufweist. Weiter zu erwähnen ist, dass die Anlage über eine Bypass-Funktion verfügt, welche es erlaubt den Wärmetauscher bei Bedarf bzw. dann, wenn keine Wärmerückgewinnung erfolgen soll, zu umgehen. Gemäss dem Funktionsbeschreibung der Lüftung [7] ist die Betriebsweise:

- «Ablufttemperatur < Aussenlufttemperatur, dann Bypassklappe maximal geöffnet».
- «Ablufttemperatur > Aussenlufttemperatur, dann Bypassklappe geschlossen».

Zudem wird angegeben, dass die Bypassklappenstellung in Abhängigkeit zur Zulufttemperatur steht. Dazu sind aber keine weiteren Angaben zu finden. Da in der vorliegenden Arbeit aber ausschliesslich die Sommermonate, im Zusammenhang mit der Nachtauskühlung betrachtet werden, wird der Fokus nicht auf die Wärmerückgewinnung gelegt. Die Modellierung der WRG erfolgt, jedoch wird keine detaillierte Einstellung und Validierung gemacht. Als wichtig wird die Bypass-Funktion erachtet, welche genutzt wird.

5.1.2 Fernwärme

Die Fernwärme ist ein Zentrales Element für die Beheizung des Gebäudes. Die Lüftungsanlage ist mit der Fernwärme über den Lufterhitzer verbunden. Da der Fokus dieser Arbeit aber auf der Lüftungsanlage und nicht der Heizung liegt, wird auf eine detaillierte Betrachtung verzichtet.

5.1.3 Luftverteilung / Kanalnetz im Gebäude

Von der Lüftungszentrale im 02.UG geht ein weit verzweigtes Kanalnetz ab, welches sämtliche Räume (thermischen Zonen) im Gebäude erschliesst. Zur Identifizierung aller im Zu- und Abluftkanalnetz verbauten Komponenten steht das 3D-Modell im IFC-Format zur Verfügung. Im Anhang 4: «Lüftungspläne» zeigt Abbildung 40 das gesamte Kanalnetz. An dieser Stelle werden einige Punkte hervorgehoben, welche bei der Modellierung von Wichtigkeit sind und ein besonderes Augenmerk erfordern.

Überströmelemente

Einigen Raumgruppen verfügen lediglich über einen Anschluss an einen Zuluftkanal (Sitzungszimmer, Archiv) andere hingegen nur über einen Anschluss an einen Abluftkanal (Druckerraum, WC). Die WC-Anlagen werden beispielsweise lediglich durch Abluftkanäle erschlossen. Die Zuluft erfolgt durch die Überströmung aus dem benachbarten Archiv. Diese Überströmung erfolgt durch spezifische, schallgedämmte Überströmelemente wie sie in Abbildung 13 ersichtlich sind. Der Hersteller gibt den Druckverlust dieses Elements mit 50 Pa an [52].



Abbildung 13. Beispiel eines schallgedämmten Überströmelement der Firma Durrer Technik, wie es im Gebäude «AUE BS» verbaut ist. (Bild aus [52])

Abbildung 14 zeigt anhand des Beispiels des 01.OG, wie die Überströmung auf einem Stockwerk funktioniert. So wird Zuluft ins Sitzungszimmer eingeleitet und von dort in den Druckerraum überströmt. Im Druckerraum wird ein Teil der Luft über den Abluftkanal zurückgeführt und ein anderer Teil wird weiter ins Archiv überströmt. Zuletzt wird auch Zuluft ins Archiv eingeleitet und von dort in die WC-Anlage überströmt, wo sie wieder in das Abluftkanalnetz eingeleitet wird.

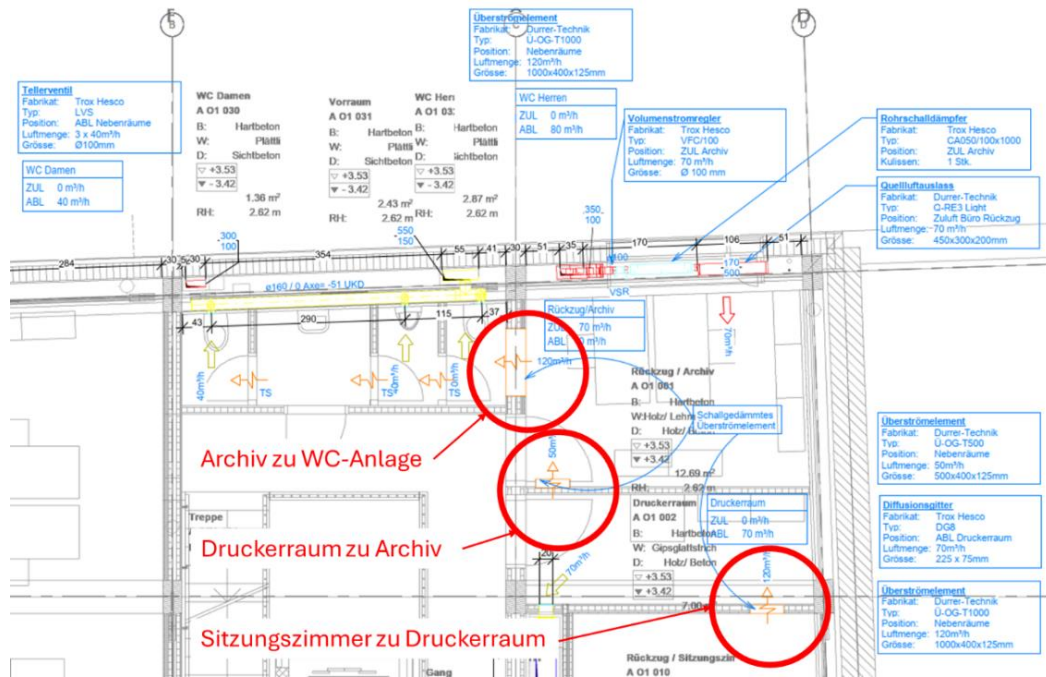


Abbildung 14. Darstellung Überströmöffnungen im 01.OG aus [7].

Luft Ein- und Auslässe Grossraumbüro

Bei der Luftverteilung im realen Objekt in der Raumgruppe «Grossraumbüro» wird die Zuluft über fünf Einlassöffnungen in den Raum und die Abluft über zwei Auslassöffnungen aus dem Raum geführt. Dies aufgrund der Dimension und Anordnung des Raumes sowie der Zu- und Abluftmenge. Dies ist in Abbildung 15 ersichtlich.



Abbildung 15. Übersicht über die Zu- und Abluftöffnungen im der Raumgruppe «Grossraumbüro».

Luftmengen und Volumenstromregler

Die Begrenzung der Zu- und Abluft pro Raum erfolgt über fix eingestellte Volumenstromregler (VSR). Diese wurden bei der Installation so konfiguriert, dass die jeweiligen Räume mit der gemäss dem Konzept definierten Luftmenge versorgt werden. Sie befinden sich alle im verzweigten Kanalnetz verteilt. Für alle Räume sind die detaillierten Angaben zu Zu- und Abluft sowie Überströmung im Anhang 4: «Lüftungspläne» in Tabelle 22 in der Spalte «Bemerkungen» festgehalten. Diese Angaben basieren auf dem Prinzipschema der Lüftung des Gebäudetechnikplanes [9].

Materialisierung Lüftungskanäle

Der Grossteil der Lüftungskanäle weist weder eine Brandschutzdämmung noch eine thermische Dämmung auf. Die Lüftungskanäle bestehen gemäss Lüftungsbauer aus 0.7mm starken Sendzimir verzinkten Stahlblech Kanälen. Die in Tabelle 5 sind im Gebäude vorzufinden Alle Angaben basieren auf dem Austausch mit dem Objektverantwortlichen [53] sowie eigenen Recherchen beim Lüftungsbauer. Die gedämmten Kanäle sind im Anhang 4: «Lüftungspläne» in Abbildung 40 in grauer (Brandschutz) und grüner (thermische Dämmung) Farbe ersichtlich.

Tabelle 5. Materialisierung verschiedener Lüftungskanäle im Objekt «AUE BS».

Kanalart	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Dicke [mm]
Stahlblech Kanäle	50	0.7
Brandschutzgedämmte Kanäle	0.035	60
Thermisch gedämmten Kanäle	0.021	50
Aussen- und Fortluftkanäle	0.04	100

Schalldämpfer

Ebenso sind in den Zu- und Abluftkanälen auch Kulissenschalldämpfer verbaut, welche dazu dienen die Geräusche in den Räumen, welche durch den Luftzug und die Ventilatoren entstehen, zu reduzieren. Diese Schalldämpfer machen einen Teil des Kanalnetzes aus und haben einen Einfluss auf die Druckverhältnisse im Kanalnetz.

Zusammenfassung Kanalnetz

Die Informationen zu den Komponenten im Kanalnetz werden bei der Modellierung der Kanäle benötigt, um bei dem entsprechenden Bauteil den korrekten Wert für beispielsweise den Wärmeübergangskoeffizienten oder den Druckverlust zu hinterlegen. Das IFC-Modell für die Lüftungsanlage ist äusserst detailliert und umfasst sämtliche relevanten Angaben. Es enthält präzise Informationen zu Längen, Dimensionierungen und weiteren technischen Spezifikationen. Diese umfassende Detailtiefe ermöglicht es, alle erforderlichen Daten direkt aus dem Modell zu entnehmen, was eine effiziente Planung, Analyse und Implementierung der Lüftungsanlage gewährleistet. Eine automatische Datenübernahme ins EnergyPlus™ Simulationsmodell ist jedoch nicht möglich. Alle Angaben müssen alle manuell übernommen werden, was sehr zeitintensiv ist.

5.2 Werkzeuge zur Modellierung der Anlagentechnik in EnergyPlus™

Die Simulationssoftware EnergyPlus™ verfügt zur Modellierung einen eigenen, in die Entwicklungsumgebung integrierten «IDF-Editor». In diesem lassen sich die für das Modell benötigten Elemente sowie deren Parameter erfassen und bearbeiten. Dies erfolgt jedoch rein textbasiert. Es gibt

keine grafische Darstellung, welche beispielsweise Verbindungen von einzelnen Elementen miteinander interaktiv ermöglicht. Lediglich miteinander verbundene Elemente können über den SVG-Viewer betrachtet werden. Programme, welche es ermöglichen Elemente auf grafischer Ebene miteinander zu verknüpfen, sind auf dem Markt teilweise frei (OpenStudio [44]) oder mittels einer Lizenz (DesignBuilder [45]) erhältlich [54]. Beide Computerprogramme wurden für die Erweiterung des bestehenden Simulationsmodells eingehend geprüft. Es wurde jedoch festgestellt, dass sich für die vorliegende Aufgabestellung beide Programme nicht eignen. Nachstehend werden die Gründe dazu zusammengefasst:

OpenStudio

- Beim Import des bestehenden Simulationsmodells gehen alle Elemente des AirflowNetworks verloren, da diese nicht mit OpenStudio kompatibel sind.
- Es lassen sich in OpenStudio auch keine neuen AirflowNetwork-Komponenten anlegen und bearbeiten.
- Nicht alle Elemente, welche im Editor zu Verfügung stehen, können in OpenStudio zum Modellieren verwendet werden, was die Flexibilität einschränkt.

DesignBuilder

- DesignBuilder arbeitet mit der EnergyPlus™-Version 9.4, welche nicht kompatibel ist mit der Version 22.2 in welcher das bestehende Simulationsmodell modelliert ist. Ein Import des bestehenden Modells ist somit nicht möglich da es keine Möglichkeit gibt auf ältere Versionen zurückzukehren. Es gibt lediglich Möglichkeiten für höhere Versionen.
- Beim Import von gbXML-Daten aus dem bestehenden Simulationsmodell gehen zahlreiche Informationen wie z.B. die thermischen Zonen verloren, welche eigentlich ein tragendes Element des bestehenden Modells darstellen und genutzt werden sollen.
- Die starren Strukturen erlauben es nur, innerhalb der Vorgaben des Programms die Anlage zusammenzustellen. Individuelle Konfigurationen lassen sich nicht realisieren.

Da beide grafischen Bedienoberflächen für die weitere Modellierung des bestehenden Simulationsmodells, welches bereits ein AirflowNetwork sowie Thermische Zonen für die Nachtauskühlung enthält, nicht in Frage kommen, wurde für die weitere Bearbeitung der «IDF-Editor» gewählt. Die Modellierung ist zwar aufgrund der fehlenden grafischen Bedienoberfläche anspruchsvoller und zeitintensiver. Jedoch lässt sich dadurch aber die Anlage detaillierter und individueller modellieren, was dem übergeordnet gesetzten Ziel entspricht.

5.3 Struktur und Implementieren der Anlagentechnik in EnergyPlus™

In diesem Absatz wird erläutert, nach welcher Struktur die Anlagentechnik in EnergyPlus™ modelliert und implementiert wird. Die detaillierte Erklärung dient dazu, zu dokumentieren wie eine in der Schweiz gängige Anlage im US-Amerikanischen System modelliert werden kann. Dies weil in der Literatur kein vergleichbares Projekt gefunden wurde, bei dem in einem EnergyPlus™ Modell eine mechanische Lüftungsanlage mit der natürlichen Nachtauskühlung über die Fensterlüftung

mittels Airflow-Networks kombiniert wurde. Eine Referenz konnte somit nicht gefunden werden und die Grundlagen dazu mussten eigenständig erarbeitet werden.

Bei der Optimierung des Simulationsmodells [5] wurde bereits festgestellt, dass eine hohe Detailtreue bei der Modellierung wichtig ist, um in der thermischen Simulation verlässliche Ergebnisse zu erhalten. Aus diesem Grund sollte auch die Modellierung der Lüftungsanlage so nahe an den realen Bedingungen erfolgen wie nur möglich. Aufgrund der fehlenden grafischen Übersicht wird in MS-Visio eine eigene grafische Übersicht angelegt mit allen Elementen, welche verwendet wurden. Dadurch kann eine bessere Kontrolle über das Gesamtsystem gehalten werden.

5.3.1 Gesamtsystem «HVAC»

Eine thermische Gebäudesimulation mit einer Lüftungsanlage als Bestandteil kann in EnergyPlus™ auf zwei Arten durchgeführt werden. Einerseits ohne Elemente des «AirflowNetwork» (AFN-Elemente). Dabei fällt dabei aber der entsprechenden Vorteile weg, dass auch die natürliche Lüftung über Fensterlüftung miteinbezogen wird. Ebenso wird auch der allfällige wärmegegewinn oder -verlust der Luft über das Kanalnetz nicht beachtet. Technisch ist die Simulation jedoch durchführbar. Wenn in einer Simulation aber ein Hybrides System von Fensterlüftung und mechanischer Lüftung simuliert werden soll, ist eine Verbindung der Anlagentechnik mit dem AFN erforderlich.

Um in EnergyPlus™ ein Lüftungssystem in Verbindung mit einem AirflowNetwork modellieren zu können, werden verschiedene zusätzliche Komponenten benötigt, welche miteinander verknüpft werden müssen. Es gibt daher vorab zwei Begriffsdefinitionen, die auch in der Input/Output Reference von EnergyPlus™ [38, S. 1099] genannt werden, welche für die weitere Modellierung essenziell sind:

- **Reguläres EnergyPlus™-Element (EP-Element)**
alle Elemente, welche zur regulären Simulation ohne AFN genutzt werden
- **AirflowNetwork-Element (AFN-Element)**
alle Elemente, welche ein Bestandteil des AirflowNetwork sind

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass im Modell gewisse Elemente nur als «EP-Element» definiert werden müssen und andere Elemente nur als «AFN-Element» im Modell hinterlegt werden. Es gibt jedoch auch bestimmte Elemente, welche sowohl als «EP-Element» als auch als «AFN-Element» erfasst werden müssen. Im Anhang 5: «Modellierung in EnergyPlus™» in Abbildung 43 werden diese Abhängigkeiten grafisch dargestellt.

5.3.2 AirLoopHVAC

Der AirLoopHVAC stellt das verbindende Element zwischen der Lüftungsanlage und den Zonen dar. Er teilt sich auf in einen Teil «Supply Equipment» (Lüftungsanlage) und einen Teil «Demand Equipment» (Zonen). In einem AirLoopHVAC müssen alle Elemente mit einer Node (Knoten) verbunden sein. Eine Node in EnergyPlus™ repräsentiert einen Punkt im Luftstromnetzwerk, an dem die Bedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Druck gemessen und gesteuert werden. Diese Knoten dienen als Schnittstellen, die sicherstellen, dass die Luft korrekt durch die verschiedenen Komponenten des Systems fließt und dabei die gewünschten Bedingungen in den einzelnen Zonen aufrechterhält. Abbildung 16 zeigt schematisch den AirLoopHVAC. Eine detailliertere Ansicht ist in Abbildung 41 im Anhang 5: «Modellierung in EnergyPlus™» abgebildet.

Kanäle zu berechnen. Nebst jeder individuell konfigurierten «Linkage» ist auch jedes Airflow-Network:Multizone:Surface-Element (z.B. Wand) welches eine Zone von der anderen abtrennt aber dennoch durchlässig ist, ein Verbindung,

Die Abbildung 17 zeigt anhand des Beispiels für den Raum O1 020 die erforderlichen Verbindungen, welche für die die Lüftungsanlage pro Raum im AFN angelegt werden müssen. In xx im Anhang 5: «Modellierung in EnergyPlus™» ist zudem das gesamte System abgebildet wie es angedacht war bevor die Limitationen welche bei der Luftverteilung gelten, bekannt war.

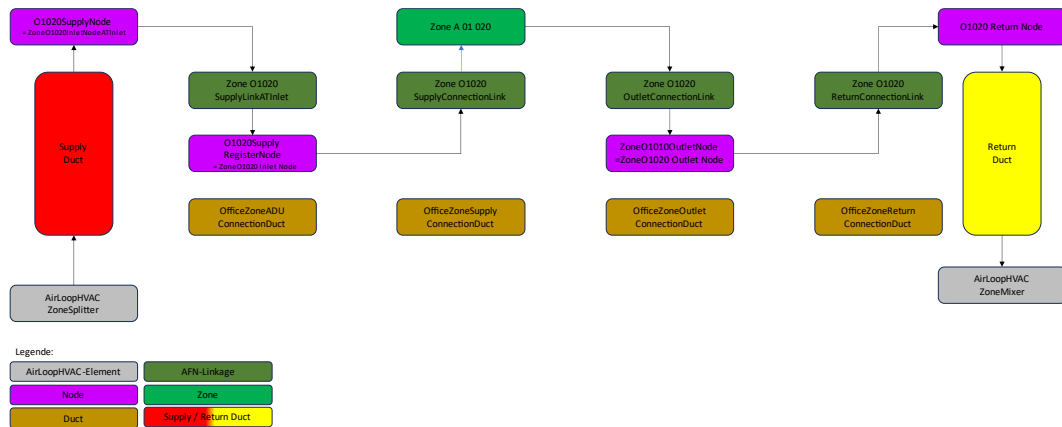


Abbildung 17. AFN-Anbindung der Zonen anhand des Beispiels von der Zone O1 020.

Die Abbildung 18 zeigt die die Knotenpunkte bzw. Verbindungen, welche um die mechanische Lüftungsanlage ergänzt wurden. Bei den Berechnungen in der Simulation werden nun diese Luftströme ebenfalls in die Bilanz aller Luftströme miteinbezogen. Die Summe aller ein- und ausströmenden Luftvolumen muss dabei ausgeglichen sein wobei in EnergyPlus™ dazu die Berechnung im iterativen Verfahren erfolgt.

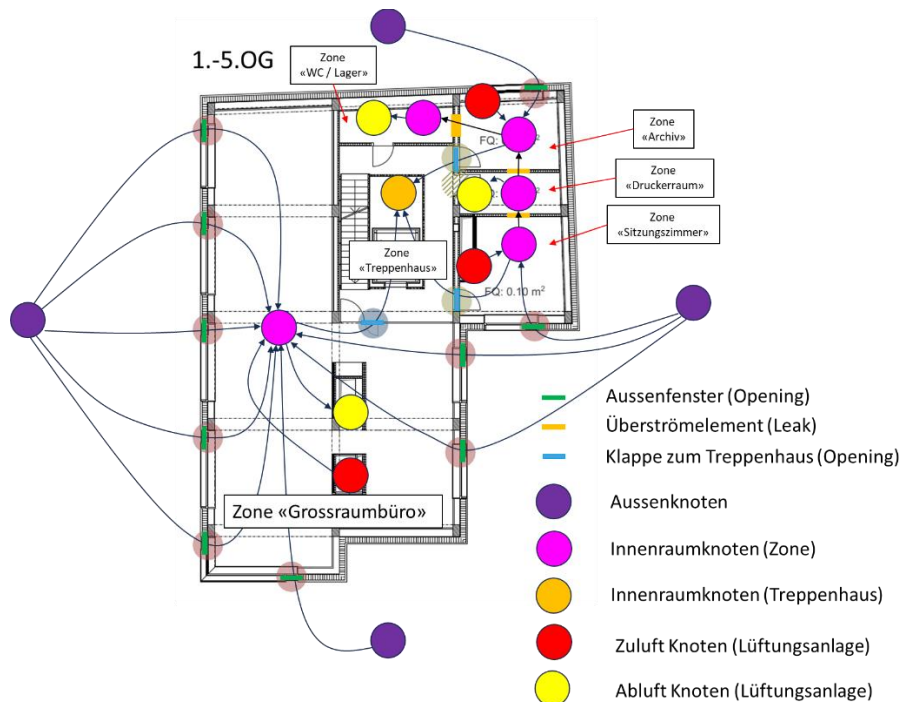


Abbildung 18. Ergänzte Darstellung des AFN mit den Knotenpunkten der Lüftungsanlage.

5.4 Zentrale Lüftungsanlage (Supply Side)

Die reale Lüftungsanlage (Monoblock) setzt sich aus einer überschaubaren Anzahl von Komponenten zusammen, wie dies im Absatz 5.1.1 «Zentrale Luftaufbereitung» aufgezeigt wurde. Somit sind auch die Komponenten, welche im Modell dafür eingesetzt werden sollen, klar. Nachstehende wird darauf eingegangen, welche einzelnen Elemente in EnergyPlus™ verwendet werden.

5.4.1 Aussenluft

Die drei Elementen `AirLoopHVAC:OutdoorAirSystem`, `OutdoorAir:Mixer` und `Controller:OutdoorAir` dienen dazu, die Verbindung der Anlage zur Aussenluft herzustellen. Das Mixer-Element ist erforderlich, auch wenn es auf den ersten Blick verwirlich scheint. Denn die Anlage im «AUE BS» arbeitet mit 100 % Aussenluft und nicht mit Umluft, wodurch ein «Mixer» obsolet ist. Doch die Modellierung in EnergyPlus gibt vor, dass diese Elemente vorhanden sein müssen und daher wird bei der Konfiguration im `Controller:OutdoorAir` der minimale und der maximale Aussenluft Volumenstrom gleichgesetzt. So kann sichergestellt werden, dass das Modell wie die reale Anlage funktioniert.

5.4.2 Wärmetauscher

Für die Modellierung des Wärmetauschers stehen mehrere Varianten zur Verfügung. Da es sich beim realen Wärmetauscher um einen Enthalpie-Plattenwärmetauscher handelt, wurde das Element `HeatExchanger:AirToAir:SensibleAndLatent` verwendet. Dies, da sich dieses Element gemäss Input-Output Reference von EnergyPlus™ insbesondere zum Darstellen von Wärmetauschern eignet, bei denen die Wärmerückgewinnung aus der Abluft/Fortluft erfolgt.

5.4.3 Ventilator

Zur Modellierung der Ventilatoren wird das Element `Fan:ConstantVolume` verwendet. Dieses eignet sich am besten, da es einen konstanten Volumenstrom, welcher exakt definiert werden kann, darstellt. Dies ist auch bei den realen Zu- und Abluftventilatoren so. Als Luftmenge wird 2.04424 m³/s definiert, was 7'360 m³/h aus den addierten Luftmengen für die Räume (aus Tabelle 22) entspricht. Ein Ventilator muss zusätzlich als AFN-Element erfasst werden um die Systemverknüpfung sicherzustellen (`AirflowNetwork:Distribution:Component:Fan`)

Limitation

Während in einem regulären Simulationsmodell die Anzahl Ventilatoren nicht beschränkt ist, kann in einem AFN-Modell nur ein «Supply Fan» vorhanden sein. In Abbildung 19 ist die Fehlermeldung aus dem fehlerhaften Simulationsdurchlauf ersichtlich, welche auf dem Umstand hinweist. Die Fehlermeldung wurde erst nach unzähligen Versuchen, die Anlage mit zwei Ventilatoren zu modellieren und unterschiedlichen Konfigurationsvarianten von EnergyPlus™ so ausgegeben.

```

** Severe ** AirflowNetwork::Solver::validate_distribution: 'RETURN FAN OUTLET NODE' is not defined as an AirflowNetwork:Distribution:Node object.
** Severe ** AirflowNetwork::Solver::validate_distribution: An AirLoop branch, AIR LOOP MAIN SUPPLY BRANCH, has two or more fans: EXHAUST FAN 1,SUPPLY FAN 1
** ~~~~ ** The AirflowNetwork model allows a single supply fan in an AirLoop only. Please make changes in the input file accordingly.
** Fatal ** AirflowNetwork::Solver::validate_distribution: Program terminates for preceding reason(s).

```

Abbildung 19. Fehlermeldung aus EnergyPlus bei mehr als einem modellierten Ventilator im AFN.

Vereinfachung

Eine Modellierung mit je einem Zuluft- und einem Abluftventilator wie sie im realen Gebäude vorhanden sind, ist nicht möglich. Stattdessen muss beim `OutdoorAir:Mixer` der Anteil der Mindest-Aussenluft auf den selben Wert wie des Zuluftventilators gelegt werden. So entsteht der Effekt das kein Umluft-Betrieb möglich ist aber die ganze Abluft ins Freie geleitet wird, während die Zonen mit 100 % Aussenluft versorgt werden.

5.4.4 Lufterhitzer im Monoblock (`Coil:Heating:Water`)

Der Lufterhitzer wird im Modell durch das Element `Coil:Heating:Water` dargestellt. Als Einspeisung dient wie in der Realität ein Anschluss an die Fernwärme. Bei der Verwendung des Elements `Coil:Heating:Water` im `AirLoopHVAC` ist zwingend eine Heizung im Modell erforderlich. Ohne eine modellierte Heizung kann keine Simulation durchgeführt werden. Daher wird eine einfache, aber dennoch funktionsfähige Lösung gewählt. Diese ist im Absatz 5.6 Heizungsinstallation beschrieben.

5.5 Luftverteilung in die Zone (Demand Side)

Die Luftverteilung in die Zonen beschreibt den Weg der Luft von der Lüftungsanlage in die einzelnen Räume. Die Modellierung erfolgt also dem Pfad der Luft vom Monoblock über das Kanalnetz zum Luftauslass in die Zone. Zudem wird auch der Rückweg der Luft von den Zonen zum Monoblock modelliert. Bei der Modellierung im AFN sind dazu nachstehende Komponenten erforderlich.

5.5.1 Kanal-Verzweigungen

Die Elemente `AirLoopHVAC:ZoneSplitter` und `AirLoopHVAC:ZoneMixer` sind erforderlich, um die Verzweigungen im Kanalnetz darzustellen. Sie stellen zudem auch das Bindeglied zwischen Monoblock und Zonen und umgekehrt dar. Jede Zone muss auf der Seite des Lufteinlass mit einem Splitter und auf der Seite des Luftauslass mit einem Mixer verbunden sein.

Limitation

Durch die weite Verzweigung des Kanalnetz im Objekt «AUE BS» und dem Bestreben, alle Elemente im Modell so detailliert wie möglich darzustellen, wurden alle Kanalsegmente und Verzweigungen einzeln modelliert. Dies hat zu einer sehr grossen Anzahl an Elementen geführt, welche miteinander verknüpft wurden. Im Verlauf der ersten Simulationsversuche wird festgestellt, dass eine Verwendung der Elemente `ZoneHVAC:ZoneSplitter` und `ZoneHVAC:ZoneMixer` in Serie nicht möglich ist. Das heisst eine Aneinanderreihung von Kanalsegmenten ist zwar technisch möglich, doch die Simulation konvergiert nicht. Hingegen ist die Anordnung von Verzweigungselementen (Splitter und Mixer) in Serie nicht möglich, da pro `AirLoopHVAC` in Kombination mit dem AFN nur ein einzelnes solches Element vorhanden sein darf. Auch eine Nachfrage auf der EnergyPlus™ Community-Plattform «Unmet Hours» zu Möglichkeiten wie ein solches Kanalnetz modelliert werden kann ergab keine Antwort. [55]

Vereinfachung

Als vereinfachende Massnahme wird im Modell nur je ein Element vom Typ `ZoneHVAC:ZoneSplitter` und `ZoneHVAC:ZoneMixer` eingesetzt. Auch die Anzahl Kanalsegmente pro Zone wird von einer unterschiedlichen Anzahl pro Zone, wie sie im IFC-Modell vorhanden sind, auf ein einziges Segment pro Zone reduziert. Dieses einzelne Kanalsegment weist aber die kumulierte Länge aller Segmente auf, um dennoch möglichst nahe bei der Realität zu bleiben. Jedoch sind durch diese Massnahme die Werte für den Hydraulischen Durchmesser und die Querschnittsfläche nicht mehr übereinstimmend. Ein ungleiches Druckverhältnis im Kanalnetz entsteht. Auf den Hydraulischen Abgleich im Modell wird daher im Kapitel 5.8.1 eingegangen.

5.5.2 Kanalsegmente

Ohne AFN muss kein Kanal erfasst werden. Für die Berechnungen mit AFN muss jedoch jeder einzelne Kanal (sowohl Aussen- und Fortluft wie auch Zu- und Abluft) als eigenständiges Element `AirflowNetwork:Distribution:Component:Duct` erfasst werden. Dazu müssen bei der Erfassung eines Lüftungskanals die Parameter in Tabelle 6 angegeben werden, wobei die angegebenen Werte verwendet werden.

Tabelle 6. Parameter zur Erfassung eines Lüftungskanales im AFN.

Parameter	Wert
Duct Length	Länge gemäss IFC-Modell
Hydraulic Diameter	Berechnung
Cross Section Area	Berechnung
Surface Roughness	Standartwert 0.0009
Coefficient for Local Dynamic Loss Due to Fitting	0.0
Heat Transmittance coefficient (U-Factor)	Berechnung
Overall moisture Transmittance Coefficient from Air to Air	Standartwert 0.001
Outside Convection Coefficient	25 W/m ² K
Inside Convection Coefficient	8 W/m ² K

Die Kanallänge lässt sich aus dem IFC-Modell direkt ablesen und kann so übernommen werden. Die Werte des Hydraulischen Durchmesser und der Querschnittsfläche können einfach anhand der Werte für Breite und Höhe der Kanäle ebenfalls aus dem IFC-Modell berechnet werden. Für die Oberflächenbeschaffenheit wird aufgrund fehlender Angaben der Standardwert gewählt. Ebenso wird kein Verlustkoeffizient hinterlegt.

Zur Berechnung des U-Wert werden die folgenden Angaben und Annahmen verwendet:

- Sendzimir verzinktes Stahlblech: $d = 0.0007 \text{ m}$ (Ang. Lüftungsbauer)
- Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 50 \text{ W/mK}$ (Ang. Lüftungsbauer)
- Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient innen: $h_{innen} = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$ Annahme aus [56]
- Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient aussen: $h_{ausssen} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ Annahme aus [56]

Der U-Wert berechnet sich nach der Gl. 7.

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{innen}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_{ausssen}}} = \frac{1}{(0.125 + 0.000014 + 0.04)} = 6.06 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (Gl. 7)$$

5.5.3 Überströmung in Zonen

Mittels Element `AirflowNetwork:Distribution:Component:Leak` werden die Überströmelemente modelliert. Dazu wird die Luftmenge in kg/s angegeben, welche von einem Raum zum anderen überströmt wird.

5.5.4 Lufteinlässe / -auslässe pro Zone

Der Übergang vom Kanal in den Raum bedarf in der Modellierung mehrerer Elemente, die zusammen Kombiniert die `ZoneHVAC:EquipmentConnections` ergeben. Für jede Zone muss ein `AirTerminal:SingleDuct` und eine `ZoneHVAC:AirDistributionUnit` (ADU) modelliert werden. Das `AirTerminal` definiert analog einem Volumenstromregler (VSR) die Luftmenge, welche in den Raum eingeführt wird. Die ADU hingegen dient als Bindeglied zwischen dem technischen `AirTerminal` im `AirLoopHVAC` und der Zone. Der Auslass aus der Zone hingegen wird lediglich in der `ZoneHVAC:EquipmentConnections` als «Zone Return Air Node» definiert und bedarf kein weiteres Element.

Limitation

Bei den Lufteinlässe in die Zonen im realen Gebäude handelt es sich um Tellerventile oder Quellaftauslässe ohne spezielle weitere Funktion. Übereinstimmend würde dazu im Modell das Element `AirTerminal:SingleDuct:ConstantVolume:NoReheat` gewählt. Also ein Lufteinlass ohne Heizfunktion. Bei der Modellierung einer Lüftungsanlage im AFN erlaubt EnergyPlus™ aber nur das Element `AirTerminal:SingleDuct:ConstantVolume:Reheat`. Also ein Lüftungsauslass mit einem Heizregister in der Zone. Darauf wird in der Input-Output Reference so Bezug genommen. [38, S. 1149]

Vereinfachung

Um also trotzdem den vorgegebenen Luftvolumenstrom pro Zone einbringen zu können, wird ein `AirTerminal` mit Reheat-Funktion verwendet statt wie in der Input-Output Reference vorgeschlagen nur einem «Duct»-Element. Die Heizfunktion wird aber damit umgangen, dass die Verfügbarkeit des Heizregisters mittels Zeitprogramm so gesteuert wird, dass sie nie verfügbar ist. Damit wird sichergestellt, dass die Funktion des Luftauslasses wie gewünscht verfügbar ist.

5.5.5 Luftherhitzer im Zoneneinlass (AirTerminal / Coil:Heating:Electric)

Infolge der Restriktion über die im AFN zu nutzenden Elemente, mussten als Lufteinlass in die Zonen statt des vorgesehenen `AirTerminal:SingleDuct:ConstantVolume:NoReheat` – Elements, das `AirTerminal:SingleDuct:ConstantVolume:Reheat` – Element verwendet werden. Dieses Element bedarf aufgrund der «Reheat»-Funktion einen dazugehörigen Luftherhitzer auf Zonen-Ebene. Ohne diesen Luftherhitzer kann das `AirTerminal` nicht funktionieren, ein `AirTerminal` ist aber für die Funktionalität im AFN erforderlich. Da die Luftherhitzung pro Zone im Gebäude jedoch real nicht vorhanden ist, wurde entschieden, diese Vorgabe auf einfachste Art und Weise zu erfüllen. Pro `AirTerminal:SingleDuct:ConstantVolume:Reheat` – Element wird ein `Coil:Heating:Electric` – Element ins Modell eingefügt. Dieses Element lässt sich sehr einfach modellieren und kann über die Verfügbarkeit (Availability-Schedule) auf

«permanent aus» eingestellt werden. Somit ist die Komponente vorhanden und die Vorgabe für das AFN erfüllt, jedoch ist die Funktionalität so wie sie auch im realen Gebäude ist, nämlich ohne Luft-erhitzer beim Zoneneinlass.

5.5.6 Schalldämpfer

Mit dem `AirflowNetwork:Distribution:Component:ConstantPressureDrop` als Element, lassen sich Komponenten im Kanalnetz wie Schalldämpfer modellieren. Dazu wird der Druckverlust durch die Komponenten hinterlegt.

5.6 Heizungsinstallation

Um die Lüftungsanlage in EnergyPlus™ mit allen Komponenten abbilden zu können, das heisst insbesondere auch mit dem Lufterhitzer, ist eine dazugehörige Heizung (`PlantLoop`) erforderlich. Dieser wird über die Fernwärme (`DistrictHeating`) mit Warmwasser gespeisen wird. Hierbei kann die zu beziehende Leistung beliebig variiert werden, ohne dazu einen ganzen Heizkessel und weitere Komponenten einer Heizungsanlage zu modellieren. Das reale Gebäude bezieht Fernwärme, sodass das Modell in diesem Sinne auch die Anlage vor Ort abbildet. Aus Ressourcengründen wurde jedoch darauf verzichtet, die Parameter für die Anlageeinstellung zu verifizieren. Der `PlantLoop` ist in Abbildung 20 zu sehen, wobei sich die schematische Darstellung vergrössern lässt.

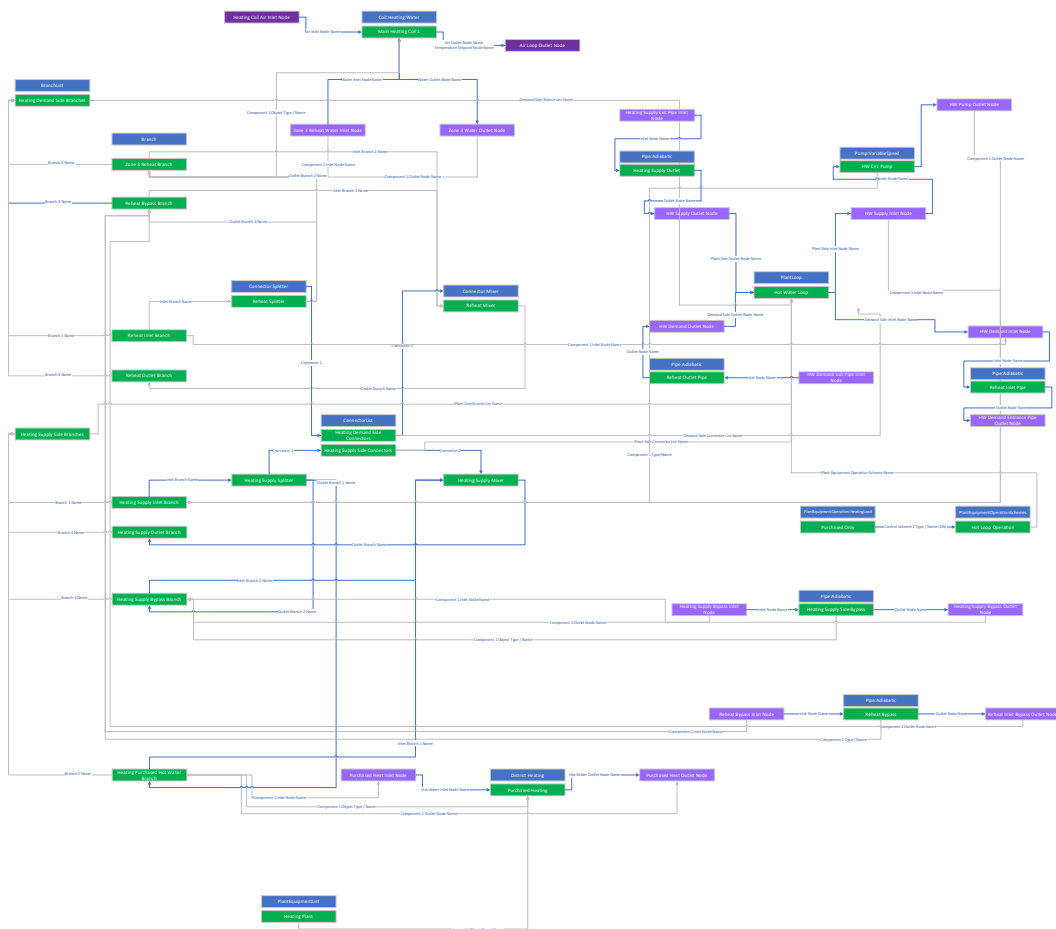


Abbildung 20. Schematische, eigene Darstellung des modellierten PlantLoop (vergrösserbar).

Neben dem PlantLoop werden auch Elemente benötigt, welche die Wärme dann an die Luft abgibt. Dies geschieht über die Elemente `Coil:Heating:Water` und `Coil:Heating:Electric`. Die beiden Elemente sind jeweils bei ihrem Einsatzort, also dem der zentralen Lüftungsanlage bzw. dem `AirTerminal` (Luftverteilung) angesiedelt und werden dort erläutert.

5.7 Generelle Vereinfachungen

Neben den technisch begründeten Vereinfachungen aufgrund von Einschränkungen in EnergyPlus™ gibt es noch weitere Bereiche, welche eine Reduktion erfahren haben. Alle weiteren getroffenen Vereinfachungen werden nachstehend erläutert und begründet.

5.7.1 Zonen im 01.UG

Im bestehenden IDF-Modell des Objekts «AUE BS» wurden bei der Erstellung alle Räume in den oberen Geschossen (ab Erdgeschoss aufwärts) als eigenständige «Thermische Zonen» erfasst. Im Untergeschoss wurde, darauf verzichtet jeden Raum als eine einzelne «Thermischen Zone» zu definieren. Das heisst, dass im Untergeschoss die Komponenten des AFN (AirflowNetwork) nicht raumweise umgesetzt werden können. Die Lüftung kann also nicht wie in der Realität z.B. die Garderoben oder Technikräume einzeln erschliessen. Aufgrund dessen, dass diese Räume im Rahmen der Nachtauskühlung nur von untergeordnetem Interesse sind – es fehlen Lüftungsklappen – wird auf eine Anpassung des Modells in diesem Kontext verzichtet. Die beiden Untergeschosse bleiben je als eine einzelne «Thermische Zone» und die Summen der Zu- und Abluft wird gesammelt in diese einzelne Zone ein- bzw. ausgelassen. Dies geschieht auch gesammelt über einen einzelnen Zu- bzw. Abluftkanal.

5.7.2 Variabler Volumenstrom

Einzelne Räume im realen Gebäude weisen keine fixen Zu- und Abluftvolumen auf, sondern werden über einen VAV (Variabler Volumenstromregler) nach Bedarf mit Luft versorgt. Die Steuerung erfolgt CO₂-basiert. Das heisst je nach Personenbelegung und entsprechender CO₂-Konzentration versorgt die Lüftungsanlage die Räume mit mehr oder weniger Luft. Da in den vorhandenen Unterlagen aber keine präzisen Angaben zur Regelung der einzelnen Räume gefunden werden konnte, wird mit den im Schema angegebenen stündlichen Luftvolumen gearbeitet. Da die vorliegende Arbeit auch nicht die Luftqualität als Hauptbetrachtungspunkt hat, sondern die thermische Behaglichkeit, wird diese Vereinfachung des Modells so akzeptiert.

5.7.3 Verzicht auf Komponenten (Schalldämpfer, Rohrbögen)

Bei der Modellierung wird auf Komponenten wie Kulissenschaldämpfer und Rohrbögen verzichtet. Dies weil sie keinen Mehrwert für die thermischen Bedingungen haben und ihr Druckwiderstand im Kanalnetz anderweitig über die Kanalgrösse abgebildet wird.

5.7.4 Anzahl Zu- und Abluftkanäle bzw. Lüftungsauslässe pro Zone

Im realen Gebäude werden alle Räume, welche zur Raumgruppe «Grossraumbüro» gehören, nicht nur über einen Zuluftkanal und einen Lüftungsauslass von der zentralen Lüftungsanlage mit Luft versorgt. Aufgrund der grossen Fläche haben diese Räume bis zu fünf Lüftungsauslässe was in

Abbildung 15 zu sehen ist. Das Simulationsmodell des «AUE BS» ist ein Mehrzonen-Modell und nicht ein zonales oder CFD-Modell. Bei Letzteren würde die Luftverteilung bzw. Luftströmung *im* Raum in die Berechnungen einbezogen. Im Mehrzonen-Modell im Airflow-Network von EnergyPlus™ wird ein Raum (eine thermische Zone) aber als einzelner Knotenpunkt dargestellt. Daher wird folgende Vereinfachungen definiert:

- Nur ein Zuluft einlass pro Raum
- Nur ein Abluftauslass pro Raum

Die Modellierung eines einzelnen Kanals mit den entsprechenden Lüftungsauslässen ist zeitintensiv und erfordert eine hohe individuelle Konfiguration. Der Umstand, dass eine Zone nur einen Knotenpunkt darstellt, und es daher keinen erheblichen Unterschied macht, ob die Luft aus einem oder mehreren Auslässen in die Zone kommt, legitimiert diese Vereinfachung.

5.8 Finale Implementierung der Anlagentechnik im Modell

Durch den iterativen Prozess und die verschiedenen festgestellten Limitationen und den daraus resultierenden Vereinfachungen wurde das Modell letztlich anders aufgebaut, als dies zunächst geplant war. Statt einem detailliert verzweigten Kanalnetz wurde pro Zone nur ein Zuluft- und ein Abluftkanal modelliert. Daher wird nachstehend auf abschliessende Arbeiten eingegangen, welche nötig waren, um das Modell funktionsfähig zu modellieren.

5.8.1 Hydraulischer Abgleich des Modells

Nach dem ersten erfolgreichen Simulationsdurchgang des Modells mit implementierter Lüftungsanlage, jedoch ohne aktive Nachtauskühlung, konnten erste Resultate ausgewertet werden. Dabei fällt auf, dass im Fehlerprotokoll einige Warnungen in Bezug auf die Luftmenge pro Zone auftreten. Zudem brachen die Berechnungen teilweise ab, nicht auflösbar sind. Diese gehen darauf zurück, dass das vereinfachte Kanalnetz auf Grund der Dimensionen und Längen unterschiedliche Druckverluste aufweist. Daher muss hier ein Abgleich stattfinden, um die Druckverhältnisse ins richtige Verhältnis zu setzen. Ausgangspunkt ist die Luftmenge, welche pro Zone erforderlich, die Kanalänge sowie die Druckerhöhung der Lüftungsanlage. Die Druckerhöhung der Lüftungsanlage wird mit 683 Pa angegeben und die direkt mit Luft versorgten Zonen (ohne Überströmen) belaufen sich auf 27 Räume. Dadurch ergibt sich pro Zone ein Wert von ~25 Pa. Das Kanalnetz muss daher auf die vereinfachten Gegebenheiten abgeglichen werden. Auf Basis der Darcy-Weisbach-Gleichung [39, S. 654] wird die Querschnittsfläche sowie der Hydraulische Durchmesser berechnet, mit welchem der Kanal bei gegebener Länge und gewünschter Luftmenge den entsprechenden maximalen Druckverlust aufweist. Dabei wird der Abgleich so gemacht, dass der Druckverlust über alle Kanäle gleichmässig ist und bei allen Zonen die erforderliche Luftmenge ankommt. Das Gleiche verfahren wird angewendet sowohl für die Zuluft- wie auch die Abluftkanäle. Dadurch stimmten zwar die Kanaldimensionierungen (Höhe und Breite) zwar nicht ganz mit der Realität überein, aber es entsteht ein ausgeglichenes Gesamtsystem, bei dem die Druckverhältnisse aufeinander abgestimmt sind.

5.8.2 Prüfen der Funktionsweise des Simulationsmodells

Vor der weiteren Bearbeitung der Fragestellung wurde die Funktionsweise des Modells überprüft. Dies, um sicherzustellen, die Modellierung der Komponenten erfolgreich ist und die Simulationen verlässliche Ergebnisse liefert. Zu den geprüften Punkten gehört:

- Gesamtluftmenge des Ventilators
- Zu- und Abluftmengen pro Zone
- Zeitlich abhängige Funktionsweise der Anlage nach Definition der Verfügbarkeit in der «Availability Schedule»
- Luftmengen, welche von einer Zone zur anderen überströmt werden
- Funktionsweise der Fensterlüftung im Zusammenspiel mit der mechanischen Lüftung und umgekehrt

Alle Punkte sind erfolgreich geprüft und als korrekt festgestellt worden.

6 Einfluss der Nutzung der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung

In diesem Kapitel geht es darum, mit dem erweiterten Simulationsmodell zu evaluieren, welchen Einfluss die Nutzung der mechanischen Lüftung parallel zur Nachtauskühlung mittels Fensterlüftung auf das Raumklima hat. Zunächst werden die ersten Simulationsergebnisse analysiert und darauf basierend weitere Szenarien definiert, welche betrachtet werden sollen. Zuletzt werden auch noch alternative Varianten, welche im regulären Betrieb nicht vorgesehen sind, auf ihre Wirksamkeit untersucht.

6.1 Initiale Simulation

Mit dem konvergierenden Modell wurden zunächst in zwei willkürlich gewählten Zeiträumen von je fünf Tagen Simulationen durchgeführt, einerseits um generell die Funktionalität der mechanischen Lüftungsanlage aber auch um den Effekt auf die operative Raumtemperatur festzustellen. Die Tabelle 7 enthält die Informationen zu den Simulationsvarianten. In der Auswertung werden jeweils Variante 1-1 und 1-2 sowie 2-1 und 2-2 miteinander verglichen.

Tabelle 7. Simulationszeiträume und -einstellungen für die Initiale Simulation.

Var.	Zeitraum (Runperiod)	Betriebsart Lüftung	Simulationsparameter
A	31.07. – 04.08.2023	Regulär 07:00 – 19:00	Für alle Simulationen: Timestep: 20 per hour Algorithm: CTF Warmup Days: 5/25 (min/max) Weather File: CHE_BS_Base1_ObjektAUEBS
		Dauerbetrieb 24/7	
B	03.07. – 07.07.2023	Regulär 07:00 – 19:00	
		Dauerbetrieb 24/7	

6.1.1 Grafische Auswertung

Die Ausgabewerte der operativen Raumtemperaturen der simulierten Varianten wurden zunächst in einem Diagramm dargestellt, um Unterschiede visuell feststellen zu können.

Dabei wird festgestellt, dass es in den gewählten Zeiträumen keinen Unterschied macht, ob nur die reguläre Nachtauskühlung über die Fensterlüftung aktiv ist, oder ob zusätzlich die mechanische Lüftungsanlage in Betrieb ist. In Abbildung 21 sind anhand von zwei Beispielen im 01.OG und dem 05. OG die Ergebnisse ersichtlicher. Die Datensätze sind beschriftet mit «Regular Timed Ventilation» (orange bzw. grüner Graph), was für den ordentlichen Betrieb der Lüftungsanlage steht und mit «Allways On» (hellblauer bzw. violetter Graph). Letzteres steht für den Dauerbetrieb der Lüftungsanlage. Die Diagramme links zeigen eine reine Arbeitswoche von Montag bis Freitag. Abweichungen sind weder im 01.OG (oben) noch im 05.OG (unten) feststellbar. Die Diagramme rechts zeigen einen längeren Zeitraum, welcher auch Wochenenden beinhaltet. An den beiden Wochenenden sind Abweichungen festzustellen bei der Variante, in der die Lüftung dauerhaft in Betrieb ist. Die Temperaturen fallen zwischen 2°C bis 3°C höher aus, als wenn die Lüftung nicht in Betrieb ist. In der Folge sind auch die Temperaturen an den darauffolgenden Tagen noch leicht höher, bis sie sich wieder auf das gleiche Niveau einpendeln. Dies ist der gegenteilige Effekt von dem, was im Betrieb gewünscht ist.

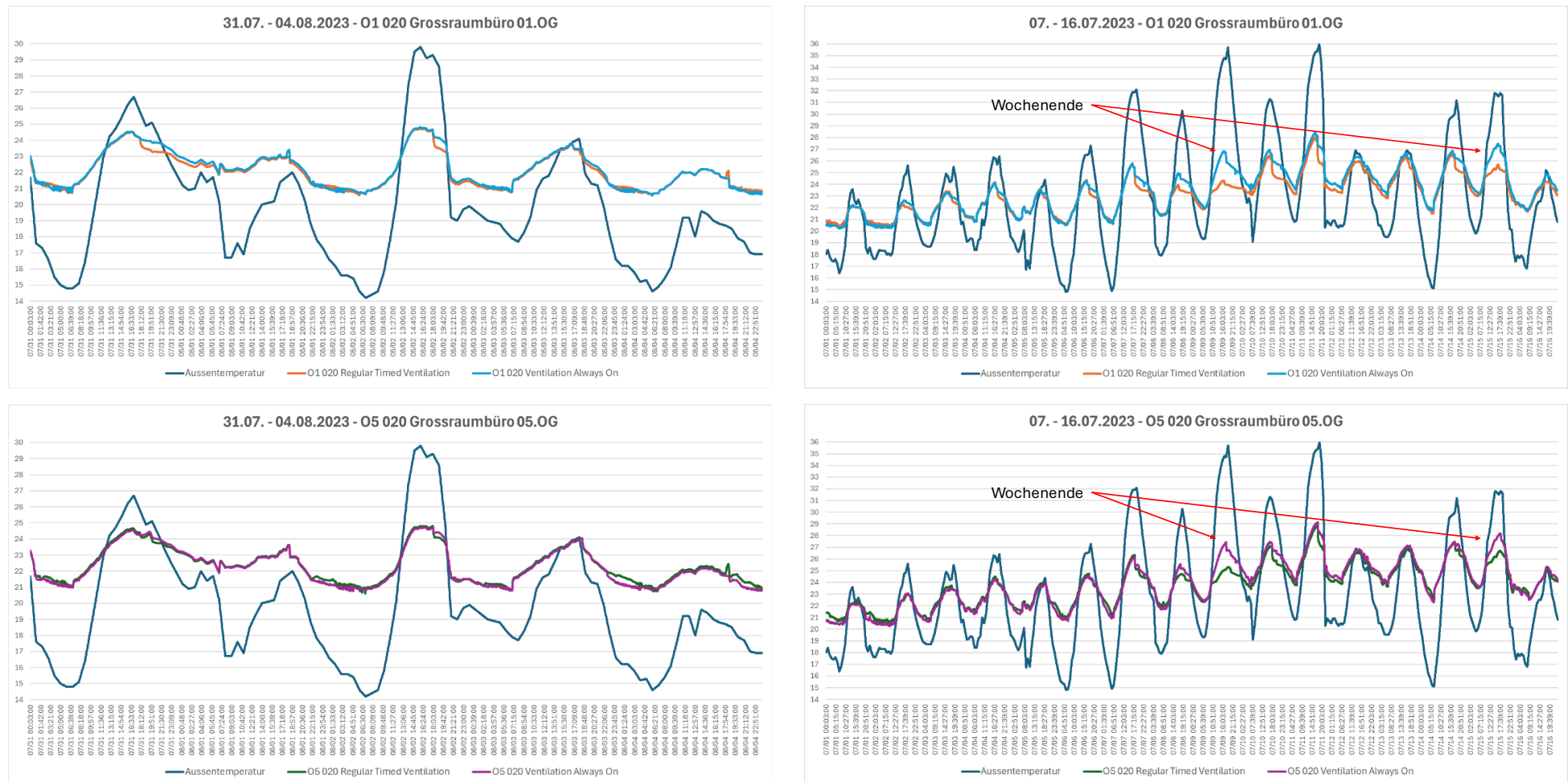


Abbildung 21. Links: Erstes Ergebnis der Simulation für die Periode vom 31.07. – 04.08.2023 für die Grossraumbüros O1 020 (oben) und O5 020 (unten) ohne merklichen Unterschied zwischen den beiden Szenarien. Rechts: Zweites Ergebnis der Simulation für die Periode vom 01.- 16.07.2023 für die Grossraumbüros O1 020 (oben) und O5 020 (unten) mit einem Unterschied zwischen den beiden Szenarien welche jedoch auf das Wochenende (08.-09.07.2023 bzw. 15.07) zurückzuführen ist.

6.1.2 Erkenntnisse für die weitere Bearbeitung

Die beiden initialen Simulationen zeigen, dass der nächtliche Betrieb der Lüftungsanlage in bestimmten Zeiträumen einen Einfluss auf das Raumklima, d.h. die operative Raumtemperatur hat. Der Effekt ist jedoch sehr beschränkt und am Wochenende auch negativ. Es stellt sich die Frage, ob es Zufall ist, dass in den gewählten Zeitfenstern kein Effekt feststellbar ist, oder ob dies generell für das Objekt «AUE BS» so ist.

Die Betrachtung unterschiedlicher und vor allem auch längerer Zeiträume wäre daher der nächste Schritt. Eine durchgehende Betrachtung der gesamten Sommerperiode ist aufgrund der erheblichen Rechenzeit pro Simulation (~12h für eine Periode von einer Woche) nicht möglich. Siehe dazu auch die Tabelle 28 auf S. 100. Aus diesem Grund werden Zeitperioden definiert, welche basierend auf den äusseren Randbedingungen voneinander abweichen und so aufgrund ihres Kontrasts eine höhere Aussagekraft haben.

Neben der Aussentemperatur Kriterium sollen folgende Anpassungen an den Konfigurationen vorgenommen werden, welche bis jetzt für einen negativen Einfluss gesorgt haben. Folgende Punkte werde verändert:

- Anpassen der Zeit für den Betrieb der Lüftungsanlage während der Nacht. Statt einem Dauerbetrieb 24/7 soll die Lüftungsanlage nur zwischen 07:00 – 19:00 und 23.00 – 06.00 in Betrieb sein (Tag- und Nachbetrieb);
- Verzicht auf den Betrieb der Lüftungsanlage tagsüber am Wochenende;

Das Betrachten und Auswerten von Temperaturdiagramme hinsichtlich eines Vergleiches von Varianten hat nur eine geringe Aussagekraft. Ein klarer Vergleich ist nicht direkt möglich und es bleibt viel Interpretationsspielraum. Es ist daher eine zweite Methode erforderlich, welche einen klaren und messbaren Vergleich der Varianten erlaubt.

6.2 Methode zur quantifizierten Auswertung

Um den Nutzen der nachts laufenden Lüftungsanlage zu quantifizieren, werden die Temperaturunterschiede der Varianten systematisch ausgewertet. Dazu wird mittels Integralrechnung die Fläche zwischen den Messreihen der Standardsimulation (*Lüftung im Tagbetrieb*) und den Varianten, bei denen die Lüftung auch nachts (*Tag- und Nachbetrieb*) oder ohne Unterbruch (*Dauerbetrieb*), berechnet. Durch das Aufaddieren der einzelnen Flächen pro Zeitschritt entsteht eine einheitliche Kenngrösse, mit welcher sich der Gewinn durch die laufende Lüftungsanlage der einzelnen Varianten vergleichen lässt. Folgende Punkte müssen dabei besonders beachtet werden:

- Sowohl die Fläche unter der Standardsimulation wie auch die Fläche darüber soll berechnet werden, um festzustellen, um sowohl den positiven wie auch den negativen Effekt der Variante feststellen zu können. Wenn beispielsweise die negative Kennzahl höher ist, schneidet die Variante in der Gesamtbetrachtung schlechter ab.
- Für den direkten Vergleich der Kennzahlen müssen die betrachteten Zeitreihen immer von exakt gleicher Dauer sein.

Die Flächen für alle Raumgruppen können so in einer Tabelle miteinander verglichen werden. Für die in dieser Arbeit betrachteten Zeiträume von je 7 Tagen wurde als Vergleichswert berechnet, dass

1 K Differenz über den gesamten Zeitraum eine Kennzahl von 168 ergibt. Dies als Anhaltspunkt, um nebst dem direkten Vergleich der Varianten auch einen Indikator für die Stärke des Effekts zu erhalten. Diese Kennzahlen sind unabhängig und müssen nicht interpretiert werden. Sie eignen sich daher auch um in der Automatisierung eingesetzt zu werden da sie sich problemlos vergleichen lassen. Um bei der Beschreibung der Ergebnisse eine klare Sprache verwenden zu können, welche nicht missverständlich ist, sollen einheitliche Definitionen genutzt werden. Da zu diesem Thema keine Angaben in einer Norm oder wissenschaftlichen Arbeiten gefunden wurden, basieren diese Begriffe auf eigener Aussage:

- < 0.5 K Differenz (Kennzahl < 84) = *vernachlässigbarer Unterschied*
- 0.5 K – 1.5 K Differenz (Kennzahl $84 - 252$) = *kleiner Unterschied*
- 1.5 K – 3 K Differenz (Kennzahl $252 - 504$) = *spürbarer Unterschied*
- > 3 K Differenz (Kennzahl > 504) = *grosser unterschied*

Diese eigene Unterteilung basiert auf der Spannweite des zulässigen Bereichs der empfundenen Temperatur in Büro und Wohngebäuden nach der Figur 4 in der SIA 180 [25, S. 25] und ist aus der Abbildung 22 hergeleitet.

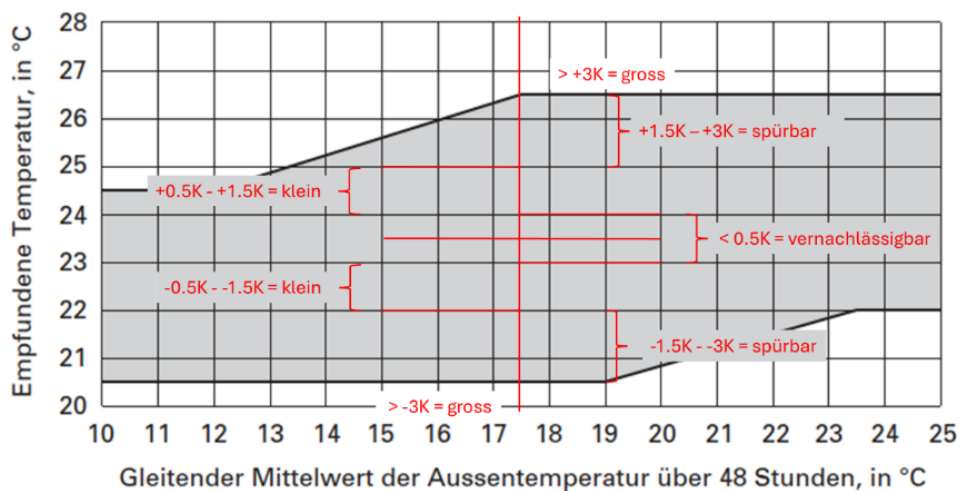


Abbildung 22. Einteilung der eigenen Begriffsdefinition die die Grafik über den zulässigen Bereich der empfundenen Temperatur in Büro- und Wohngebäuden aus der SIA 180 [25, S. 25].

6.3 Randbedingungen und Simulationsparameter

Nachstehend werden basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen Zeitfenster und Kriterien definiert nach denen weitere Simulationen durchgeführt werden. Diese Varianten dienen dazu, eine bessere Vergleichbarkeit zu erhalten. Der selektive Ansatz stellt sicher, dass Simulationsergebnisse nicht willkürlich sind, sondern systematisch überprüft werden.

6.3.1 Betriebszeit der Lüftungsanlage

Ein negativer Einfluss auf die operative Raumtemperatur ist festzustellen, wenn die Lüftungsanlage tagsüber am Wochenende läuft. Ebenso auch im Zeitfenster zwischen 19:00 – 23:00 Uhr. Im nächsten Konfigurationsschritt wird daher die Betriebszeit der Lüftungsanlage am Abend und am Wochenende angepasst. Folgende Konfigurationen miteinander verglichen:

- *Tagbetrieb*
Lüftungsanlage zu regulären Betriebszeit eingeschalten (07:00 – 19:00 Uhr)
- *Tag- und Nachtbetrieb*
Lüftungsanlage tagsüber und nachts eingeschalten (07:00 – 19:00 und 23:00 – 06:00 Uhr)
- *Dauerbetrieb*
Lüftungsanlage dauerhaft eingeschalten (24/7)

Die angepassten Betriebszeiten haben auf die Realität bezogen zudem den Vorteil, weniger Betriebsstunden für die Anlagen zu generieren.

6.3.2 Nächtliche Aussentemperatur als primäre Randbedingung

Für die Betrachtung werden Zeitperioden gewählt werden, in welchen die nächtlichen Aussentemperaturen stark voneinander abweichen. Das heisst Perioden, bei denen die Aussentemperatur unterdurchschnittlich kühl oder überdurchschnittlich warm (Tropennächte [57]) ist. Als Referenz soll zudem eine Zeitperiode mit möglichst durchschnittlichen Werten betrachtet werden. Beim Betrachten der Wetterdaten für den Sommer 2023, mit welchen die Simulationen durchgeführt werden, konnten verschiedene Betrachtungszeiträume identifiziert werden. Die Abbildung 23 zeigt den Temperaturverlauf der Aussentemperatur im Zeitraum vom 01.06. – 31.08.2023. Dabei wurde je ein Zeitfenster von sieben Tagen identifiziert in dem einerseits die Temperatur nachts immer unter 15°C sinkt und andererseits die Temperatur nachts nie unter 20°C sinkt.



Abbildung 23. Aussentemperaturen im Zeitraum vom 01.06. - 31.08.2023.

Daraus ergeben sich folgende Simulationszeiträume:

- *Kalte Nächte* von 03.06. – 09.06.2023 (Temperaturen sinken nachts immer unter 15°C)
- *Tropennächte* vom 19.08. – 25.08.2023 (Temperaturen sinken nachts nie unter 20°C)
- *Referenzzeitraum* vom 13.07. – 19.07.2023 (beide Gegebenheiten treffen zu)

Dadurch soll festgestellt werden, ob es beim Einfluss der mechanischen Lüftungsanlage auf die Nachtauskühlung einen Unterschied gibt, zwischen der Anwendung während Tropennächten und während kühleren Nächten. Zudem wird ein Referenzzeitraum simuliert, in dem beide genannten Gegebenheiten mindestens einmal zutreffen.

6.3.3 Öffnungszustand der Klappen zum Treppenhaus und Dämmung der Lüftungskanäle als weitere Randbedingungen

Der Einsatz der Lüftungsanlage nachts zur Unterstützung der natürlichen Nachtauskühlung hat in der ersten Simulation nur bedingt einen positiven, teilweise sogar einen negativen Effekt auf die Raumtemperaturen im Gebäude gezeigt. Beeinflussbare Faktoren im Zusammenhang mit der

Nachtauskühlung sowie mit der Lüftungsanlage sind einerseits Ausbleiben des Kamineffekts durch Verschliessen der Klappen zum Treppenhaus sowie die Dämmung der Zu- und Abluftkanäle. Es werden Varianten simuliert, welche untersuchen ob diese Randbedingungen einen Einfluss auf den Effekt der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung hat.

Öffnungszustand der Klappen zum Treppenhaus

Um den Einfluss der Klappen zum Treppenhaus und den Oblichtern zu untersuchen wurden mehrere Konfigurationsvarianten simuliert. Folgende Varianten werden untersucht:

- Einfluss der Klappen zum Treppenhaus (offen / geschlossen)
- Einfluss des Dachfensters (offen / geschlossen)

Durch das Verschliessen der Klappen zum Treppenhaus wird der Kamineffekt unterbunden und die Räume stellen eigene Einheiten dar. Durch diese Varianten kann ermittelt werden, ob der Effekt anders ausfällt, als wenn die Klappen geöffnet sind.

Dämmung der Lüftungskanäle

Der Grossteil der Zu- und Abluftkanäle im Gebäude «AUE BS» sind ohne Dämmung ausgeführt. Das bedeutet, vom Monoblock zu den einzelnen Räumen und auch wieder zurück bestehen die Kanäle lediglich aus Sendzimir-Verzinktem Stahlblech. In den Steigzonen, in denen sich die Zu- und Abluftkanäle befinden, kann sich Wärme anstauen. Wenn die Kanäle nicht gedämmt sind, überträgt sich diese Wärme auf die darin transportierte Luft. Daher soll mittels Simulationsvarianten ermittelt werden, ob eine allfällige Dämmung der Zu- und Abluftkanäle eine Auswirkung auf Zulufttemperatur und damit den Effekt der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung hat. Es wird sowohl die *kalte Zeitperiode* wie auch die Periode der *Tropennächte* betrachtet, ob dazwischen ein Unterschied feststellbar ist. Auf eine Betrachtung der neutralen Periode wird aufgrund der geringen Differenz der Aussagekraft zwischen kalter und neutraler Periode verzichtet. Für die Dämmung der Kanäle wird eine 3cm dicke Schicht mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.035 W/mK angenommen. Dies resultiert in einem U-Wert von 1 W/m²K (siehe Gl. 7).

6.4 Modell-Konfigurationen

Auf Basis der Erkenntnis zu den Betriebszeiten der Lüftungsanlage, den äusseren Randbedingungen und den Rechenzeiten werden in einem ersten Schritt neun Simulationsvarianten mit gleich langen Zeiträumen definiert. Diese sollen miteinander verglichen werden, um feststellen zu können ob die gewählten Faktoren einen Einfluss auf die Nachtauskühlung haben. Die Tabelle 8 zeigt die für alle Varianten gleichbleibenden Grundeinstellung der Simulationsparameter in EnergyPlus™. Die Tabelle 9 zeigt anschliessend die definierten Konfigurationen für die Grundvarianten.

Tabelle 8. Definierte Simulationsparameter für die EnergyPlus™-Simulationen.

Parameter	Definierter Wert
Zeitschritt pro Stunde (Timestep)	60 per hour
Simulationsalgorithmus (Algorithm)	CTF (Conduction Transfer Function)
Aufwärmstage des Modells (Warmup Days)	min.5 / max. 25
epw-Wetterdatei (Weather File)	CHE_BS_Basel_ObjektAUEBS.epw

Tabelle 9. Konfigurationsvarianten für die primären Simulationsdurchgänge.

Variante	Zeitraum (Runperiod)	Betriebsart Lüftung	Bemerkung
1-1	03. – 09.06.2023 (kühl)	Tagbetrieb	Ausgangsvariante kühle Nächte
1-2		Tag- und Nachtbetrieb	
1-3		Dauerbetrieb 24/7	
2-1	19. -25.08.2023 (warm)	Tagbetrieb	Ausgangsvariante Tropenächte
2-2		Tag- und Nachtbetrieb	
2-3		Dauerbetrieb 24/7	
3-1	13. - 19.07.2023 (neutral)	Tagbetrieb	
3-2		Tag- und Nachtbetrieb	Ausgangsvariante Referenzzeitraum
3-3		Dauerbetrieb 24/7	

Zusätzlich werden weitere Varianten definiert, welche den Einfluss der Klappen zum Treppenhaus (Tabelle 10) und die Dämmung der Zu- und Abluftkanäle (Tabelle 11) betrachten.

Tabelle 10. Modellkonfigurationen für vergleichende Varianten der Klappen zum Treppenhaus und Oblichter.

Variante	Zeitraum (Runperiod)	Betriebsart Lüftung	Klappe TH	Oblicht	Bemerkung
4-1	03.-09.06.2023 (kühl)	Tagbetrieb	geschlossen	offen	-
4-2		Tag- und Nachtbetrieb	geschlossen	offen	konvergiert nicht
4-3		Tagbetrieb	geschlossen	geschlossen	-
4-4		Tag- und Nachtbetrieb	geschlossen	geschlossen	-
4-7	19.-25.08.2023 (warm)	Tagbetrieb	geschlossen	offen	-
4-8		Tag- und Nachtbetrieb	geschlossen	offen	-
4-9		Tagbetrieb	geschlossen	geschlossen	-
4-10		Tag- und Nachtbetrieb	geschlossen	geschlossen	-

Tabelle 11. Modellkonfigurationen für vergleichende Varianten der gedämmten Zu- und Abluftkanäle.

Variante	Zeitraum (Runperiod)	Betriebsart Lüftung	Bemerkung
4-5	03. – 09.06.2023 (kühl)	Tagbetrieb	Dämmung Luftkanäle (U-Wert von 1 W/m ² K)
4-6		Tag- und Nachtbetrieb	Dämmung Luftkanäle (U-Wert von 1 W/m ² K)
4-11	19. -25.08.2023 (warm)	Tagbetrieb	Dämmung Luftkanäle (U-Wert von 1 W/m ² K)
4-12		Tag- und Nachtbetrieb	Dämmung Luftkanäle (U-Wert von 1 W/m ² K)

Der Simulationsdurchgang der Variante 4-2 hat in mehreren Anläufen und mit mehreren verschiedenen Relaxationsfaktoren und Konvergenzeinstellungen nie konvergiert. Die Simulation ist nach mehreren Stunden jeweils abgestürzt. Daher kann diese Konfiguration nicht ausgewertet werden.

6.5 Auswertung der Simulationsvarianten

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt sowohl grafisch über Temperaturdiagramme und nach der definierten Methode zur quantifizierten Auswertung. Dabei werden die konfigurierten Varianten ausgewertet und mit der Grundeinstellung (d.h. Lüftungsanlage im *Tagbetrieb* ohne weitere Anpassung im Modell) verglichen. Die Grundeinstellung dient immer als Ausgangslage für vergleiche, da sie den aktuellen Ist-Zustand im Gebäude darstellt und somit eine Abweichung von dieser Ausgangslage untersucht wird. Je nach betrachteter Zeitperiode ist die Variante 1-1, 2-1 oder 3-1 die «Grundvariante». Es wird dabei primär der Fokus auf die Raumgruppe «Grossraumbüro» gelegt sowie auf Räume, bei denen eine spezielle Abweichung feststellbar ist. Dies deshalb, weil die Raumgruppe «Grossraumbüro» aufgrund der ganztägigen Personenbelegung im Zusammenhang mit der Behaglichkeit von erhöhtem Interesse ist, wohingegen die Temperaturentwicklung vom beispielsweise einem Druckerraum ohne Personenbelegung eher eine untergeordnete Rolle spielt in der Bewertung des Nutzerkomforts. Wenn keine nennenswerten Abweichungen festgestellt werden,

werden diese in der Auswertung nicht gesondert aufgeführt. Alle Ergebnisse sind jedoch im Anhang 6: «Auswertung der Simulationen» aufgeführt und können dort eingesehen werden.

6.5.1 Kalte Nächte (03.-09.06.2023)

Im ersten Betrachtungszeitraum fällt die Temperatur nachts immer unter 15°C . Die Abbildung 24 zeigt für die Raumgruppe «Grossraumbüro» anhand des Beispiels vom Raum O1 020 im 01.OG die Entwicklung der operativen Raumtemperatur der Varianten 1-1 bis 1-3. Wie ersichtlich ist, hat die mechanische Lüftungsanlage, wenn sie dauerhaft in Betrieb ist, einen negativen Effekt. Die Temperaturen sind tagsüber bis zu 1°C über den Werten, wie wenn die mechanische Lüftungsanlage nur tagsüber läuft und nachts ausschliesslich die reguläre Nachtauskühlung über Fensterlüftung aktiv ist. Hingegen kann festgestellt werden, dass es nahezu keinen Unterschied gibt zwischen der Variante mit nachts eingeschalteter mechanischer Lüftungsanlage und reiner Nachtauskühlung über die Fensterlüftung. Tagsüber sind die Werte der operativen Raumtemperatur maximal um 0.1°C tiefer, wenn nachts die Lüftungsanlage auch läuft. Dies ist somit ein absolut vernachlässigbarer Effekt.

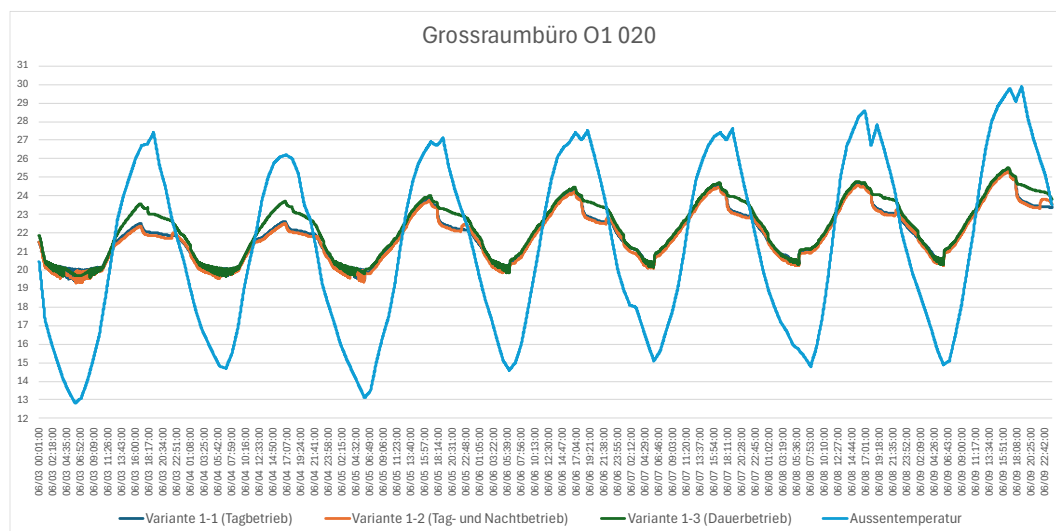


Abbildung 24. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für das Grossraumbüro O1 020 bei kühlen Aussentemperaturen (hellblau) betrachtet über drei Varianten. Variante 1-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 1-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 1-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb.

Bei der Raumgruppe 002 (Druckerraum) ist die grösste Differenz feststellbar. Dies ist in der Abbildung 25 zu sehen. Wenn die Lüftungsanlage nachts (23:00 – 06:00 Uhr) in Betrieb ist, fallen die Temperaturen tagsüber um rund 0.3°C – 0.4°C tiefer aus. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, dass es sich bei den Druckerräumen der Gruppe 002 um fensterlose Räume handelt, welche lediglich eine mechanische Abluft haben. Die Zuluft erfolgt über die Überströmung von Luft aus benachbarten Räumen. Das Abziehen der Luft aus dem Raum lässt somit kühlere Luft aus den benachbarten Räumen mit Öffnungen zur Nachtauskühlung überströmen. Jedoch fällt auch hier der Kühleffekt eher spärlich aus. An dieser Stelle wichtig zu betonen ist, dass es keine geschossweisen Unterschiede gibt. Das heisst die Abweichungen bewegen sich über alle Geschosse im gleichen Rahmen. Dabei steigt die Temperatur geschossweise um ca. 0.2°C an, sodass zwischen dem 01.OG und dem 05.OG eine Differenz von ca. 1°C feststellbar ist.

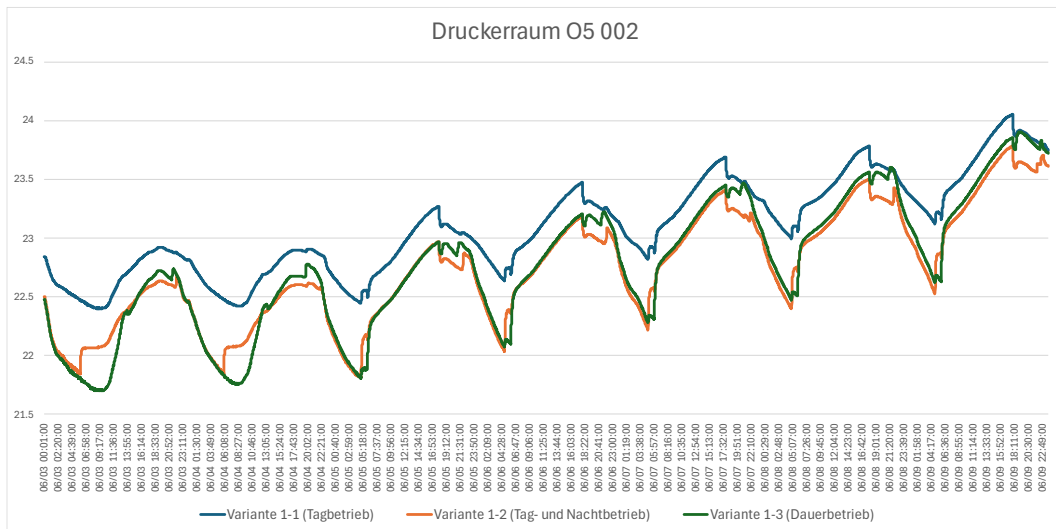


Abbildung 25. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für den Druckerraum O1 002 betrachtet über drei Varianten. Variante 1-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 1-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 1-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb

6.5.2 Tropennächte (19.-25.08.2023)

Im zweiten Betrachtungszeitraum fällt die Temperatur nachts nie unter 20 °C. Das heisst die Aus-sentemperatur bleibt immer über dem Zielwert der operativen Raumtemperatur von 19 °C welcher durch die Nachtauskühlung angestrebt wird. In Abbildung 26 wird dabei ersichtlich, dass der Einfluss der mechanischen Lüftungsanlage, wenn sie auch nachts bzw. 24/7 läuft, ausschliesslich negativ ist. Bei der Variante, bei der die Lüftungsanlage ohne Unterbruch läuft, sind etwa 1.5 °C höher, als wenn die Lüftung nur zu den Betriebszeiten tagsüber läuft. Am Wochenende, wenn grundsätzlich gar keine Lüftung läuft, ist die Raumtemperatur sogar etwa 4° höher. Bei der Variante, bei der die Lüftungsanlage nur zwischen 23:00 – 06:00 Uhr läuft, ist die Differenz etwas weniger markant, aber trotzdem noch zwischen 0.5 °C und 1.5 °C höher, als wenn nachts keine Lüftung läuft.

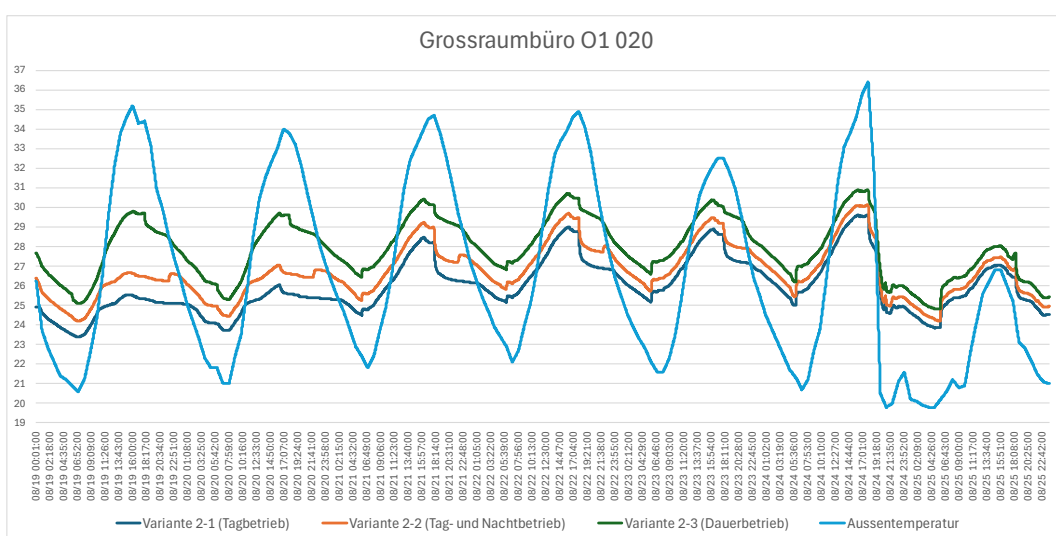


Abbildung 26. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für das Grossraumbüro O1 020 bei Tropennächten (hellblau) betrachtet über drei Varianten. Variante 2-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 2-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 2-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb

6.5.3 Referenzzeitraum (13.-19.07.2023)

Im dritten Betrachtungszeitraum liegt die Aussentemperatur nachts immer zwischen 15°C und 20°C und somit genau zwischen den beiden anderen betrachteten Zeiträumen. In der Abbildung 27 ist zu sehen, dass zwischen den Varianten kein Unterschied feststellbar ist. Einzig am Wochenende (15./16.07.2023) ist in der Variante mit dauerhaft eingeschalteter Lüftungsanlage eine höhere Raumtemperatur feststellbar. Ansonsten fallen die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Varianten um weniger als einen Zehntel aus. Auch zwischen den einzelnen Stockwerken ist kein Unterschied feststellbar.

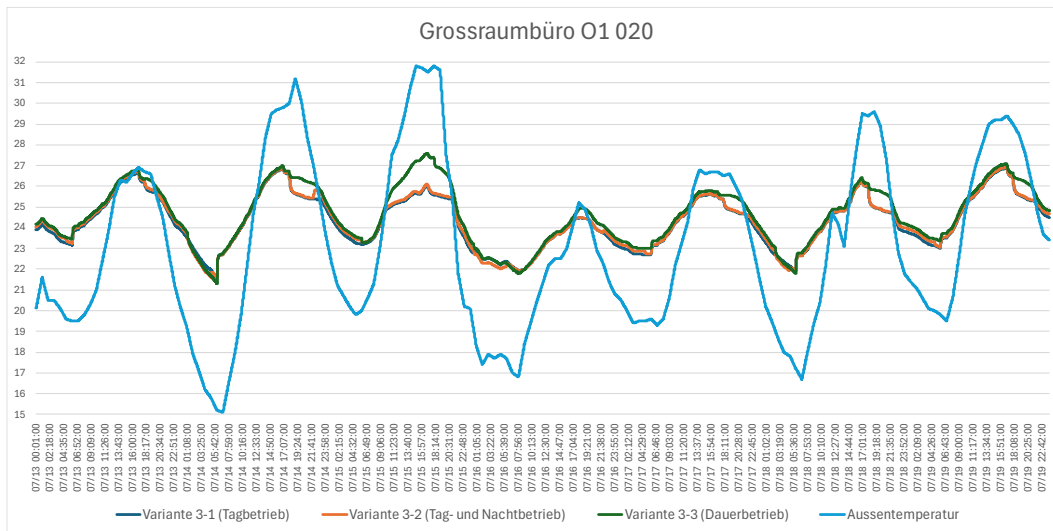


Abbildung 27. Entwicklung der operativen Raumtemperatur für das Grossraumbüro O1 020 während dem Referenzzeitraum betrachtet über drei Varianten. Variante 3-1 (dunkelblau) reguläre Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tagbetrieb; Variante 3-2 (orange) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb; Variante 3-3 (grün) Nachtauskühlung und Lüftungsanlage im Dauerbetrieb

6.5.4 Quantifizierte Ergebnisse

Neben den Temperaturdiagrammen, welche die operative Raumtemperatur der verschiedenen Varianten vergleicht, wurde auch die quantifizierte Auswertung gemäss der beschriebenen Variante durchgeführt. Dabei wird die Raumgruppe «Grossraumbüro» detaillierter ausgewertet, da sich hier die Personen ganztägig aufhalten und am meisten Zeit hier verbringen. Die weiteren Räume sind im Zusammenhang mit der Nachtauskühlung von untergeordnetem Interesse und werden daher weniger stark gewichtet. Für die Raumgruppe «Grossraumbüro» werden die Ergebnisse in Form der berechneten Kennzahlen in der xx gezeigt. Die Ergebnisse der weiteren Raumgruppen werden nachstehend beschrieben. Die Kennzahlen dazu sind in den Tabellen 23 - 27 im Anhang 6: «Auswertung der Simulationen» einsehbar.

Zusammenfassung Grossraumbüro

Die Kennzahlen für die Raumgruppe «Grossraumbüro» sind in der Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 zu finden.

- Für die Periode der **kalten Nächte** ist im *Tag- und Nachtbetrieb* zwar durchgehend ein positiver Effekt feststellbar. Die Temperaturunterschiede sind jedoch durchgehend vernachlässigbar, bis auf das Sitzungszimmer O6 024, wo ein kleiner Unterschied feststellbar ist. Im *Dauerbetrieb* hingegen ist der Effekt für das 01.-06.OG negativ, der

Temperaturunterschied jedoch vernachlässigbar klein. Nur die obersten beiden Geschosse mit Sitzungszimmer und Cafeteria weisen einen kleinen bzw. vernachlässigbaren Temperaturunterschied auf. Der Einfluss der verschlossenen Klappen zum Treppenhaus und der geschlossenen Oblichter auf die Temperaturdifferenz ist ebenfalls über alle Stockwerke klein und grösstenteils auch vernachlässigbar und hauptsächlich negativ. Dies gilt ebenso für die Dämmung der Zu- und Abluftkanäle. Diese Massnahme hat nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die festgestellte Temperaturdifferenz.

- In der Periode der **Tropennächte** ist über alle Stockwerke durchgehen nur ein negativer Effekt festzustellen. Dies sowohl für den *Tag- und Nachtbetrieb* (kleiner Unterschied) wie auch den *Dauerbetrieb* (spürbarer Unterschied). Somit haben beide Varianten zur Folge, dass die Temperaturen in den Räumen höher ausfallen als bei der regulären Nachtauskühlung. Der Einfluss der verschlossenen Klappen zum Treppenhaus und der geschlossenen Oblichter auf die Temperaturdifferenz mehrheitlich über alle Stockwerke klein oder gar vernachlässigbar. Dies gilt ebenso für die Dämmung der Zu- und Abluftkanäle. Diese Massnahme hat nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die festgestellte Temperaturdifferenz.
- Während den **neutralen Nächten** sind die Effekte weniger deutlich. Der positive Effekt während dem Tag- und Nachtbetrieb ist in den oberen Etagen stärker als in den unteren. Dasselbe gilt auch für den *Dauerbetrieb*. Jedoch ist der Temperaturunterschied in allen Räumen gesehen vernachlässigbar.

Tabelle 12. Kennzahlen für die einzelnen Zonen der Raumgruppe «Grossraumbüro» zu allen drei Zeiträumen für die Varianten mit der Lüftungsanlage im Tag- und Nachtbetrieb (x-2) und im Dauerbetrieb (x-3)

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				19.-25.08.2023 (Tropennächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				2-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	1-2 «Nacht»		1-3 «Dauer-Ein»		2-2 «Nacht»		2-3 «Dauer-Ein»		3-2 «Nacht»		3-3 «Dauer-Ein»	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 020	16.76	2.57	0.91	52.38	0	125.82	0	322.22	2.67	11.36	1.5	53.38
O2 020	19.24	1.84	1.35	51.48	0	135.99	0	340.41	5	6.93	2.65	44.58
O3 020	24.45	1.34	3.30	45.92	0	151.95	0	370.59	8.71	3.57	5.28	34.97
O4 020	31.68	0.22	10.95	25.74	0	153.68	0	356.24	15.76	0.72	10.13	19.48
O5 020	38.7	0.06	23.54	14.78	0	161.46	0	353.13	18.69	0.42	13.24	15.37
O6 020	39.34	0.02	31.41	1.60	0	188.37	0	373.38	12.53	2.64	11.03	10.2
O6 024	135.78	0	126.32	5.67	0	163.99	0	374.83	71.73	0.09	74.95	18.01
07 020	65.52	0	63.86	8.65	0	131.17	0	306.2	32.99	0.64	38.36	12.26

Die Auswertung der Varianten mit geschlossenen Klappen zum Treppenhaus und geschlossenen Oblichtern sowie gedämmten Zu- und Abluftkanälen in der Tabelle 13 und Tabelle 14 nur die die *Kalten Nächte* und die *Tropennächte* gemacht. Auf eine Darstellung des *Referenzzeitraums* wurde aufgrund der zu geringen Aussage kraft verzichtet. Im Referenzzeitraum haben alle Varianten nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf den zusätzlichen Effekt der Freien Kühlung zur Verbesserung der Nachtauskühlung.

Tabelle 13. Kennzahlen für die Periode der Kalten Nächte für die einzelnen Zonen der Raumgruppe «Grossraumbüro» zu den Varianten mit geschlossenen Klappen und gedämmten Kanälen

03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)												
	1-1 zu 4-1		1-1 zu 4-2		1-1 zu 4-3		1-1 zu 4-4		1-1 zu 4-5		1-1 zu 4-6	
Lüftung	Tagbetrieb		Tag- und Nachtbetrieb		Tagbetrieb		Tag- und Nachtbetrieb		Tagbetrieb		Tag- und Nachtbetrieb	
Randbe- dingung	Klappe TH: geschlossen Oblicht: offen		Klappe TH: geschlossen Oblicht: offen		Klappe TH: geschlossen Oblicht: geschlossen		Klappe TH: geschlossen Oblicht: geschlossen		gedämmte Kanäle		gedämmte Kanäle	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 020	0	39.46	-	-	0	51.66	0.07	35.28	0.63	0.14	14.28	2.96
O2 020	0	26.96	-	-	0.1	21.92	1.7	10.72	0.61	0.19	17.40	2.11
O3 020	1.14	7.59	-	-	6.26	1.85	20.07	2.22	0.66	0.04	23.16	1.49
O4 020	11.87	1.66	-	-	14.24	0.53	32.97	0.51	0.90	0.12	30.42	0.32
O5 020	32.08	0.24	-	-	25.65	0.17	51.80	0.04	1.08	0.14	38.43	0.11
O6 020	34.65	0.64	-	-	14.55	4.48	42.56	0.65	0.90	0.13	39.87	0.02
O6 024	5.33	8.52	-	-	1.14	28.43	124.18	0.01	2.05	0.37	138.44	0
O7 020	24.57	4.36	-	-	4.92	23.04	57.74	0.91	0.60	0.15	69.71	0

Tabelle 14. Kennzahlen für die Periode der Tropennächte für die einzelnen Zonen der Raumgruppe «Grossraumbüro» zu den Varianten mit geschlossenen Klappen und gedämmten Kanälen

19.-25.08.2023 (Tropennächte)												
	2-1 zu 4-7		2-1 zu 4-8		2-1 zu 4-9		2-1 zu 4-10		2-1 zu 4-11		2-1 zu 4-12	
Lüftung	Tagbetrieb		Tag- und Nachtbetrieb		Tagbetrieb		Tag- und Nachtbetrieb		Tagbetrieb		Tag- und Nachtbetrieb	
Randbe- dingung	Klappe TH: geschlossen Oblicht: offen		Klappe TH: geschlossen Oblicht: offen		Klappe TH: geschlossen Oblicht: geschlossen		Klappe TH: geschlossen Oblicht: geschlossen		gedämmte Kanäle		gedämmte Kanäle	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 020	0	22.07	0	164.55	0	108.35	0	201.05	0.19	0.71	0	126.3
O2 020	0.08	8.73	0	157.14	0	82.41	0	176.29	0.24	0.40	0	136.37
O3 020	4.85	0.04	0	152.67	0	68.95	0	165.46	0.63	0.01	0	151.81
O4 020	13.43	0	0	140.41	0	61.87	0	154.90	0.32	0.86	0	154.01
O5 020	16.69	0	0	138.31	0.06	64.31	0	154.77	0.31	1.20	0	161.92
O6 020	11.79	2.8	0	170.41	0.21	101.1	0	194.73	0.53	0.64	0	188.18
O6 024	6.99	4.09	1.66	160.10	0	95.93	0.84	181.60	0.9	2.17	0.33	164.45
O7 020	9.24	9.97	1	124.62	0.16	98.59	0.33	147.25	1.37	0.06	0	130.27

Zusammenfassung Sitzungszimmer

- Für die Periode der **kalten Nächten** sind die Ergebnisse für im *Tag- und Nachtbetrieb* un- ausgeglichen variierend, jedoch allesamt vernachlässigbar tief. Hingegen sind die Werte für den *Dauerbetrieb* alle negativ. In den unteren Etagen sind die Temperaturunterschiede klein und reduzieren sich in den oberen Stockwerken auf ein vernachlässigbares Niveau.
- In der Periode der **Tropennächten** ist über alle Stockwerke durchgehen nur ein negativer Effekt festzustellen. Dies sowohl für den *Tag- und Nachtbetrieb* (kleiner Unterschied) wie auch den *Dauerbetrieb* (spürbarer Unterschied). Somit haben beide Varianten zur Folge, dass die Temperaturen in den Räumen höher ausfallen als bei der regulären Nachtauskühlung.
- Während den **neutralen Nächten** sind die Effekte ähnlich wie während den Tropennächten deutlich. Der negative Effekt ist durchgehend feststellbar, sowohl im *Tag- und Nachtbetrieb* (vernachlässigbar) wie auch im *Dauerbetrieb* (klein).

Zusammenfassung Archiv

- Für die Periode der **kalten Nächten** sind die Ergebnisse für den *Tag- und Nachtbetrieb* variierend aber bis auf die unterste Etage positiv. Die Temperaturdifferenzen sind jedoch allesamt vernachlässigbar tief. Hingegen sind die Werte für den *Dauerbetrieb* alle negativ. In der untersten Etage ist der Temperaturunterschied klein und reduziert sich in den oberen Stockwerken auf ein vernachlässigbares Niveau.
- In der Periode der **Tropennächten** ist über alle Stockwerke durchgehen nur ein negativer Effekt festzustellen. Dies sowohl für den *Tag- und Nachtbetrieb* (kleiner Unterschied) wie auch den *Dauerbetrieb* (spürbarer Unterschied). Beide Varianten haben zur Folge, dass die Temperaturen in den Räumen höher ausfallen als bei der regulären Nachtauskühlung.
- Während den **neutralen Nächten** sind die Effekte ähnlich wie während den Tropennächten deutlich. Der negative Effekt ist sowohl im *Tag- und Nachtbetrieb* (vernachlässigbar) wie auch im *Dauerbetrieb* (klein bis vernachlässigbar) durchgehend feststellbar.

Zusammenfassung Druckerraum

- Für die Periode der **kalten Nächten** ist im *Tag- und Nachtbetrieb* zwar durchgehend ein positiver Effekt feststellbar. Im *Dauerbetrieb* hingegen ist der Effekt durchgehend negativ. Jedoch ist auch hier der Temperaturunterschied vernachlässigbar klein. Nur die obersten beiden Geschosse mit Sitzungszimmer und Cafeteria weisen einen kleinen bzw. vernachlässigbaren Temperaturunterschied auf.
- In der Periode der **Tropennächten** ist über alle Stockwerke durchgehen nur ein negativer Effekt festzustellen. Dies sowohl für den *Tag- und Nachtbetrieb* (kleiner Unterschied) wie auch den *Dauerbetrieb* (spürbarer Unterschied). Beide Varianten haben zur Folge, dass die Temperaturen in den Räumen höher ausfallen als bei der regulären Nachtauskühlung.
- Während den **neutralen Nächten** sind die Effekte weniger deutlich als bei den kalten Nächten. Der positive Effekt während dem *Tag- und Nachtbetrieb* ist aber durchgehend positiv. Die gewonnenen Temperaturdifferenzen gegenüber der regulären Nachtauskühlung sind vernachlässigbar und nur halb so gross wie in den kalten Nächten. Im

Dauerbetrieb variieren die Effekte nach Stockwerken. Die Temperaturdifferenzen liegen aber im vernachlässigbaren Bereich.

Zusammenfassung Druckerraum

- Für die Periode der **kalten Nächte** ist im *Tag- und Nachtbetrieb* durchgehend ein positiver Effekt feststellbar. Der Effekt ist vernachlässigbar bis auf den Lagerraum im 07. OG wo er dennoch nur klein ist. Auch *Dauerbetrieb* ist der Effekt durchgehend positiv und sogar etwas stärker als beim Tag- und Nachtbetrieb. Doch der Temperaturunterschied ist vernachlässigbar klein, bis auf den Lagerraum im 07. OG. Temperaturunterschied auf.
- In der Periode der **Tropennächte** ist über alle Stockwerke durchgehen nur ein negativer Effekt festzustellen. Dies sowohl für den *Tag- und Nachtbetrieb* (kleiner Unterschied) wie auch den *Dauerbetrieb* (spürbarer Unterschied). Beide Varianten haben zur Folge, dass die Temperaturen in den Räumen höher ausfallen als bei der regulären Nachtauskühlung.
- Während den **neutralen Nächten** sind die Effekte während dem *Tag- und Nachtbetrieb* ist aber mehrheitlich negativ, wenn auch nur vernachlässigbar. Nur der Lagerraum im 07. OG weist eine tiefere Temperatur auf. Im *Dauerbetrieb* sind die Effekte identisch, lediglich etwas stärker akzentuiert.

Zusammenfassung Erdgeschoss

- Für die Periode der **kalten Nächte** ist im *Tag- und Nachtbetrieb* durchgehend ein positiver Effekt feststellbar. Der Temperaturunterschied für das Sitzungszimmer E0 006 ist klein, für die anderen beiden betrachteten Räume vernachlässigbar. Im *Dauerbetrieb* ist der Effekt identisch.
- In der Periode der **Tropennächte** ist über alle Stockwerke durchgehen nur ein negativer Effekt festzustellen. Dies sowohl für den *Tag- und Nachtbetrieb* (kleiner Unterschied) wie auch den *Dauerbetrieb* (spürbarer Unterschied). Beide Varianten haben zur Folge, dass die Temperaturen in den Räumen höher ausfallen als bei der regulären Nachtauskühlung.
- Während den **neutralen Nächten** sind die Effekte während dem *Tag- und Nachtbetrieb* ist aber mehrheitlich negativ, wenn auch nur vernachlässigbar. Nur der das Sitzungszimmer E0 006 weist eine tiefere Temperatur auf. Im *Dauerbetrieb* sind die Effekte identisch, lediglich etwas stärker akzentuiert.

6.5.5 Differenzierte Betrachtung Tag- und Nachttemperaturen

In der bisherigen Auswertung wurde kein Unterschied gemacht zwischen Tag und Nacht. Effektiv ist es aber so, dass hauptsächlich der Effekt tagsüber zählt, dann wenn die Personen sich im Büro aufhalten. Um ausschliessen zu können, dass die bisherigen Werte von einem starken positiven Effekt nachts ausgehen. Daher wird die quantifizierte Auswertung für die *kühle Periode* und den *Referenzzeitraum*, in welchen positive Ergebnisse erzielt wurden, für die Zeitfenster tagsüber von 07:00 – 19:00 durchgeführt. Dabei steht die Raumgruppe der Grossraumbüros im Fokus der Betrachtung und die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 15. Aufgrund des fehlenden positiven Effekts wird auf eine weitere Betrachtung der Zeitperiode mit den *Tropennächten* verzichtet.

Tabelle 15. Quantifizierte Auswertung der Periode der kalten sowie der neutralen Nächte für den Zeitraum Tagsüber (von 07:00 – 19:00) im Vergleich mit den ganztägigen Werten.

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	Ganztags		Tagsüber (07:00 – 19:00)		Ganztags		Tagsüber (07:00 – 19:00)	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 020	16.76	2.57	8.29	0.08	2.67	11.36	0.05	3.00
O2 020	19.24	1.84	9.11	0.05	5	6.93	1.08	1.5
O3 020	24.45	1.34	11.57	0.03	8.71	3.57	3.06	0.48
O4 020	31.68	0.22	13.89	0.01	15.76	0.72	5.93	0
O5 020	38.7	0.06	17.42	0.01	18.69	0.42	7.75	0
O6 020	39.34	0.02	18.44	0	12.53	2.64	5.17	0.22
O6 024	135.78	0	51.11	0	71.73	0.09	24.42	0
O7 020	65.52	0	27.97	0	32.99	0.64	15.82	0

Damit zeichnet sich ab, dass in der kalten Periode der positive Effekt tagsüber nahezu identisch ist wie während der Nacht. Das heisst die nachts gewonnene Abkühlung kann auch in den Tag mitgenommen werden. In der Periode der neutralen Nächte ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt. Hier kühlen die Räume nachts aus, doch tagsüber steigen die Temperaturen stärker an, sodass der positive Effekt geringer ist. Insgesamt muss aber festgehalten werden, dass die Temperaturunterschiede sich im vernachlässigbaren Rahmen bewegen.

6.5.6 Fazit der Simulationsergebnisse

Die Grafische und die quantifizierte Auswertung der verschiedenen Simulationsvarianten zeigen auf, dass der Einfluss der Nutzung der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung gering oder gar kontraproduktiv ist. Nur in wenigen Anwendungsfällen fällt die Raumtemperatur tagsüber tiefer aus und bringt so den gewünschten Effekt. Doch die Temperaturunterschiede sind mehrheitlich vernachlässigbar oder klein. Dagegen ist der negative Effekt in Form von höheren Temperaturen gerade in der Periode der *Tropennächten* öfters spürbar, was sich auf die Behaglichkeit der Gebäudenutzenden auswirkt. Auf eine nähere Auswertung des Effekts in Form der Berechnung eines Gewinns wird aufgrund des geringen Einflusses verzichtet.

Ein weiterer limitierender Faktor zeigt sich in den Simulationszeiten für einzelne Varianten. Diese liegen je nach Variante zwischen 1.5 und 26 Stunden was sehr lang ist. Die Tabelle 28 im Anhang 6: «Auswertung der Simulationen» zeigt, dass die Varianten, welche nicht der Norm entsprechen (*Tag- und Nachbetrieb* und *Dauerbetrieb* der Lüftung) im Vergleich mit den Standardvarianten eine um ein vielfach höhere Simulationsdauer aufweisen. Die Varianten, welche den täglichen, regulären Betrieb simulieren sind mit 1.5 – 2 Stunden jedoch in einem Rahmen, der sich gut handhaben lässt und auch dazu genutzt werden kann um tägliches Optimierungspotenzial zu ermitteln.

7 Optimieren der bestehenden Nachtauskühlung

Der Einfluss der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung im Gebäude «AUE BS» fällt sehr gering aus und auch nur in kühlen Perioden. Eine Nutzung der mechanischen Lüftung zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit steht somit nicht mehr im Fokus dieser Arbeit. Die entsprechende Fragestellung wird nicht mehr weiterbearbeitet. Stattdessen wird ein Augenmerk daraufgelegt, die bestehende Form der Nachtauskühlung so zu optimieren, dass sie aus betrieblicher Sichtweise möglichst effektiv und effizient betrieben werden kann.

7.1 Möglichkeiten zur Optimierung der Nachtauskühlung

Die Nachtauskühlung im Gebäude «AUE BS» basiert auf einer mehrstufigen Regelung mit verschiedenen Abhängigkeiten und ist im Dokument «Programmablauf Nachtauskühlung» festgehalten [58]. Die Bedingungen für den Betrieb lassen sich grob in die unbeeinflussbaren Faktoren (Regen, Wind, Brandalarm) und die beeinflussbaren Faktoren (Zeitschaltprogramm, Ziel-Temperatur im Innenraum, Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussenbereich) unterscheiden. Es soll daher untersucht werden, ob sich bei den verbleibenden beeinflussbaren Faktoren Anpassungen vornehmen lassen, welche den Effekt der Nachtauskühlung zusätzlich positiv verstärken können. Der Programmablauf mit allen Kriterien ist im Anhang 7: Programmablauf Nachtauskühlung hinterlegt.

7.1.1 Anpassen der zeitlichen Verfügbarkeit der NAK

In der aktuellen Einstellung des Gebäudeautomationssystems ist die Nachtauskühlung zeitlich Wochentags zwischen 19:30 und 08:00 Uhr und am Wochenende ganztags (24h) verfügbar. Das bedeutet aber nicht, dass sie dann auch aktiv ist. Das Öffnen der Aussenklappen hängt wie beschrieben auch vom Zutreffen aller Faktoren ab. Durch das Aktivieren der Nachtauskühlung werden Aussenklappen, Klappen zum Treppenhaus und Oblichter im Treppenhaus geöffnet. Dadurch stellt sich ein Luftzug ein, der sogenannte Kamineffekt. Für Mitarbeitende an einem Büroarbeitsplatz sind Zugerscheinungen in Form von Luftzügen unangenehm und daher nicht erwünscht. Die Zeiten, in denen die Nachtauskühlung aktiv sein soll, ist daher auf Zeiten festzulegen, in denen sich keine Personen in den Büroräumen aufhalten. Diese Zeiten sind bereits ausgeschöpft und eine Ausdehnung der zeitlichen Verfügbarkeit ist daher nicht sinnvoll und wird verworfen.

7.1.2 Senken der unteren Zieltemperatur

Im Rahmen des VP2 wurde festgestellt, dass sowohl im realen Objekt als auch in der Simulation ein oszillierendes Verhalten beim Öffnungszustand der Aussenklappen vorliegt. Dies liegt an den Temperaturvorgaben für die Nachtauskühlung. Die ursprüngliche Zieltemperatur, welche erreicht werden soll, lag bei 21 °C. Das heisst, die Regeltechnik war so programmiert, dass wenn die Raumtemperatur unter 21 °C fiel, die Aussenklappen automatisch schlossen. In der Folge stiegen die Raumtemperaturen aufgrund der in der Gebäudemasse gespeicherten Wärme wieder an und die Aussenklappen öffneten sich. Während einer Nacht wiederholt sich dieser Vorgang mehrere Male. In Abbildung 28 ist dies am Beispiel des Raum O7 020 (Cafeteria) ersichtlich. Bei den gezeigten Werten handelt es sich um aufgezeichnete Werte des Gebäudeleitsystem im realen Gebäude für die Nacht vom 07.08.2023.

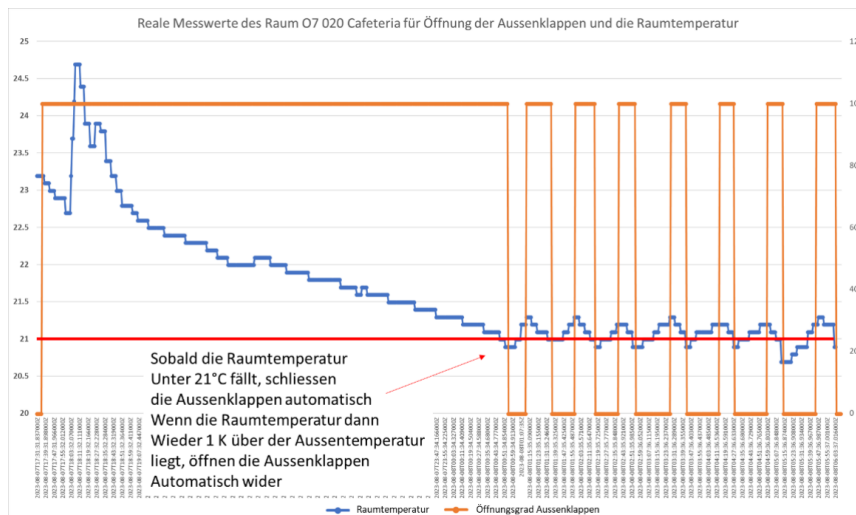


Abbildung 28. Darstellung des oszillierenden Verhaltens der Aussenklappen, wenn die gemessene Raumtemperatur in °C in der Cafeteria 07 020 in der Nacht vom 07.08.2023 unter 21°C fällt. Der Anstieg der Raumtemperatur zu Beginn ist auf den Umstand der Sonneneinstrahlung auf den Sensor zurückzuführen.

Einerseits wird durch dieses Öffnen und Schliessen mögliches Auskühlungspotenzial nicht vollumfänglich genutzt. Andererseits führt dies auch zu einer verstärkten Abnutzung der mechanischen Komponenten an den Aussenklappen, wenn diese übermässig oft geöffnet und geschlossen werden. Der untere Zielwert wurde im Herbst 2023 bereits einmal nach unten korrigiert und liegt nun bei 19°C. Das bedeutet, im aktuellen Programmablauf ist als unterer Zielwert für die Raumtemperatur ein Wert von 19°C festgelegt. Doch bei den Simulationsthroughgängen in den Perioden mit kühlen Nächten konnte festgestellt werden, dass das oszillierende Verhalten der Aussenklappen weiterhin bestehen bleibt und dass sich die operative Raumtemperatur dadurch sprunghaft verhält. Der Umstand, dass die Raumtemperaturen nach dem Schliessen der Aussenklappen aufgrund der im Gebäude gespeicherten Wärme wieder sprunghaft ansteigen, führen zur Überlegung, die untere Zieltemperatur für die Nachtauskühlung weiter zu senken. Das heisst die Nachtauskühlung soll nicht gestoppt werden, wenn die Raumtemperatur unter 19°C fällt, sondern sie soll tiefere Werte erreichen können. Gleichzeitig soll aber die Behaglichkeit für die Gebäudenutzenden nicht massgeblich verschlechtert werden. Das heisst bei Arbeitsbeginn am Morgen sollen die Mitarbeitenden sich nicht in einem unterkühlten Büro vorfinden. Stattdessen soll untersucht werden, wie die Regelung dahingehend angepasst werden kann, dass beide Ziele erreicht werden können. Sowohl kühlere Räume tagsüber aber keine unterkühlten Räume bei Arbeitsbeginn. Dazu sollen verschiedenen Simulationsszenarien, während der bereits verwendeten Zeitfenster durchgeführt werden.

7.2 Optimierungsvarianten der Nachtauskühlung

Die Tabelle 16 zeigt die Varianten, welche zur Optimierung der Nachtauskühlung geprüft werden. Dazu gehört sowohl die Anpassung der Zieltemperatur der Nachtauskühlung sowie auch die Verfügbarkeit der Nachtauskühlung, das heisst bis wann die Klappen am Morgen geöffnet sein dürfen. Dies, um zu untersuchen, ob es möglich ist, dass die Zieltemperatur tiefer sein kann, dafür aber die Klappen am Morgen etwas früher zu schliessen, um bei Arbeitsbeginn trotzdem keine unterkühlten Räume zu haben.

Tabelle 16. Varianten zur Vorgabe der unteren Zieltemperatur sowie der zeitlichen Verfügbarkeit am Morgen.

Variante	Zeitraum (Runperiod)	Betriebsart Lüftung	Zieltemperatur Nachtauskühlung [°C]	Zeitliche Verfügbarkeit der Nachtauskühlung
6-1 \triangleq 2-1	19. -25.08.2023 (warm)	Tagbetrieb	19	19:30 – 08:00
6-2			18	
6-3			17	
6-4			16	
6-5 \triangleq 1-1	03. – 09.06.2023 (kühl)		19	
6-6			18	
6-7			17	
6-8			16	
6-13			16	19:30 – 06:30
6-14			16	19:30 – 06:00
6-15			16	19:30 – 05:00

7.3 Auswertung der Optimierungsvarianten

Nachstehend werden die Simulationsergebnisse der verschiedenen Varianten ausgewertet und verglichen. Die Varianten mit den zeitlichen Anpassungen werden separat ausgewertet, da eine nähere Betrachtung in den morgendlichen Stunden erforderlich ist.

7.3.1 Senken der Zieltemperatur ohne zeitliche Anpassung

Es wurde wiederum sowohl die Zeitperiode mit den warmen Nächten (19.-25.08.2023; Varianten 6-1 bis 6-4) als auch die mit den kühlen Nächten (03.-09.06.2023; Varianten 6-5 bis 6-8) betrachtet. Zur Anwendung kamen vier Varianten, bei denen die Zieltemperatur um jeweils 1°C von zunächst 19°C (aktuell im Gebäudeleitsystem eingestellter Wert) auf 18°C, 17°C und 16°C gesenkt wird. Die Abbildung 29 zeigt den Vergleich der verschiedenen Varianten für die warme Periode vom 19.-25.08.2023

Tropennächte

Die Abbildung 29 zeigt die Temperaturverläufe der Varianten mit den verschiedenen Zieltemperaturen der Nachtauskühlung für die Periode der *Tropennächte*.

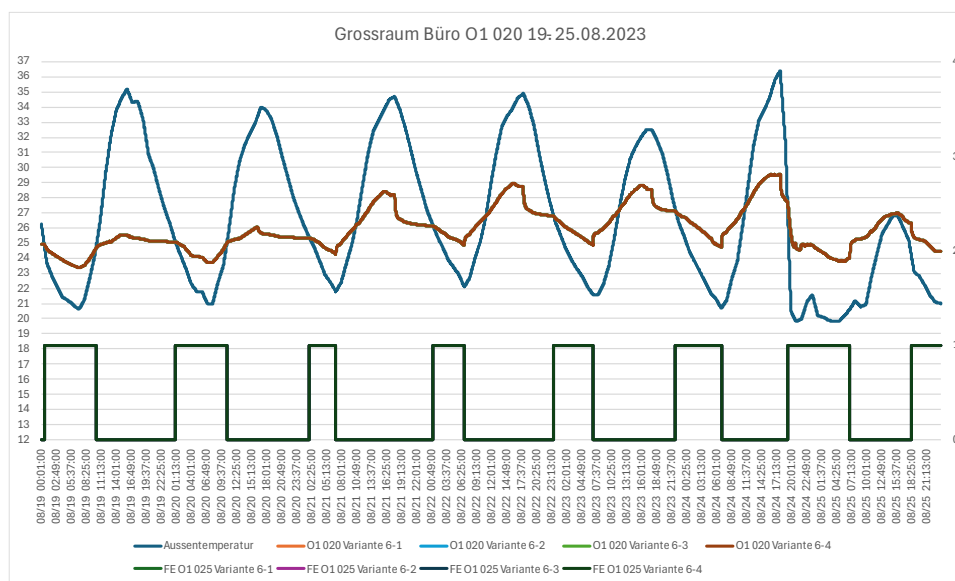


Abbildung 29. Temperaturverläufe und Öffnungszustände der Aussenklappen für das Grossraumbüro O1 020 für die Periode vom 19. - 25.08.2023. Die Öffnungszustände der Aussenklappen sind bezeichnet mit «FE».

Es kann festgestellt werden, dass es keinerlei Unterschied gibt zwischen den einzelnen Varianten. Die Öffnungszeiten der Aussenklappen (gezeigt am Beispiel der Klappe FE O1 025) sind für alle Varianten identisch. Übereinstimmend sind somit auch die operativen Raumtemperaturen exakt gleich. Dies ist logisch, da aufgrund der Aussentemperatur, welche nie unter 20 °C sinkt, die Raumtemperatur auch nicht unter 19°C fallen kann. Die Simulation läuft also korrekt ab und es wird keine quantifizierte Auswertung für diese Varianten gemacht.

Kalte Nächte

Die Abbildung 30 zeigt die Temperaturverläufe der Varianten mit den verschiedenen Zieltemperaturen der Nachtauskühlung für die Periode der *kalten Nächte*.

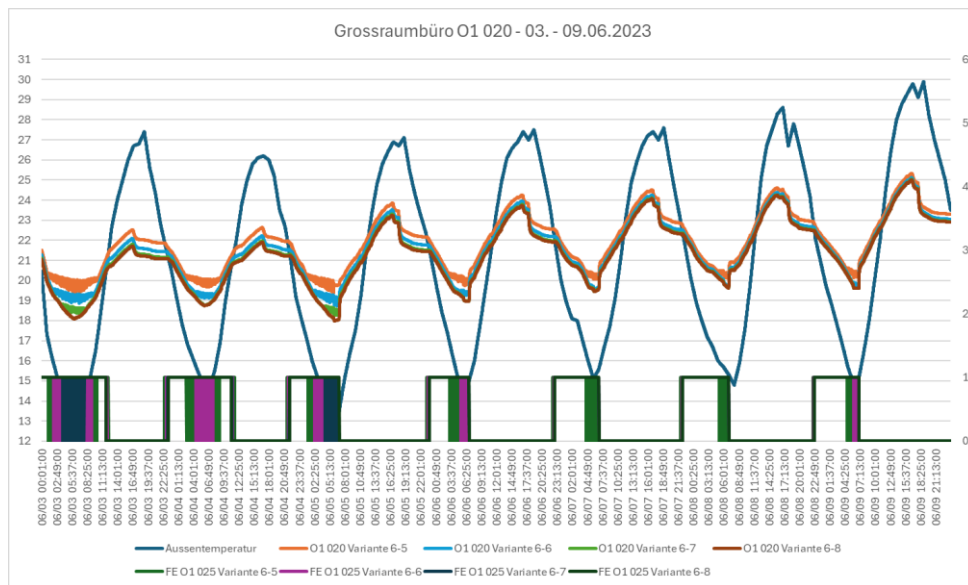


Abbildung 30. Temperaturverläufe und Öffnungszustände der Aussenklappen für das Grossraumbüro O1 020 für die Periode vom 03.-09.06.2023. Die Öffnungszustände der Aussenklappen sind bezeichnet mit «FE».

Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten (d.h. unterschiedlichen Zieltemperaturen bei der Nachtauskühlung) sind feststellbar. Die Variante 6-8, mit Zieltemperatur 16 °C erreicht von allen die tiefsten operativen Raumtemperaturen, wie dies auch zu erwarten war. Auffällig ist zudem auch hier das oszillierende Verhalten der Aussenklappen, welches je nach Variante unterschiedlich stark ist. Während einer Periode von *kalten Nächten* zeigt sich, dass die Nachtauskühlung aber optimiert werden kann und das Potenzial zum Senken der Raumtemperaturen noch mehr ausgeschöpft werden kann, wenn die untere Zieltemperatur angepasst wird.

Abbildung 31 zeigt den detaillierten Vergleich der Temperaturen am Morgen. Dabei wird festgestellt, dass bei der Variante 6-8 (Zieltemperatur 16 °C) die Raumtemperatur erst um ca. 09:15 Uhr wieder einen behaglichen Wert von 19.5 °C erreicht. Dies kann bei den Gebäudenutzenden dazu führen, dass bei Ankunft im Büro das Raumklima als unbehaglich kühl empfunden wird. In der Folge soll daher untersucht werden, ob mit einer zeitlichen Anpassung der Nachtauskühlung die Behaglichkeit wie auch der positive Effekt eines über den ganzen Tag kühleren Raumes vereint werden kann.

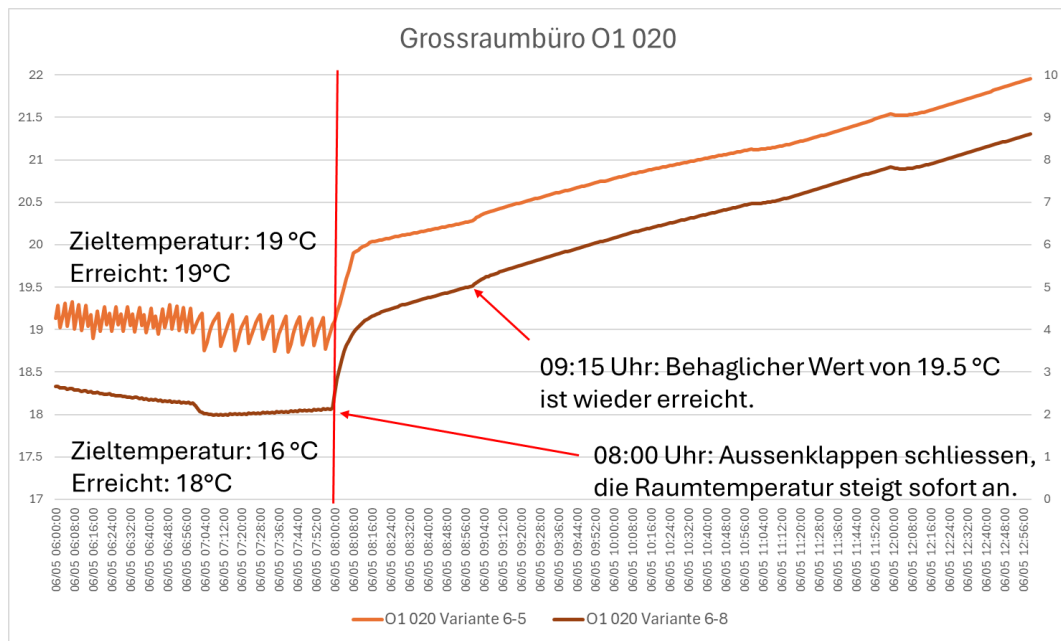


Abbildung 31. Vergleich der Variante 6-5 (Zieltemperatur 19 °C) und der Variante 6-8 (Zieltemperatur 16 °C).

7.3.2 Senken der Zieltemperatur mit zeitlicher Anpassung

In den Varianten 6-13, 6-14 und 6-15 wurden zeitliche Anpassungen vorgenommen, um den Effekt zu untersuchen, wenn die Aussenklappen früher, also um 05:00, 06:00 oder 06:30 Uhr geschlossen werden. Die Effekte sind in der Abbildung 32 ersichtlich.

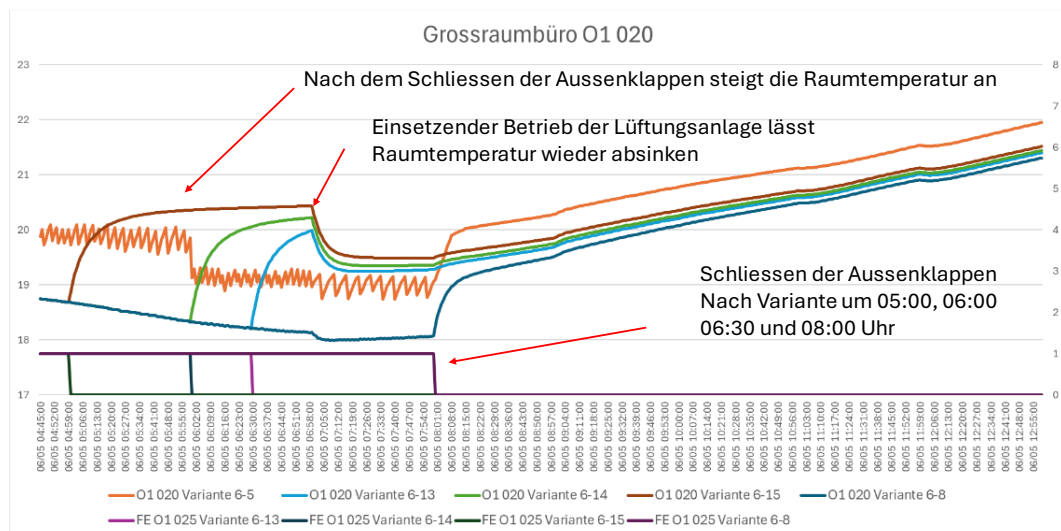


Abbildung 32. Effekte auf die Raumtemperaturen bei unterschiedlichen Zeitvorgaben für die Schliessung der Aussenklappen am Morgen. Insbesondere der Effekt der Lüftungsanlage ist feststellbar.

Der positive Effekt in Form von kühleren Temperaturen ist wie erwartet dann am grössten, wenn die Aussenklappen am längsten offen sind und die Zieltemperatur auf 16 °C eingestellt ist. Wenn die Aussenklappen in ihrer zeitlichen Verfügbarkeit beschränkt, und früher geschlossen werden, so sinkt der positive Effekt je früher die Klappen geschlossen werden. Dabei wird eine Besonderheit festgestellt für die Variante bei der die Aussenklappen bereits um 05:00 Uhr geschlossen werden. Dies wird anhand des Beispiels für das Grossraumbüro O5 020 in Abbildung 33 gezeigt. Nachdem schliessen der Klappen steigt die Raumtemperatur direkt an. Wenn um 07:00 Uhr die

Lüftungsanlage eingeschaltet wird und die Aussentemperatur tiefer ist, wird über die Lüftungsanlage kühle Luft ins Gebäude eingeleitet. Dadurch kühlt sich der Raum wieder ab. Dadurch ist auch der negative Effekt feststellbar, der dadurch entsteht, dass die Raumtemperatur zwischen Schliessen der Aussenklappen und Betriebsbeginn der Lüftungsanlage höher ist.

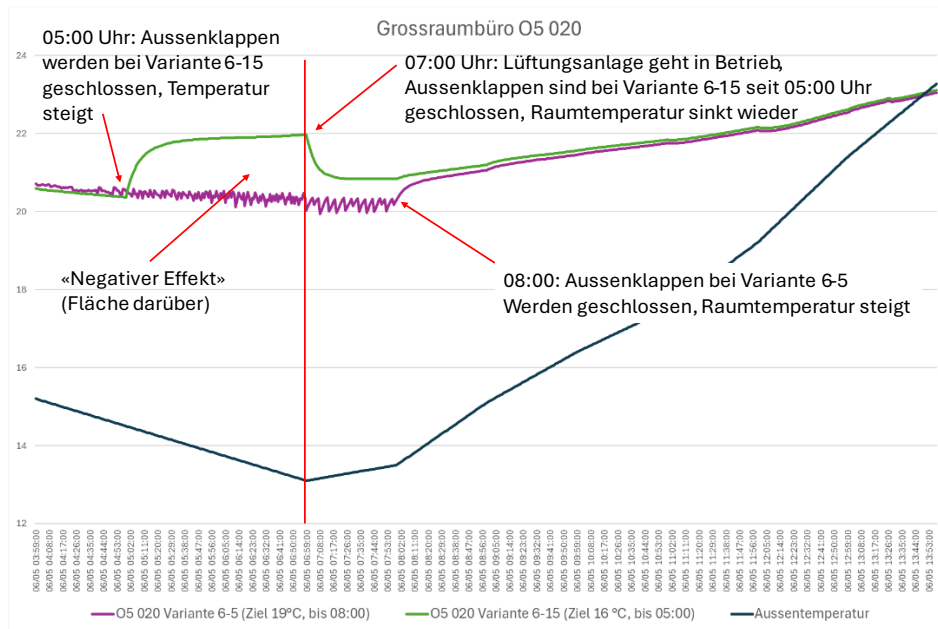


Abbildung 33. Vergleich der Varianten 6-5 und 6-15 welche das Zustandekommen des «negativen Effekts» aufzeigt und gleichzeitig zeigt, dass der Betrieb der Lüftungsanlage ab 07:00 Uhr den Raum wieder abkühlt.

7.3.3 Quantifizierte Ergebnisse

Die quantifizierte Auswertung für die Raumgruppe «Grossraumbüro» über die verschiedenen Optimierungsvarianten ist in Tabelle 17 zu sehen. Auf die Auswertung der weiteren Raumgruppen wird verzichtet, da diese im Konzept der Nachtauskühlung eine weniger wichtige Rolle spielen.

Tabelle 17. Quantifizierte Auswertung der Raumgruppe «Grossraumbüro» für die Optimierungsvarianten.

Raum	6-5 zu 6-6		6-5 zu 6-7		6-5 zu 6-8		6-5 zu 6-13		6-5 zu 6-14		6-5 zu 6-15	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 020	59.24	0.00	92.49	0.00	101.55	0.00	79.32	3.09	17.18	6.51	59.86	17.25
O2 020	52.36	0.00	75.96	0.00	75.68	0.00	56.30	4.08	49.84	8.74	41.55	21.92
O3 020	39.96	0.00	49.03	0.00	45.25	0.00	30.81	6.54	27.26	12.85	23.19	27.89
O4 020	29.61	0.02	31.20	0.03	30.03	0.03	17.43	8.49	15.09	16.30	12.64	33.46
O5 020	19.12	0.04	21.50	0.02	22.96	0.02	11.46	9.76	9.86	18.27	8.74	36.77
O6 020	24.36	0.08	36.34	0.02	40.01	0.01	23.77	6.59	19.70	12.74	15.33	29.37
O6 024	12.05	0.07	17.66	0.02	19.17	0.01	12.20	2.36	9.93	6.73	13.68	237.81
O7 020	28.93	0.00	46.47	0.00	52.10	0.00	40.05	2.95	33.47	7.63	27.15	25.08

Die Kennzahlen zeigen, dass mit jeder Absenkestufe der Zieltemperatur weitere positive Temperaturdifferenzen erzielt werden. Auch wenn diese über den gesamten Zeitraum nur bescheiden sind, ist es so, dass der Gewinn an einzelnen Tagen spürbar ist.

Weiter wurde überprüft, in welchen Räumen um 08:00 Uhr der Wert von 19.5 °C bei der operativen Raumtemperatur unterschritten wird. Dies als weiteres Indiz dafür, ob eine zeitliche Anpassung der Nachtauskühlung notwendig ist, sodass die Aussenklappen vor 08:00 Uhr geschlossen werden. Die Werte für die Variante 6-8 mit der tiefsten Zieltemperatur sind in Tabelle 18 zusehen.

Tabelle 18. Temperaturwerte [°C] für die Grossraumbüros (geschossweise) um 08:00 Uhr pro Tag.

Tag	O1 020	O2 020	O3 020	O4 020	O5 020	O6 020	O6 024	O7 020
03.06.2023	18.4	18.9	19.4	19.8	20.3	20.5	21.0	20.2
04.06.2023	19.1	19.4	20.0	20.4	20.8	21.1	21.4	20.6
05.06.2023	19.5	19.7	20.2	20.5	20.9	21.5	19.9	20.5
06.06.2023	20.1	20.4	20.9	21.1	21.5	22.0	20.4	21.2
07.06.2023	20.7	20.9	21.4	21.6	22.1	22.5	20.9	21.8
08.06.2023	20.5	20.7	21.1	21.3	21.8	22.4	20.4	21.4
09.06.2023	21.0	21.2	21.7	21.9	22.3	22.9	21.1	22.2

Dabei ist ersichtlich, dass nur in den unteren drei Geschossen und auch nur an zwei Tagen die Temperaturwerte auf unter 19.5 °C sinken. Zudem handelt es sich bei diesen Tagen um das Wochenende. Dennoch ist es wichtig darauf bedacht zu sein, dass die Temperatur in den Räumen nicht unter diesen Wert sinken und so Unbehagen bei den Raumnutzenden auslöst. In diesem Fall wäre die reguläre Zieltemperatur von 19°C für diese betroffenen Räume vorteilhafter gewesen.

7.3.4 Erweiterter Betrachtungszeitraum

Im Rahmen der Absenkung der Zieltemperatur wurden auch Simulationen für den Zeitraum von Juni bis August gemacht. Dies, um feststellen zu können, ob eine dauerhafte tiefere Zieltemperatur generell die Raumtemperatur über eine längere Periode positiv beeinflussen kann.

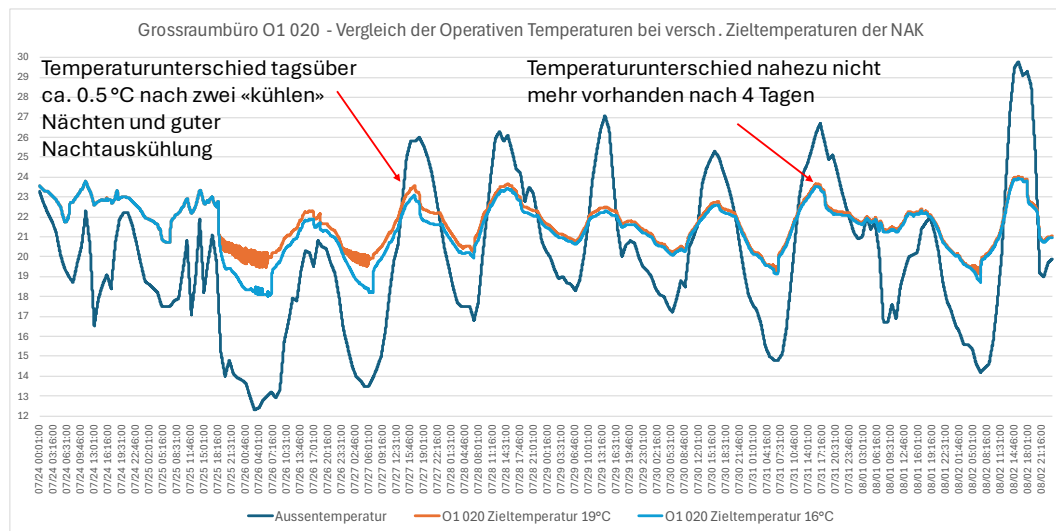


Abbildung 34. Auszug aus der Simulation über den gesamten Sommer. Feststellbare Unterschiede bei der Raumtemperatur bei Verwendung verschiedener Zieltemperaturen der Nachtauskühlung.

In Abbildung 34 ist ein Ausschnitt aus der gesamten Sommerperiode zu sehen. Die detaillierte Ansicht ist in Anhang 8: «Übersicht Temperaturverlauf Sommer» einsehbar. Dabei wird festgestellt, dass wenn die Aussen-temperatur unter 15°C sinkt, und die Aussenklappen bis zu einem Wert von 16°C statt nur bis 19°C offenbleiben, die operative Raumtemperatur tagsüber, wenn auch nur minim, tiefer ausfällt. Der Effekt verpufft jedoch nach wenigen Tagen wieder, sobald die Aussen-temperatur nicht mehr unter 15°C fällt. Die geringe Speichermasse des Gebäudes vermag hier die kühlere Raumtemperatur nicht zu halten. Im Kapitel 7.4 Temperatureindringtiefen und Wärmespeicherung wird auf diesen Umstand im Detail eingegangen und eine Plausibilisierung der Resultate aufgezeigt.

7.4 Temperatureindringtiefen und Wärmespeicherung

Im erweiterten Betrachtungszeitraum konnte festgestellt werden, dass ein positiver Effekt in Form einer tieferen Raumtemperatur durch eine tiefere Zieltemperatur bei der Nachtauskühlung nur von kurzer Dauer ist. In wenigen Tagen ist der Effekt bei wiederum gestiegenen Aussentemperaturen verpufft. In diesem Absatz geht es darum, die Temperatureindringtiefen und die Wärmespeicherung der im Objekt «AUE BS» eingesetzten Bauteile festzuhalten. Daraus lässt sich die Dauerhaftigkeit des verstärkten Effekts der Nachtauskühlung, wenn die Zieltemperatur auf 16°C gesenkt wird, plausibilisieren. Nachstehend werden die Formeln für die Berechnung definiert

- Die Temperatureindringtiefe σ für homogene, halbunendliche Baumaterialien:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\rho \cdot c \cdot \pi}} \quad [\text{m}] \quad (\text{Gl. 8})$$

- Temperaturleitfähigkeit a :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{Gl. 9})$$

- Charakteristischen Zeit τ :

$$\tau = \frac{d^2}{a} \quad [\text{s}] \quad (\text{Gl. 10})$$

- Formel des Wärmeeindringkoeffizient b :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}] \quad (\text{Gl. 11})$$

7.4.1 Decken / Böden

In der Arbeit von Hielscher (2022) [59] wird der Aufbau der Deckenkonstruktion für die Büroräume im Objekt «AUE BS» erläutert. Die 0.27m starke Verbunddecke ist eine Holz-Betonhybriddecke und weist gemäss den Berechnungen aus der genannten Arbeit folgende Kennwerte auf, welche hier weiterverwendet werden:

- mittlere Wärmespeicherkapazität: $c_{D, \text{mittel}} \quad 1'300 \text{ J}/\text{kgK}$
- mittlere Dichte: $\rho_{D, \text{mittel}} \quad 1'886 \text{ kg}/\text{m}^3$
- mittlere Wärmeleitfähigkeit: $\lambda_{D, \text{mittel}} \quad 0.504 \text{ W}/\text{mK}$

Die Temperaturleitfähigkeit a beträgt $2.06 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Daraus ergibt sich in einem 24h-Zyklus eine mittlere Temperatureindringtiefe von 0.075m. Bei der Betrachtung der Nachtauskühlung ist jedoch nur das Zeitfenster nachts relevant, also rund 12 h. Dabei beträgt die mittlere Temperatureindringtiefe 0.053m. Der Wärmeeindringkoeffizient beträgt $39.4 \text{ J}/\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$. Die charakteristische Zeit τ für die Verbunddecke beträgt 98.3 h, also etwas mehr als 4 Tage. Das bedeutet, dass die Decke sich nach etwa 4 Tagen auf die neue Temperatur eingeschwungen hat.

7.4.2 Wände

Innenwände

Im Erdgeschoss wie auch den Obergeschossen bestehen die raumtrennenden Bauteile aus Gipskartonwänden. Auf das Betrachten der Betonwände im Untergeschoss wird verzichtet, da diese Räume nicht in den Rahmen der Nachtauskühlung fallen. In der Arbeit von Hielscher (2022) [59] wurde für die Innenwände der Konstruktionsaufbau gemäss Tabelle 19 festgelegt, welcher auch so im EnergyPlus™-Modell modelliert ist.

Tabelle 19. Materialisierung der Innenwände.

Schicht	Material	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherkapazität c [J/kgK]
Schicht 1	Gipskartonplatte	0.0125	0.16	784.9	830
Schicht 2	Gipskartonplatte	0.0125	0.16	784.9	830
Schicht 3	Dämmung Flumroc 16cm	0.16	0.038	120	828
Schicht 4	Dämmung Flumroc 8cm	0.08	0.035	38	828
Schicht 5	Gipskartonplatte	0.0125	0.16	784.9	830

Die Summe aller Materialdicken beträgt 0.2775m. Daraus lässt sich die mittleren Materialkennwerte berechnen, sodass anschliessend ein Gesamtwert für die Wände genutzt werden kann.

$$\lambda_{W,mittel} = \frac{3 \cdot (0.16 \cdot 0.0125) + (0.038 \cdot 0.16) + (0.035 \cdot 0.08)}{0.2775} = 0.0676 \text{ [W/mK]} \quad (Gl. 12)$$

$$\rho_{W,mittel} = \frac{3 \cdot (784.9 \cdot 0.0125) + (120 \cdot 0.16) + (38 \cdot 0.08)}{0.2775} = 316.9 \text{ [kg/m}^3] \quad (Gl. 13)$$

$$c_{W,mittel} = \frac{3 \cdot (830 \cdot 784.9 \cdot 0.0125) + (828 \cdot 120 \cdot 0.16) + (828 \cdot 38 \cdot 0.08)}{3 \cdot (784.9 \cdot 0.0125) + (120 \cdot 0.16) + (38 \cdot 0.08)} = 829.4 \text{ [J/kgK]} \quad (Gl. 14)$$

Die Temperaturleitfähigkeit a der gesamten Wand beträgt $2.57 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Daraus ergibt sich in einem 24h-Zyklus eine mittlere Temperatureindringtiefe von 0.084m und 0.059m bei einem Zeitfenster von 12h. Der Wärmeeindringkoeffizient beträgt $7.5 \text{ J/K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$. Die charakteristische Zeit τ für die Innenwand beträgt 83.2 h, also etwa 3.5 Tage. Das bedeutet, dass die Decke sich nach dieser Zeit auf die neue Temperatur eingeschwungen hat.

Aussenwände

Auf das Betrachten der Aussenwände im Zusammenhang mit der Wärmespeicherkapazität wird verzichtet. Dies weil der Grossteil Aussenwände Hohlräume für die Lüftungskanäle aufweist oder en oder mit Fenstern bestückt sind, welche keine Wärme speichern.

7.4.3 Fazit zur Temperatureindringtiefe

Eine längerfristige Nutzung einer «kühlen Periode» bei der die Räume auf ein maximum abgekühlt werden um daraus einen Vorteil für eine bevorstehende «warme Phase» zu generieren ist nur für einen kurzen Zeithorizont möglich. Die charakteristische Zeit von 3.5 bis 4 Tage ist zu kurz, um

einen längerfristigen abkühlenden Effekt erzielen zu können. Dies liegt an der geringen Masse, welche die Bausubstanz des Gebäudes aufweist. Der Vorteil liegt jedoch darin, dass wenn nach einigen sehr heißen Tagen eine Periode mit einigen kühlen Tagen eintritt, die Raumtemperaturen auch rasch wieder gesenkt werden können. Ebenso weist das Gebäude eine geringe thermische Pufferkapazität auf. Aufgrund des tiefen Wärmeeindringkoeffizienten der Gipskartonwand kann das Gebäude nicht viel Wärme speichern und abgeben. Dies führt zu stärkeren Temperaturschwankungen im Innenraum. Die Verbunddecke hat zwar eine höhere Wärmespeicherkapazität, aber auch sie reagiert schnell auf Temperaturänderungen. Die geringe Masse des Gebäudes führt zu einer geringen thermischen Trägheit, was bedeutet, dass das Gebäude schnell auf Temperaturänderungen reagiert. Nach mehreren Tagen kühler Temperaturen wird das Gebäude schnell wieder warm, sobald die Aussentemperaturen steigen. Durch das Senken der unteren Zieltemperatur kann die Nachtauskühlung somit situativ, aber nicht generell über einen längeren Zeitraum optimiert werden. Doch in Bezug auf die Abnutzung des Materials kann als bedeutender Vorteil hervorgehoben werden, dass die Klappen eine geringere Anzahl Öffnungs- und Schliesszyklen aufweisen. Dies wirkt sich positiv auf die Lebensdauer der Komponenten aus und ein geringeres Wartungsintervall ist zu erwarten. Zudem ist der Effekt auf die thermische Behaglichkeit der Gebäudenutzenden am Morgen nur gering. Eine Anpassung kann also aus Sicht des Anlagebetreibers als sinnvoll erachtet werden.

8 Einfluss der Lufttemperatur und Strahlungswärme auf die operative Raumtemperatur

Im Rahmen des Vertiefungsprojekt 2 [5] wurde erkannt, dass der Einfluss von Lufttemperatur («Zone Mean Air Temperature») sowie Strahlungswärme («Zone Mean Radiant Temperature») auf die operative Raumtemperatur («Zone Operative Temperature») im Zusammenhang mit der Nachtauskühlung variieren kann. Als möglich Ursache dafür wurde der Einfluss der Luftströme von den Aussenklappen hin zu den Klappen im Treppenhaus, entlang der Wänden, an denen sich auch die Temperatursensoren befinden, erkannt. In diesem Kapitel soll daher der Frage weiter nachgegangen werden, wie mit dieser Abweichung umgegangen werden kann.

Weiter soll eine Methode gefunden werden, anhand welcher sich diese Abweichung bei der Simulation in EnergyPlus™ beheben lässt. Dazu werden die Beobachtungen aus dem Objekt «AUE BS» im Zusammenhang mit dem Modell genutzt. Weiter wird in der Literatur nach Hinweisen zu diesem Umstand gesucht, um die theoretische Grundlage dazu zu erarbeiten. Weiter wird dann basierend auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen eine Methode entwickelt, mit welcher sich in EnergyPlus™ diesem Thema begegnet werden kann.

8.1 Erkenntnisse aus dem Objekt «AUE BS»

Zunächst wird festgehalten, welche Beobachtungen im Zusammenhang mit den verschiedenen Parametern gemacht wurde. Ebenso wird auch dargelegt, wie in EnergyPlus™ die einzelnen Temperaturwerte zustande kommen und wie diese in den Berechnungen genutzt werden.

8.1.1 Einfluss der Nachtauskühlung auf die operative Raumtemperatur

Im Rahmen der Validierung des Simulationsmodells wurde festgestellt, dass die real gemessenen Temperaturen im Gebäude und die simulierten operativen Raumtemperaturen pro Zone teilweise voneinander abwichen. Dies insbesondere dann, wenn die Nachtauskühlung aktiv war und dann noch verstärkt, wenn die Aussentemperatur besonders stark von der Raumtemperatur abwich.

Die Grundeinstellung für der Berechnung der «Zone Operative Temperature» in EnergyPlus™ liegt bei einem jeweiligen Anteil von 50 % Lufttemperatur und 50 % Strahlungswärme. Das heisst, das Programm nimmt für die jeweilige Zone die beiden Temperaturen pro Zeitschritt und vereint diese hälftig zu einem neuen Wert.

Bei der Validierung des Simulationsmodells wurde jedoch festgestellt, dass dieser 50-50 Anteil von Strahlungswärme und Lufttemperatur nicht in jeder Situation die Realität akkurat abbildet. Die real gemessene Temperatur im Gebäude wich zu bestimmten Zeiten von den simulierten Werten ab. Teilweise haben die beiden Werte aber sehr gut miteinander übereingestimmt. Zum Feststellen, woher diese Unterschiede kommen, wurde mittels der Ausgabewerte «Zone Mean Air Temperature» und «Mean Radiant Temperature» der jeweiligen Zone ein eigener Wert für «operative Raumtemperatur» generiert. Dabei wurde manuell der Anteil der beiden beeinflussenden Temperaturwerte variiert. Dabei kann beobachtet werden, dass die Raumtemperaturen in Funktion zur Aussentemperatur in Kombination mit den geöffneten Aussenklappen zur Nachtauskühlung in Abhängigkeit stehen.

8.1.2 Steuerung der Nachtauskühlung

Die Steuerung der Nachtauskühlung im Realen Objekt «AUE BS» weicht von derjenigen im Simulationsmodell ein wenig ab. Es geht dabei um die für die Steuerung verwendete Temperatur, welche dazu benötigt wird, um den Impuls zum Öffnen bzw. Schliessen der Aussenklappen in einer Zone zu geben. Denn sowohl im Gebäude also auch im Modell wird jede Zone (d.h. Raum) einzeln betrachtet und die Nachtauskühlung wird aktiviert, wenn die vorgegebenen Kriterien erfüllt sind. Nachstehend werden die Unterschiede erläutert.

Steuerung der NAK im Objekt

Die Steuerung der Nachtauskühlung im realen Objekt «AUE BS» richtet sich nach dem Programmablauf [58]. Die Temperaturen, welche für die Steuerung verwendet werden, werden durch die Temperatursensoren in den jeweiligen Räumen erhoben. Diese befinden sich als Aufputz-Element an den Innenwänden. Bei der Begehung vor Ort musste festgestellt werden, dass von drei eingesetzten Temperatursensoren nur einer in das Gebäudeleitsystem eingebunden ist. Dieser Sensor befindet sich in der direkten Flucht zwischen Aussenklappen und Klappen zum Treppenhaus. Luftströmungen, welche den Temperatursensor beeinflussen sind somit naheliegend.

Steuerung der NAK im EnergyPlus™ Modell

Die Steuerung der Nachtauskühlung erfolgt gemäss der Input-Output Reference von EnergyPlus™ über die «Zone Air Temperature» des jeweils vorhergehenden Zeitschrittes [38, S. 1107]. Über das Kontrollelement wird definiert, bei Überschreiten von welchem Temperaturwert die Klappen öffnen bzw. schliessen soll. Somit lässt sich festhalten, dass in der Grundeinstellung von EnergyPlus™ die Strahlungswärme keinen direkten Einfluss auf die Steuerung der Nachtauskühlung hat. Dies weicht von der Regelung im realen Objekt ab wo die Strahlungswärme durch die Nähe der Temperatursensoren zur Wand eine Rolle spielt.

Durch verschiedene Auswertungen konnte festgehalten werden, dass die Lufttemperatur in der Simulation effektiv volatiler ist als der Wert für operative Raumtemperatur. Dies bedeutet, dass die Steuerung der Nachtauskühlung im Simulationsmodell nicht so funktioniert wie in der Realität. Dies zeigt sich darin, dass die Aussenklappen im Modell ein oszillierendes Verhalten aufweisen. Dies entsteht durch folgenden Umstand:

- Die Aussenklappen öffnen sich basierend auf der Vorgabe, dass die Aussenluft kühler ist als die Raumtemperatur, kühle Luft strömt in den Raum
- Die simulierte Lufttemperatur im Raum, beeinflusst durch die einströmende kühle Luft, sinkt ab
- Die Steuerung der Nachtauskühlung registriert die kühlere Lufttemperatur, sobald diese unter den definierten Grenzwert von 19°C fällt, schliessen die Aussenklappen
- Durch das Wegfallen der kühleren Aussenluft in der Energieerhaltungsgleichung steigt die Lufttemperatur unmittelbar wieder an (über den Grenzwert) und die Aussenklappen eröffnen sich erneut
- Dies ist auf den nun wieder stärkeren Einfluss des Wärmeübergangs, von Wänden, Böden und Decken wo die Wärme eingespeichert ist, auf die Luft zurückzuführen.

Diese Reaktion der Steuerung wiederholt sich während einer Nacht, wenn kühle Aussentemperaturen herrschen, mehrfach. Dieses öffnen und schliessen trägt dazu bei, dass das Simulationsergebnis verfälscht wird, da zur Regelung die Lufttemperatur verwendet wurde und nicht die operative Raumtemperatur wie im realen Objekt.

Da im Gesamtkontext aber die operative Raumtemperatur massgeblicher ist, da sie letztlich auch der durch die Nutzer wahrgenommenen Temperatur im Rahmen der Behaglichkeit entspricht, sollte nicht die Lufttemperatur, sondern die operative Raumtemperatur zur Steuerung der Nachtauskühlung verwendet werden.

Die Auswertung bzw. die Zusammensetzung der neuen «operativen Raumtemperatur» hat erst im Nachgang des Simulationsdurchlaufes stattgefunden. Das heisst es findet keine Beeinflussung der Regelungstechnik, im Vorliegenden Fall der Nachtauskühlung statt.

8.2 Theoretischer Hintergrund

Die ursprüngliche Fragestellung hatte als Anknüpfungspunkt den Einfluss der Luftströmung durch die Nachtauskühlung auf die operative Raumtemperatur. Dieser Umstand ist in der SN EN ISO 7726 [40, S. 63] beschrieben. Es steht dazu eine Tabelle mit Umrechnungsfaktoren zur Verfügung welche anhand verschiedener Luftgeschwindigkeiten den Einfluss der Lufttemperatur (t_a) verstärkt.

Für eine höhere Genauigkeit und andere Umgebungsbedingungen kann die folgende Gleichung angewandt werden:

$$t_o = At_a + (1 - A)\bar{t}_r$$

wobei der Wert von A unter Verwendung der nachfolgend als Funktion der relativen Luftgeschwindigkeit v_{ar} (in Meter je Sekunde) angegebenen Werte bestimmt werden kann:

v_{ar}	< 0,2	0,2 bis 0,6	0,6 bis 1,0
A	0,5	0,6	0,7

Abbildung 35. Auszug aus der Norm SN EN ISO 7726 zur operativen Raumtemperatur.

Es wurde davon ausgegangen, dass in Anlehnung an die SN EN ISO 7726 die Luftströmung während der Nachtauskühlung einen Einfluss auf die Temperatursensoren hat. Dies unter anderem, weil sich die Sensoren in der direkten Flucht zwischen Aussenklappen und Klappen zum Treppenhaus befinden.

Die SN EN ISO 7726 beschreibt, wie die operative Raumtemperatur gemessen werden muss, damit das Verhältnis zwischen dem Wärmeaustauschkoeffizient durch Strahlung und Konvektion gleich dem einer Person ist. Die Platzierung der Temperatursensoren im «AUE BS» und generell in Gebäuden entspricht diesen Vorgaben nicht. In verschiedenen Arbeiten [41], [42], [43] werden Hinweise darauf gefunden, dass bei Temperaturmessungen in Räumen mit Standard-Temperaturfühlern, welche an der Wand montiert sind, der Einfluss der Strahlungswärme grösser ist, als derjenige der Lufttemperatur. Dieser Umstand soll beim Vergleichen der real gemessenen und den simulierten Werten betrachtet werden.

8.3 Grafische und Quantifizierte Auswertung

Um den Einfluss der Strahlungswärme und der Lufttemperatur zu untersuchen werden die simulierten Werte mit den real gemessenen Temperaturen verglichen. Um ein möglichst aussagekräftiges Resultat zu erhalten, werden die drei Betrachtungsperioden (kalte Nächte, Tropennächte und neutrale Nächte) auch hier genutzt. So werden verschiedene Randbedingungen abgedeckt.

Die Abbildung 36 zeigt den Vergleich der simulierten operativen Raumtemperatur und der real gemessenen Raumtemperatur im Objekt. Dabei kann festgestellt werden, dass nachts eine sehr hohe Übereinstimmung der Werte vorliegt. Tagsüber liegen die Werte der simulierten Temperaturen jedoch über den gemessenen Werten.

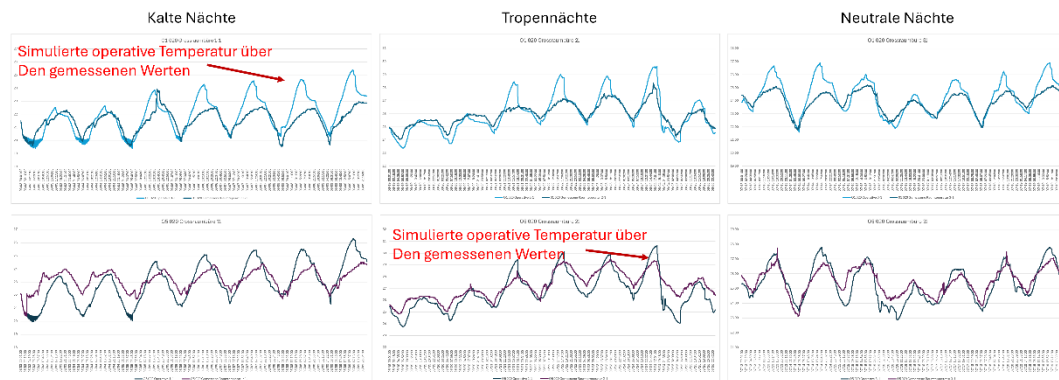


Abbildung 36. Vergleich der gemessenen und der simulierten operativen Raumtemperatur für die Räume O1 020 (oben) und O5 020 (unten).

Dies deutet darauf hin, dass nachts der Anteil von 50 % Strahlungswärme und 50 % Lufttemperatur bei der gemessenen Raumtemperatur korrekt ist. Tagsüber diese Anteile nicht übereinstimmend sind. Eine Auswertung ergibt, dass Tagsüber die simulierte Strahlungstemperatur viel näher bei den gemessenen Raumtemperaturen liegt. Die Lufttemperatur ist viel volatil und daher auch ihr Einfluss auf die operative Raumtemperatur viel stärker. Dies ist im Anhang 9: «Auswertung operative Raumtemperatur» zu sehen. Das Generieren einer eigenen «Korrigierten Raumtemperatur» soll Aufschluss darüber geben, ob eine Anpassung des Anteils der Strahlungswärme tagsüber eine grössere Übereinstimmung. Dazu wird tagsüber der Anteil der Strahlungswärme auf 1.0 und der Anteil der Lufttemperatur auf 0.0 festgelegt.

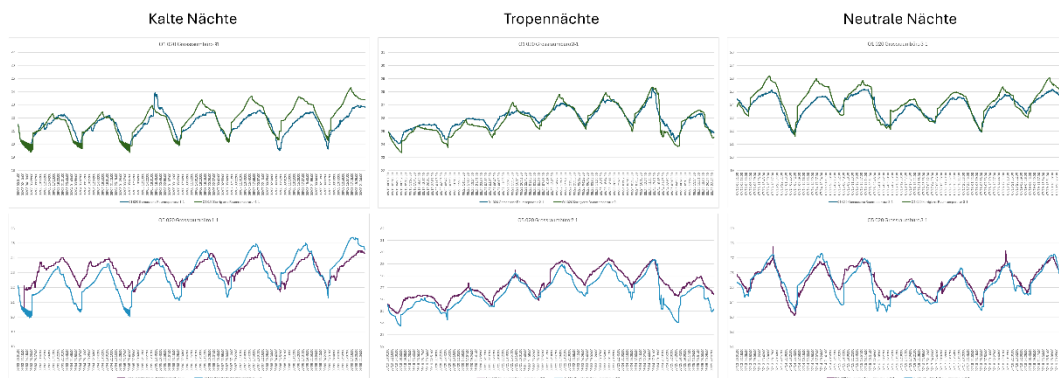


Abbildung 37. Vergleich der gemessenen (hellblau) und der korrigierten operativen Raumtemperatur (grün/violett) für die Räume O1 020 (oben) und O5 020 (unten).

Die Abbildung 37 zeigt, dass die korrigierte Raumtemperatur viel näher an die gemessene Raumtemperatur herankommt. Dies wird auch durch die quantifizierte Auswertung in der Tabelle 20 bestätigt. Die berechneten Flächen fallen tiefer aus, was einer höheren Übereinstimmung entspricht.

Tabelle 20. Quantifizierte Auswertung der operativen und der korrigierten Raumtemperatur.

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				19.-25.08.2023 (Tropennächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				2-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	Operative Raumtemperatur		Korrigierte Raumtemperatur		Operative Raumtemperatur		Korrigierte Raumtemperatur		Operative Raumtemperatur		Korrigierte Raumtemperatur	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 020	25.32	99.00	17.90	76.84	39.00	45.51	36.44	17.06	16.46	78.78	10.76	67.11
O5 020	94.20	53.26	83.72	35.69	101.87	18.10	108.22	1.70	56.86	30.40	40.00	20.22

Ein Einfluss der Nachtauskühlung scheint somit vorhanden zu sein. Lundström et al., (2020) schreiben, dass die Luftzirkulation einen wesentlichen Einfluss auf die gemessene Temperatur hat. Vieles deutet somit darauf hin, dass tagsüber die Strahlungswärme aus der stärker gewichtet, ist als die Lufttemperatur. Nachts hingegen, wenn die Nachtauskühlung aktiv ist und die Luftzirkulation entsprechend höher ist, die Lufttemperatur an Einfluss gewinnt. Um diesen Umstand näher zu untersuchen, müssten präzise Messungen der operativen Raumtemperatur gemäss der SN EN ISO 7726 gemacht werden, welche die Messung mittels «Globe Thermometer» erfordern. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, sollte aber für zukünftige Arbeiten aufgenommen werden.

8.4 Methode zur Korrektur in EnergyPlus™

Die bis jetzt gewonnene Erkenntnis setzt sich aus nachfolgenden Teilpunkten zusammen:

- Die Steuerung der Nachtauskühlung im EnergyPlus™ Simulationsmodell nutzt die Lufttemperatur und nicht die operative Raumtemperatur als massgebenden Wert
- Die gemessene Raumtemperatur im Objekt «AUE BS» wird tagsüber stark von der Strahlungswärme der Wand beeinflusst.
- Nachts entspricht die gemessene Raumtemperatur der simulierten operativen Raumtemperatur was bedeutet, dass die Steuerung der Nachtauskühlung im realen Gebäude die korrekten Werte nutzte.

Die Lufttemperatur ist volatil als die operative Raumtemperatur und daher die Steuerung im Modell viel sensibler. Um das Modell zu verbessern, soll eine Methode gefunden werden, welche es ermöglicht im Simulationsmodell die Zonensteuerung der Nachtauskühlung mit der operativen Raumtemperatur, statt der reinen Lufttemperatur zu ermöglichen. Das Verwenden von «Thermostat»-Elementen ist nicht möglich, da diese nur die operative Raumtemperatur beeinflussen können und nicht die reine Lufttemperatur, welche für die Steuerung genutzt wird. Es besteht demnach nur die Möglichkeit, die Steuerung der Nachtauskühlung mittels EMS zu beeinflussen.

Folgende Schritte sind nötig, um in EMS die Korrektur vorzunehmen:

- Definieren eines Sensors für die «Zone Operative Temperature» pro Raum (Zone)
- Definieren eines Sensors für die Aussentemperatur

- Definieren eines Aktors für das Öffnen/Schliessen der Klappen (einer pro Öffnung)
- Definieren eines «Program Calling Manager», welcher den Prozess Initiiert
- Definieren eines «EMS-Programmablaufs» welcher die definierten Parameter überwacht und die nötigen Massnahmen dazu ergreift.

Gemäss diesen Vorgaben wurde ein EMS-Programm aufgesetzt. Dieses ist im Anhang 9: «EMS-Programm» zusehen. Dieses Programm lässt die Öffnung der Aussenklappe zu, wenn die Aussen-temperatur zwischen 19:30 und 08:00 Uhr unter die operative Raumtemperatur vom definierten Raum (Zone) fällt. Dadurch ist nicht mehr die Lufttemperatur massgebend, sondern die operative Raumtemperatur. Dies resultiert auch darin, dass die Klappen bedeutend weniger oszillierende Öffnungszustände aufweisen. Dies ist in Abbildung 38 zusehen.

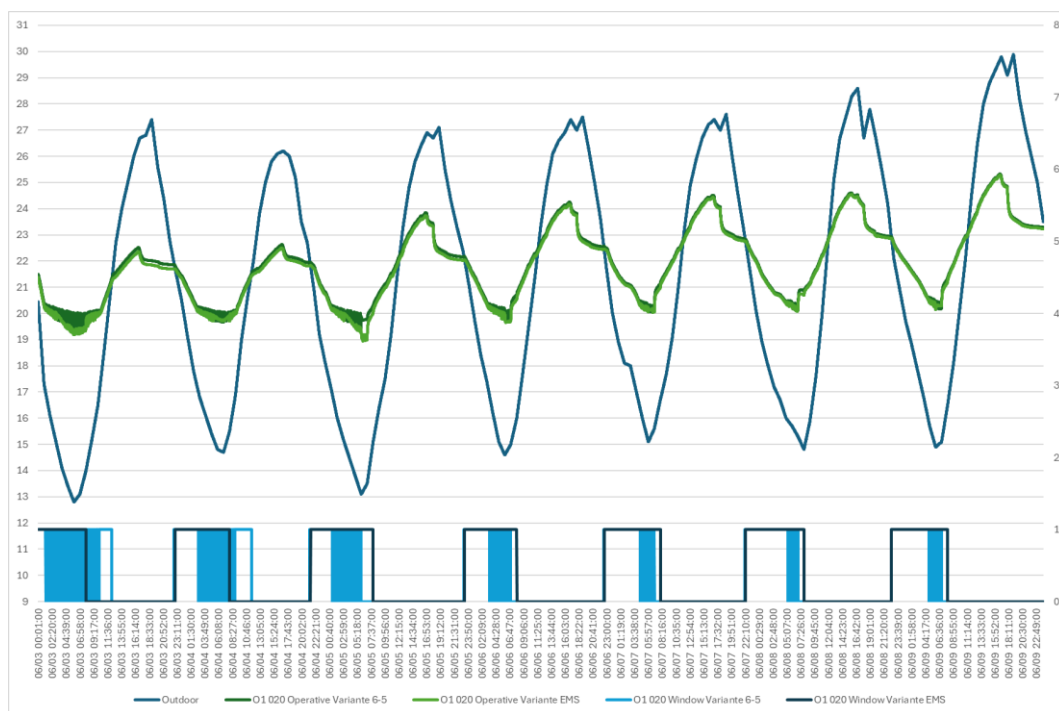


Abbildung 38. Darstellung der Öffnungszustände der Aussenklappe am Beispiel des Raum O1 020.

Die Umsetzung erfolgt nicht für das Gesamte Gebäude, sondern lediglich für den Raum O1 020 um die definierte Methode zu prüfen.

9 Resultate

In diesem Kapitel geht es darum, die aus dieser Arbeit entstandenen Resultate darzulegen. Diese werden nach den einzelnen Fragestellungen gegliedert, sodass diese beantwortet werden können.

9.1 Resultate Fensterlüftung zur Nachtauskühlung von Räumen

Im Rahmen der Berechnungen zur Fensterlüftung wurde festgestellt, dass die Nachtauskühlung von Räumen auch ohne den Kamineffekt funktioniert. Dabei sind mit zwei rechnerischen Verfahren die Luftmengen berechnet und mit den Simulationsergebnissen verglichen worden. Dabei lag die Differenz bei ca. 10 %, womit ein Plausibles Resultat vorliegt. Eine einseitige Fensterlüftung kann also bereits ausreichen um die Nachtauskühlung zielbringend umzusetzen.

9.2 Resultate Automatisierung der Simulation und Auswertung von Varianten

Im Rahmen zu Evaluation und Erarbeitung eines Prozessflusses zur automatisierten Simulation und Auswertung wurden folgende Elemente als wichtig betrachtet um automatisiert verändert zu werden. Diese wurden auch in der erarbeiteten Methode umgesetzt:

- Wetterdaten (epw-Datei)
- Personenbelegung
- Untere Zieltemperatur der Nachtauskühlung

Die automatisierte Bereitstellung der Wetterdaten via API von Meteomatics erlaubt, ein reales Bild des Gebäudes im Modell wiederzugeben. Dadurch lässt sich eine vorausschauende Betriebsoptimierung realisieren. Der Vergleich der Varianten und die automatisierte Auswertung, welche anschließend den besten Setpoint für die Zieltemperatur sowie die idealen Öffnungszeiten der Aussenklappen definiert, konnte umgesetzt werden.

9.3 Resultate Einfluss der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung

Der positive Einfluss der mechanischen Lüftung auf die Nachtauskühlung in Form von kühleren Raumtemperaturen ist über die drei betrachteten Zeiträume *Kalte Nächte*, *Tropennächte* und *Referenzzeitraum* unterschiedlich, doch mehrheitlich vernachlässigbar klein. Während der Phase der *Tropennächte* ist der Effekt gegenteilig und durch den Einsatz der Lüftungsanlage nachts resultieren tagsüber höhere Raumtemperaturen. Es wurde eine Methode dargelegt, mit der sich die Werte quantifiziert auswerten und vergleichen lassen. Dadurch ergeben sich folgende Effekte pro Zeitraum

- *Kalte Nächte*: Kleiner oder vernachlässigbarer positiver Effekt
- *Tropennächte*: Kleiner oder vernachlässigbarer negativer Effekt
- *Referenzzeitraum*: Untere Geschosse negativer, obere Geschosse positiver, aber vernachlässigbarer Effekt

Über alles gesehen ist der Effekt, den der Betrieb der mechanischen Lüftungsanlage während der Nacht bringt, vernachlässigbar. Je nach Geschoss und Zeitperiode sind in einzelnen Räumen spürbare positive Temperaturdifferenzen feststellbar, welche jedoch die Ausnahme bilden und in Gleichzeitigkeit mit weniger starken oder sogar negativen Differenzen stehen.

9.4 Resultate Optimierung der Nachtauskühlung

Die Fragestellung zur Nutzung der mechanischen Lüftung zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit wurde angepasst. Dies aufgrund der Feststellung, dass die mechanische Lüftung keinen Mehrwert in Form von Freier Kühlung zur Verbesserung der Nachtauskühlung bringt. Stattdessen wurde der Fokus auf die Optimierung des bestehenden Systems zur Nachtauskühlung gelegt. Dabei wird festgestellt, dass sich zwei gewinnbringende Elemente vereinen lassen. Einerseits kann durch das Absenken der Zieltemperatur auf 16 °C statt 19 °C die Raumtemperatur tagsüber zumindest während der Periode der *Kalten Nächte* gesenkt werden. Zum anderen wird damit das Problem der oszillierenden Aussenklappen behoben, was zu weniger Verschleiss an den Bauteilen führt. Dies zudem unter Beachtung, dass die thermische Behaglichkeit für die Gebäudenutzenden am Morgen gewährleistet ist.

9.5 Resultate Einfluss der Lufttemperatur und Strahlungswärme auf die operative Raumtemperatur

In Bezug auf den Einfluss der Lufttemperatur und der Strahlungswärme auf die operative Raumtemperatur wurden verschiedene Feststellungen gemacht.

- Die simulierten operativen Raumtemperaturen wichen über alle drei Betrachtungszeiträume tagsüber von den real gemessenen Temperaturen ab. Nachts hingegen stimmen die beiden Vergleichswerte miteinander überein.
- Tagsüber ist der Anteil der Strahlungswärme höher gewichtet als der Anteil der Lufttemperatur. Dies stimmt mit den 50-50 Ansatz nicht überein. Hingegen nachts bei offenen Lüftungsklappen stimmt der 50-50 Ansatz von Strahlungswärme und Lufttemperatur.

Weiter wurde festgestellt, dass in EnergyPlus™ zur Steuerung der Nachtauskühlung immer die Lufttemperatur genutzt wird und nicht die operative Raumtemperatur. Die volatilere Lufttemperatur hat zur Folge, dass in der Simulation die Aussenklappen viel schneller schliessen, als wenn die operative Raumtemperatur genutzt würde, bei der die Strahlungswärme ebenfalls miteinbezogen wurde. Daher wurde mittels EMS eine Methode entwickelt, welche es ermöglicht die Aussenklappen im Modell nach der operativen Raumtemperatur zu steuern, wie dies im realen Gebäude auch gemacht wird.

10 Erkenntnisse und Diskussion

Die zu Beginn gestellten Fragestellungen können beantwortet werden. In diesem Kapitel geht es darum die Erkenntnisse zu den Resultaten zu diskutieren sowie einen Ausblick für zukünftige Arbeiten und Anwendungen in diesem Bereich anzustellen.

10.1 Erkenntnisse zu den Resultaten

- Es wird erkannt, dass die **Nachtauskühlung auch ohne Kamineffekt** funktioniert. Dies ist insofern interessant, als dass die Chance eröffnet bei Neubauten oder Gebäudesanierungen ohne Möglichkeiten für einen durchgehenden «Kamin» trotzdem das Konzept der Nachtauskühlung in Betracht zu ziehen. Ein Konzept der Nachtauskühlung kann rein über die Fensterlüftung funktionieren. Mit einer thermischen Gebäudesimulation lässt sich dies bei Bedarf überprüfen.
- Der positive **Effekt der mechanischen Lüftungsanlage** auf die Nachtauskühlung ist und mehrheitlich sind die Temperaturdifferenzen vernachlässigbar klein oder gar negativ. Von einem Einsatz ist im Gebäude «AUE BS» daher abzuraten, da der Gewinn im Bereich der Behaglichkeit klein ist und der dafür erforderliche Aufwand (Energie, Abschreibung der Anlage durch höheren Betrieb) nicht beziffert werden konnten.
- Die Lüftungsanlage lässt sich nicht raumweise einsetzen, sondern ist ein Gesamtsystem. Daher ist es nicht möglich, dass Räume, bei denen durch die **Ergänzung der mechanischen Lüftungsanlage** zusätzlich zur der Nachtauskühlung ein positiver Effekt auftritt, individuell davon profitieren. Stattdessen muss entschieden werden, ob ein positiver Effekt für das Gesamtsystem vorhanden ist oder nicht. Die Resultate haben gezeigt, dass wenn ein positiver Effekt auftritt, diese Temperaturdifferenzen dennoch vernachlässigbar klein sind. Daher lohnt sich der Einsatz der Lüftungsanlage nicht, auch wenn dafür keine Kennzahl in Form von Stromverbrauch berechnet wurden.
- Das Auswerten und Vergleichen von verschiedenen Varianten kann nicht nur über Temperaturdiagramme erfolgen. Es erfordert eine **quantifizierbare Messgröße**. Nur dadurch kann ein einheitlicher Vergleich und vor allen eine Automatisierung umgesetzt werden. Die definierte Kennzahl ist universell und einfach vergleichbar. Dazu muss jedoch der betrachtete Zeitraum immer von gleicher Länge sein.
- Das **Modellieren der Anlagentechnik** in EnergyPlus™ erlaubt nicht die Detailtiefe, wie sie in Realität gebaut ist. Zentrale Elemente wie Ventilator, Lufterhitzer oder Wärmerückgewinnung sowie auch die Heizungsanlage lassen sich sehr detailliert abbilden. Hingen sind wesentliche Vereinfachungen erforderlich bei der Luftverteilung in die einzelnen Zonen. Das Kanalnetz mit seinen Verzweigungen kann nicht auf einzelne Kanalsegmente heruntergebrochen werden. In Zusammenhang mit einer potenziellen automatisierten Datenübernahme aus einem IFC-Modell direkt in ein EnergyPlus™-Simulationsmodell ist dieser Punkt besonders wichtig. Einerseits reduziert diese Vorgabe klar die Anzahl Elemente im Modell und damit auch die Fehleranfälligkeit. Andererseits müssen hierzu Methoden

gefunden werden, welche diese Vereinfachungen ermöglichen. Dazu gehört auch der hydraulische Abgleich, sodass die Anlage im Modell voll funktionsfähig ist.

- Die automatisierte **Bereitstellung von Wetterdaten** über Meteomatics funktioniert einwandfrei. Die Werte der gewünschten Parameter lassen sich einfach in eine epw-Datei integrieren und zur Simulation verwenden. Dies ermöglicht einen ersten Ansatz der vorausschauenden Simulation über einen Zeithorizont von einer Woche.
- Die **automatisierte Durchführung von Simulationen** bringt den Vorteil, dass rasch und unkompliziert Vergleiche verschiedener Varianten gemacht werden können, ohne dass Fehler bei der Anpassung des Simulationsmodells geschehen. Wenn das Modell validiert ist und die Automatisierungsparameter geprüft sind, können Simulationen jederzeit durchgeführt werden mit dem Vorteil zu einem effizienteren Betrieb beitragen zu können.
- Das bestehende Simulationsmodell wies den Vorteil auf, dass die **Steigschächte** bereits als eigenständige Thermale Zonen ausgewiesen waren. Dies ist nötig, um die Kanäle darin modellieren zu können. Dieses vorausschauende Handeln beim Erstellen der Grundstruktur ist positiv hervorzuheben, da eine nachträgliche Modellierung zusätzlicher thermaler Zonen für dieses Vorhaben nahezu unmöglich wäre.
- Der **Einfluss von Strahlungswärme der Wand und Lufttemperatur** auf die operative Raumtemperatur ist ein Thema, welches komplex ist. Eine weitere Bearbeitung des Themas insbesondere im realen Gebäude ist erforderlich. Für die Simulation konnte eine Methode dargelegt werden, wie die Steuerung der Nachtauskühlung in EnergyPlus™ angepasst werden kann, sodass eine stabilere Simulation möglich ist.

10.2 Diskussion und Ausblick

Die Resultate dieser Arbeit zeigen, dass die Beantwortung einer Fragestellung auch anders ausfallen kann, als dies erwartet wurde. Der erhoffte positive Effekt der mechanischen Lüftungsanlage als Unterstützung zur Verbesserung der Nachtauskühlung. Dennoch war der Erkenntnisgewinn gross und es konnten einige Grundlagen für weiterführende Arbeiten geschaffen werden. Zudem lassen sich einige Elemente, insbesondere aus dem Teil der Automatisierung, verallgemeinern und in anderen Projekten nutzen, was ein zusätzlicher Gewinn ist. Im Gesamtkontext können folgende Schlüsselaspekte hervorgehoben werden:

- Der hohe reguläre Preis von CHF 340.00 / Monat für die **Wetterdaten** bei Meteomatics ist ein Kriterium, welches die Anwendung einschränkt. Gerade bei kleinem Immobilien-Portfolios und bei Anwendungen, wo das monetäre Einsparpotenzial klein oder gar unbekannt ist, lohnt sich die Beschaffung der erforderlichen Wetterdaten nicht. Im Objekt «AUE BS» sind die Möglichkeiten zur Einflussnahme auf das Raumklima limitiert und daher der weitere Einsatz sicher kritisch zu hinterfragen. Die Optimierungsmassnahmen in Form von herabgesetzten Zieltemperaturen für die Nachtauskühlung kann grundsätzlich auch generell und ohne dazu erforderliche Simulation erfolgen. Die Vorausschauende Simulation mit aktuellen Wetterprognosen kann dann einem zusätzlichen Mehrwert generieren, wenn eine Klimaanlage oder mechanische Kühlung im Gebäude vorhanden ist, welche situativ nach

den Simulationsergebnissen eingesetzt bzw. weggelassen werden kann. Für Gebäude mit einer aktiven Kühlung besteht durch die vorausschauende Simulation das Potenzial, die Regulierung dahingehend zu optimieren, dass die Kühlung nur dann in Betrieb ist, wenn sie effektiv benötigt wird. In der aktuellen Praxis wird die Kühlung in einem Raum oft über die Raumtemperatursensoren reguliert. Diese sind aber anfällig auf äussere Einflüsse wie die Strahlungstemperatur der Wände. Durch eine kombinierte Methode mit real gemessenen Temperaturen und vorausschauend simulierten Werten liesse sich eine verlässlichere und effizientere Konditionierung der Räume umsetzen.

- Das **Modellieren** der gesamten Anlagentechnik war sehr zeitintensiv und fordernd. Eine automatisierte Modellierung würde zum einen grosse Zeitersparnis bringen und andererseits auch die Fehleranfälligkeit senken. Dies würde den Einsatz der thermalen Gebäudesimulation bei Bauprojekten attraktiver machen und somit zukunftsorientiert zur Nachhaltigkeit beitragen.
- Die Arbeit hat gezeigt wo die **Limiten der Modellierung in EnergyPlus™** sind. Verschiedene Vereinfachungen mussten gemacht werden, weil die Kapazität des Programms ausgeschöpft wurde. Trotz allem konnten die Ziele erreicht werden und fehlende Details können durch plausibilisierte Annahmen wettgemacht werden.
- Diskussion: Die Zahl der reduzierten Räume bei der Umsetzung der EMS-Methode ist sicherlich ein limitierender Faktor.

Weiterführende Arbeiten, welche in an diese Vertiefungsarbeit anknüpfen, können folgende Themen umfassen:

- Erstellen eines Frameworks für automatisierte Modellierung der Anlagentechnik in EnergyPlus™, welches die Vereinfachungen und den hydraulischen Abgleich übernimmt.
- Definieren von Vorgaben an Planer, welche BIM / IFC erstellen um die Datenübernahme der Anlagentechnik ins Modell einfacher zu gestalten.
- Definieren einer Methode zur Verbesserung des Nutzerkomforts durch selektive Kühlung (bei optionaler Klimaanlage im Gebäude), welche mit der vorausschauenden Simulation mittels Wetterprognose gekoppelt ist.
- Aufbau eines Frameworks zur Generierung von epw-Dateien aus Open-Source Quellen.
- Definieren und aufzeigen von Anknüpfungspunkten zur Überführung der definierten Setpoints / Schedules aus der Variantenanalyse ins Gebäudeleitsystem.
- Gegenkontrolle des Simulationsmodells mit real gemessenen operativen Temperaturwerten. Dazu soll die operative Raumtemperatur im Objekt mit der standardisierten Methode aus der ISO 7726 gemessen und dokumentiert werden. Dies bestenfalls auch unter verschiedenen Randbedingungen (mit und ohne Nachtauskühlung)

Literaturverzeichnis

- [1] A. N. Nasaruddin, T. Ito, und T. B. Tuan, «Digital Twin Approach to Building Information Management», *The Proceedings of Manufacturing Systems Division Conference*, Bd. 2018, S. 304, 2018, doi: 10.1299/jsmemsd.2018.304.
- [2] «What is Model Predictive Control? - MATLAB & Simulink - MathWorks Schweiz». Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ch.mathworks.com/help/mpc/gs/what-is-mpc.html>
- [3] Amt für Umwelt und Energie, «Projektbeschreibung», Blog Neubau. Zugegriffen: 24. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aue.bs.ch/ueber-uns/standort/blog-neubau.html>
- [4] FHNW, HABG, Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau, «IDF-Modell <AUE BS>».
- [5] P. Marclay, «AUE BS - MSR im Digitalen Zwilling mit einem Fokus auf dem Verhalten von Sensoren», FHNW, Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau, Muttenz, Jan. 2024.
- [6] Waldhauser + Hermann AG, «11.1 Topologie Gebäudeautomation». 26. September 2017.
- [7] Waldhauser + Hermann AG, «6 Anlage- und Funktionsbeschreibung Lüftung». 27. Oktober 2021.
- [8] 7Air, «Technische Daten / Auftragsbestätigung Lüftungsanlage AUE BS». 19. November 2020.
- [9] Waldhauser + Hermann AG, «Neubau AUE - Prinzipschema Lüftung». 27. Oktober 2021.
- [10] S. H. Khajavi, N. H. Motlagh, A. Jaribion, L. C. Werner, und J. Holmström, «Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings», *IEEE Access*, Bd. 7, S. 147406–147419, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946515.
- [11] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, und B. Hicks, «Characterising the Digital Twin: A systematic literature review», *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Bd. 29, S. 36–52, Mai 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [12] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, und C. Barlow, «Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research», *IEEE Access*, Bd. 8, S. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [13] P. Marclay, «AUE Neubau - Anlagentechnik im Digitalen Zwilling», FHNW, Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau, Muttenz, Juni 2023.
- [14] B. Coffey, F. Haghghat, E. Morofsky, und E. Kutrowski, «A software framework for model predictive control with GenOpt», *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 7, S. 1084–1092, Juli 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.022.
- [15] G. Serale, M. Fiorentini, A. Capozzoli, D. Bernardini, und A. Bemporad, «Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities», *Energies*, Bd. 11, Nr. 3, Art. Nr. 3, März 2018, doi: 10.3390/en11030631.
- [16] Y. Yao und D. K. Shekhar, «State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field», *Building and Environment*, Bd. 200, S. 107952, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107952.
- [17] T. Hilliard, M. Kavgic, und L. Swan, «Model predictive control for commercial buildings: trends and opportunities», *Advances in Building Energy Research*, Bd. 10, Nr. 2, S. 172–190, Juli 2016, doi: 10.1080/17512549.2015.1079240.
- [18] A. Moser, A. Schäulin, L. Davidson, V. Corrado, V. Dorer, und M. Koschenz, «11 - DESIGN WITH MODELING TECHNIQUES», in *Industrial Ventilation Design Guidebook*, H. Goodfellow und E. Tähti, Hrsg., San Diego: Academic Press, 2001, S. 1025-p3. doi: 10.1016/B978-012289676-7/50014-X.
- [19] L. Gu, «Airflow network modeling in energyplus», *IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association 2007*, Jan. 2007.
- [20] W. A. Miller, M. K. Smith, L. Gu, und J. R. New, «A Comparison of Simulation Capabilities for Ducts», ORNL/LTR-2014/283, 1185600, Nov. 2014. doi: 10.2172/1185600.
- [21] S. Leal, S. Hauer, F. Judex, und S. Gahr, «Implementation of an automated building model generation tool», in *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Juli 2014, S. 457–462. doi: 10.1109/INDIN.2014.6945556.
- [22] N. Robertson und T. Perera, «Automated data collection for simulation?», *Simulation Practice and Theory*, Bd. 9, Nr. 6, S. 349–364, Mai 2002, doi: 10.1016/S0928-4869(01)00055-6.
- [23] S. H. Han, M. Al-Hussein, S. Al-Jibouri, und H. Yu, «Automated post-simulation visualization of modular building production assembly line», *Automation in Construction*, Bd. 21, S. 229–236, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.007.
- [24] S. Prívará, J. Cigler, Z. Váňa, F. Oldewurtel, C. Sagerschnig, und E. Žáčková, «Building modeling as a crucial part for building predictive control», *Energy and Buildings*, Bd. 56, S. 8–22, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.10.024.

- [25] SIA, «SIA 180 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden». 1. Juli 2014.
- [26] SIA, «SIA 382-1 Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen». 1. Juli 2014.
- [27] «Welcome to eppy's documentation! — eppy 0.5.44 documentation». Zugegriffen: 20. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://pythonhosted.org/eppy/index.html>
- [28] R. Buffat, «rbuffat/pyidf». 13. Juni 2023. Zugegriffen: 20. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/rbuffat/pyidf>
- [29] «MeteoSchweiz IDAWEB: Willkommen beim IDAWEB!» Zugegriffen: 9. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/>
- [30] «Getting Started With Meteomatics Weather API | Meteomatics». Zugegriffen: 14. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.meteomatics.com/en/api/getting-started/>
- [31] «Weather API - OpenWeatherMap». Zugegriffen: 14. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://openweathermap.org/api>
- [32] Meteotest, «Wetter API», Meteotest. Zugegriffen: 14. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://meteotest.ch/wetter-api>
- [33] «SRF Weather | SRG-SSR Developer Portal». Zugegriffen: 14. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://developer.srgssr.ch/api-catalog/srf-weather>
- [34] «Wetter-API | Meteologix AG | Kachelmann Gruppe», meteologix. Zugegriffen: 14. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.business.meteologix.com/api>
- [35] C. Plesner, T. Larsen, und V. Leprince, *Calculation methods for single-sided natural ventilation - simplified or detailed?* 2016.
- [36] W. De Gids und H. Phaff, «Ventilation Rates and Energy Consumption Due to Open Windows», *Air Infiltration Review*, Bd. 4, Nr. 1, 1982.
- [37] P. R. Warren und L. M. Parkins, «Single-sided ventilation through open windows», in *Conf. proc. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, ASHRAE*, Florida, 1985.
- [38] U.S. Department of Energy, «EnergyPlus™ version 22.2.0 Documentation: Input-Output Reference». 28. September 2022.
- [39] U.S. Department of Energy, «EnergyPlus™ version 22.2.0 Documentation: Engineering Reference». 28. September 2022.
- [40] SNV Schweizerische Normenvereinigung, «SN EN ISO 7726:2001». 10. Mai 2001.
- [41] M. Hall und A. Geissler, «Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die energetische Flexibilität von Gebäuden», *Bauphysik*, Bd. 37, Apr. 2015, doi: 10.1002/bapi.201510011.
- [42] H. Lundström und M. Mattsson, «Radiation influence on indoor air temperature sensors: Experimental evaluation of measurement errors and improvement methods», *Experimental Thermal and Fluid Science*, Bd. 115, S. 110082, Juli 2020, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110082.
- [43] M. de Podesta, S. Bell, und R. Underwood, «Air temperature sensors: dependence of radiative errors on sensor diameter in precision metrology and meteorology», *Metrologia*, Bd. 55, Nr. 2, S. 229, Feb. 2018, doi: 10.1088/1681-7575/aaaa52.
- [44] «OpenStudio». Zugegriffen: 20. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://openstudio.net/>
- [45] «DesignBuilder Software Ltd - Home». Zugegriffen: 20. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://designbuilder.co.uk/>
- [46] «Eppy Tutorial — eppy 0.5.44 documentation». Zugegriffen: 20. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://pythonhosted.org/eppy/Main_Tutorial.html
- [47] «Welcome to Python.org», Python.org. Zugegriffen: 20. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.python.org/>
- [48] «EnergyPlus Weather File (EPW) Format». Zugegriffen: 18. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://designbuilder.co.uk/cahelp/Content/EnergyPlusWeatherFileFormat.htm>
- [49] «EPW Map». Zugegriffen: 18. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ladybug.tools/epwmap/>
- [50] «epw-Weatherfiles: WMO_Region_6_Europe_CHE_Switzerland». Zugegriffen: 18. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/CHE_Switzerland/index.html
- [51] «rbuffat/pyepw: Python EnergyPlus Weather File (EPW) Generator». Zugegriffen: 20. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/rbuffat/pyepw/tree/master>
- [52] Durrer-Technik, «Luft-Überströmelement mit integriertem Schalldämpfer». Zugegriffen: 18. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.durrer-technik.ch/luftfuehrungssysteme/luft-ueberstroemelement-mit-integriertem-schalldaempfer-typ-og/>
- [53] M. Diacon, «Anfrage bezüglich Lüftungsanlage AUE BS», 6. Mai 2024.

- [54] G. Chiesa, F. Fasano, und P. Grasso, «A New Tool for Building Energy Optimization: First Round of Successful Dynamic Model Simulations», *Energies*, Bd. 14, Nr. 19, Art. Nr. 19, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14196429.
- [55] «Unmet Hours». Zugegriffen: 8. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://unmet-hours.com/question/99170/how-can-i-connect-multiple-airloophvaczonesplitters-in-series-in-an-airflownetwork/>
- [56] «U-Wert Berechnung, Bauphysik online, Prof. f. Bauphysik, ETHZ». Zugegriffen: 6. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://archive.arch.ethz.ch/bph/Filep/Waerme/Waerme_Bauwerk/U-Wert_Berechnung.html
- [57] «Tropennacht - MeteoSchweiz». Zugegriffen: 16. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/tropennacht.html>
- [58] Waldhauser + Hermann AG, «Programmablauf Nachtauskühlung». 11. Juli 2022.
- [59] S. Hielscher, «Building Energy Modeling in der Konzept- und Betriebsoptimierung», FHNW, Institut für Nachhaltigkeit und Energie am Bau, Muttenz, Mai 2022.
- [60] J.-U. Schliebe, «Differenzierung der Luftarten in der Lüftungstechnik » LNET», LNET.Magazin. Zugegriffen: 8. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lueftungs.net/magazin/differenzierung-der-luftarten-in-der-lueftungstechnik/>
- [61] «ANSI/ASHRAE Standard 55-2013». ASHRAE, 2013.
- [62] SNV Schweizerische Normenvereinigung, «SN EN 13731:2002».
- [63] ASHRAE, *2017 ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017.
- [64] SNV Schweizerische Normenvereinigung, «SN EN ISO 7730:2005». 21. Oktober 2005.
- [65] ASHRAE, *2015 ASHRAE Handbook HVAC Applications*. Atlanta, GA: AHSRAE, 2015.
- [66] J. Maas und C.-A. Roulet, «Nighttime ventilation by stack effect», *ASHRAE Transactions*, S. 516–524, Jan. 1991.
- [67] BauNetz, «Thermische Behaglichkeit | Bauphysik | Glossar | Baunetz_Wissen», Baunetz Wissen. Zugegriffen: 19. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/t/thermische-behaglichkeit-6512028>

Theoretische Grundlagen

Begriffe der Lüftungstechnik

Im Kapitel 5 «Implementieren der Lüftungsanlage in bestehendes Simulationsmodell

» wird unter anderem detailliert darauf eingegangen, wie die Lüftungsanlage in das bestehende Simulationsmodell ergänzt wird. Dabei werden auch verschiedene spezifische Begriffe aus der Lüftungstechnik verwendet. Nachstehend werden diese mehrfach verwendeten Begriffe zu Beginn definiert, um sie als Grundlage für das Verständnis in dieser Arbeit einzuführen.

- **Monoblock:** Kompakte Bauweise einer Lüftungsanlage, bei der die verschiedenen Komponenten wie z.B. Wärmetauscher, Ventilatoren, Lufterhitzer, etc. alle in einem Gehäuse integriert sind.
- **Aussenluft (AUL):** Frischluft, welche von Ausserhalb des Gebäudes durch den Aussenluftkanal zum Monoblock geleitet wird.
- **Fortluft (FOL):** Luft, welche nach der Wärmerückgewinnung vom Monoblock aus dem Gebäude ins freie geleitet, wird.
- **Zuluft (ZUL):** Der Begriff Zuluft bezieht sich auf die Luft, welche im Monoblock konditioniert (z.B. erwärmt) wird und dann in die Räume bzw. thermischen Zonen verteilt wird.
- **Abluft (ABL):** Die Abluft ist das Gegenstück zur Zuluft. Es handelt sich hierbei um die Luft, welche aus den Räumen bzw. thermischen Zonen zurück zum Monoblock geführt wird und dort einer optionalen Wärmerückgewinnung unterzogen wird.
- **Umluft (UML)** Bei der Umluft handelt es sich um Luft, welche im Gebäude zirkuliert wird, ohne Aussenluft beizumischen. Das heisst es wird Luft aus den Räumen mittels eines Ventilators umgewälzt und bei Bedarf konditioniert (z.B. erwärmt) und gefiltert.
- **Mischluft:** Bei der Mischluft handelt es sich um Luft, welche wie die Umluft im Gebäude umgewälzt wird, jedoch mit einem zusätzlichen Anteil an Aussenluft, um die Luftqualität im Bereich der CO₂-Konzentration sicherstellen zu können.

Die Grundlagen für diese Begriffsdefinitionen wurden [60] entnommen und stellen allgemein gültige Terminologien dar.

Begriffe zur Temperatur

Im Zusammenhang mit den Auswertungen werden verschiedene Temperaturbegriffe verwendet. Diese sollen zu Beginn der Arbeit erläutert werden

Lufttemperatur (Mean Air Temperature)

Die Lufttemperatur t_a bezieht sich auf die Temperatur der Luft in einem Raum. Sie ist also die Temperatur, der den Menschen umgebenden Luft. [40, S. 8] Die durchschnittliche Lufttemperatur nach ASHRAE Standard 55 bezieht sich auf den Ort und die Zeit der Messung. Der räumliche Durchschnitt ist das numerische Mittel der Lufttemperatur in Höhe der Knöchel, der Taille und des Kopfes. Diese Ebenen sind 0.1, 0.6 sowie 1.1 m für sitzende Personen im Raum und 0.1, 1.1 sowie 1.7 m für stehende Personen. Die Zeitmittelung erfolgt über einen Zeitraum von mindestens drei

und höchstens 15 Minuten. [61, S. 3] Nach der Definition von EnergyPlus™ ist die «Zone Mean Air Temperature» wie auch die «Zone Air Temperature» die Durchschnittstemperatur der Lufttemperaturen im Systemzeitschritt. Die Zonenwärmebilanz nimmt eine gute Durchmischung der Luft im Modell an. Daher gibt es nur eine mittlere Lufttemperatur zur Darstellung der Lufttemperatur für die Zone. Der Unterschied der beiden Werte liegt darin, dass diese Temperatur auch für detaillierte Zeitschritte des Systems verfügbar ist. [38, S. 267]

Mittlere Strahlungstemperatur (Mean Radiant Temperature)

Die mittlere Strahlungstemperatur (mean radiation temperature, MRT) ist die Einheitstemperatur sämtlicher imaginärer umgebenden Flächen, die denselben Strahlungswärmeaustausch einer Person hervorrufen würde wie die tatsächlichen unterschiedlichen Temperaturen der umgebenden Flächen. [62, S. 9] Es ist also die gleichmässige Temperatur eines gedachten Hüllraumes, in dem die strahlungsbedingte Wärmeübertragung vom menschlichen Körper weg ebenso gross ist wie die in dem realen inhomogenen Hüllraum. [40, S. 8] Die Strahlungstemperatur bezieht sich dabei auf die Temperatur, die von einer Oberfläche in einem Raum ausgeht. Sie ist ein Mass für die thermische Strahlung, die von einer Oberfläche emittiert wird. Diese Temperatur wird durch die Temperatur und den Emissionsgrad der Oberfläche bestimmt. Die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) hingegen ist ein gewichteter Durchschnitt dieser Strahlungstemperaturen aller umgebenden Oberflächen, der die kombinierte Strahlungswirkung auf einen bestimmten Punkt im Raum beschreibt. Die MRT berücksichtigt somit die verschiedenen Temperaturen der Oberflächen und deren Position relativ zu einem Referenzpunkt, wie z.B. einem sitzenden oder stehenden Menschen, um die thermische Behaglichkeit zu bewerten. [40, S. 8] Die Definition der Strahlungstemperatur laut ASHRAE stimmt hiermit überein. ASHRAE beschreibt die Strahlungstemperatur als die Temperatur einer exponierten Oberfläche in der Umgebung. Die Temperaturen der einzelnen Oberflächen werden in der Regel zu einer mittleren Strahlungstemperatur zusammengefasst. [63, S. 191] In EnergyPlus™ wird die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) eines Raums als ein Mass für die kombinierten Auswirkungen der Temperaturen der Oberflächen in diesem Raum angegeben. Genauer gesagt ist sie der nach Fläche multipliziert mit dem Emissionsgrad gewichtete Durchschnitt der Oberflächentemperaturen im Inneren der Zone, wobei der Emissionsgrad der Wärmeabsorptionsgrad der inneren Materialschicht jeder Oberfläche ist. [38, S. 267]

Operative Temperatur (Zone Operative Temperature)

Die operative Temperatur t_o zeigt ihre Wichtigkeit durch ihre Verwendung bei der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit wie sie im Kapitel «**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**» beschrieben wurde. Die operative Temperatur wird definiert als «die gleichmässige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmässigen Umgebung». [11, S. 5] In den meisten Fällen in der Praxis, bei denen die relative Luftgeschwindigkeit eher gering ($< 0,2$ m/s) oder die Differenz zwischen mittlerer Strahlungstemperatur und Lufttemperatur ebenfalls gering ist (< 4 °C), kann die operative Raumtemperatur ausreichend genau durch den Mittelwert aus Luft- und mittlerer

Strahlungstemperatur berechnet werden. [40, S. 63] Die Formel dazu ist gemäss der SN EN ISO 7726 [64, S. 63] und dem ASHRAE Standard 55 [61, S. 16] übereinstimmend die folgende:

$$t_o = At_a + (1 - A)\bar{t}_r \quad (\text{Gl. } x)$$

wobei

t_o = operative Temperatur

t_a = mittlere Lufttemperatur

t_r = mittlere Strahlungstemperatur

A = Faktor in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit

Der Wert für A kann unter Verwendung der in der Tabelle 21 angegebenen Werte als Funktion der relativen Luftgeschwindigkeit v_{ar} (m/s) bestimmt werden.

Tabelle 21. Variablen zur Bestimmung A-Faktors

v_{ar} (Luftgeschwindigkeit)	<0.2 m/s	0.2 – 0.6 m/s	0.6 – 1.0 m/s
A (Faktor zur Berechnung)	0.5	0.6	0.7

Frühere Auswertungen [13] [5] der Abweichung zwischen mittlerer Strahlungstemperatur und Lufttemperatur haben ergeben, dass die Unterschiede immer gering ($< 4^\circ\text{C}$) waren. Somit kann für die Berechnungen der operativen Temperatur im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf die Gleichung **x** basiert werden. In EnergyPlus™ wird die operative Raumtemperatur ebenfalls nach der beschriebenen Gleichung berechnet, sodass auch hier eine Übereinstimmung vorliegt. [39, S. 1582]

Stoffwechsel Rate (metabolic rate, met)

Stoffwechselrate (met) ist die Rate der Umwandlung von chemischer Energie in Wärme und mechanische Arbeit durch die Stoffwechselaktivitäten einer Person pro Einheit der Hautoberfläche (ausgedrückt in met), die 58.2 W/m² entspricht, d. h. der Energie, die pro Einheit der Hautoberfläche einer durchschnittlichen Person im Sitzen in Ruhe erzeugt wird. [61, S. 3]

Kamineffekt

Der Kamineffekt, auch als Stack-Effekt bekannt, tritt auf, wenn es in einem mehrstöckigen Gebäude einen Temperaturunterschied zwischen der Innen- und Aussenseite gibt. Dieser Unterschied führt zu einer natürlichen Konvektion, bei der kältere Luft in die unteren Ebenen des Gebäudes eintritt und wärmere Luft in den oberen Ebenen austritt. Der Dichteunterschied zwischen der kalten, dichteren Aussenluft und der warmen, weniger dichten Innenluft erzeugt eine Auftriebskraft, die den Luftstrom antreibt. Der Effekt ist in höheren Gebäuden stärker ausgeprägt. Der Kamineffekt kann auch ohne Wind auftreten. Ein wichtiges Konzept dabei ist das Neutraldruckniveau (NPL), der Punkt in der Gebäudehöhe, an dem der Druck im Inneren des Gebäudes dem Aussendruck

entspricht. Über dem NPL verlässt die warme Luft das Gebäude, während unter dem NPL kalte Luft eintritt. [65] Dies ist in der Abbildung 39 so dargestellt.

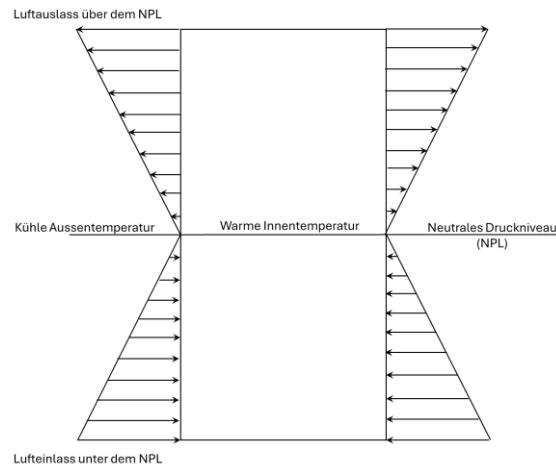


Abbildung 39. Darstellung des «Neutral Pressure Level» in der Mitte der Gebäudehöhe. Bei kühleren Aussentemperaturen als Innentemperaturen dringt die Luft unter dem NPL ins Gebäude ein und verlässt dieses über dem NPL wieder. (Darstellung angepasst aus [65])

Der Kamineffekt kann sowohl positive als auch negative Auswirkungen haben. Positiv wirkt er sich aus, wenn er als Teil der Lüftungsstrategie eingesetzt wird, insbesondere bei der nächtlichen Konvektionskühlung in massiven Gebäuden in Klimazonen mit grossen täglichen Temperaturschwankungen. [66] Negativ kann er sich auswirken, indem er Probleme mit Aufzugstüren verursacht, die sich aufgrund des Druckunterschieds nicht richtig schliessen, Schwierigkeiten beim Öffnen oder Schliessen von manuellen Türen, die Verbreitung von Rauch und Gerüchen durch den Luftweg des Kamineffekts sowie Heizprobleme in den unteren Bereichen des Gebäudes aufgrund des Zuflusses kalter Luft durch Eingangstüren. [63]

Thermische Behaglichkeit in Räumen

Die generelle Behaglichkeit einer Person ist weitgehend subjektiv zu beurteilen. Sie richtet sich nicht nur nach der Temperatur und Feuchte sondern auch nach weiteren Einflussgrössen wie Licht, Schall oder Farben [67] Demgegenüber steht die reine thermische Behaglichkeit, wie sie sowohl in der SN EN ISO 7730 «Thermische Behaglichkeit ist definiert als das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt» [64, S. 14] und dem ASHRAE Standard 55 «Thermal comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment.» [61, S. 19] klar definiert wird.

Anhang 1: Skript «eppyAUE»

```

# -*- coding: utf-8 -*-
# Letzte Änderung: 18.04.2024
# Status: Entwicklung, stabiler Lauf
# Autor: Philippe Marclay

# Dieses Skript startet das externe Skript «meteoatic_epw» und aktualisiert die EPW-Wetterdatei
# Mit dieser neuen epw-Datei wird dann die Simulation für das Objekt «AUE BS» in EnergyPlus durchgeführt
# Zudem können verschiedene Parameter für die Simulation verändert werden
# Weiter können verschiedene Varianten simuliert und ausgewertet werden
# Das Skript sowie die entsprechenden Funktionsbibliotheken müssen in Ausführungsreihenfolge hinterlegt sein.
# Einige strukturelle Grundlagen basieren auf dem Skript «batch_AUE.py» von Achim Geissler, FHNW
#
# AUE BS - Simulations-Engine für EnergyPlus

# Importieren der benötigten Libraries (vor der Nutzung via pip install herunterladen)
import os
import subprocess
import sys
import math
import json
import humanfriendly
import pandas as pd
from datetime import datetime
from datetime import datetime, timedelta
import datetime

from eppy import modeleditor
from eppy.modeleditor import IDF
import shutil
import matplotlib.pyplot as plt

# Dateipfade festlegen (Dateiablageort am Speicherort des Skripts festlegen)
os.chdir(os.path.dirname(__file__))

# Pfad zur Original IDF- und IDD-Datei
idd_file = "AUEBSepwrunfile" # Template --> bleibt immer unverändert
idd_file = "Energy"

# Abrufen des externen Skript «meteoatic_epw» zur Bereitstellung der neuen epw-Datei (Wetterdaten)
subprocess.run(['python', 'meteoatic_epw.py'])

# Wetterdatei (Weather-File) - gewünschte Datei angeben i.d.R. «modified_epw_file», welches automatisch angepasst wird
cfn_list = ['BAS01 : CHE_BSL_Basel_Einmengen_066010_TWR_2004-2018.epw',
            'BKL11 : BKL1_2005_RCP85_lim10-warmsummer.epw',
            'BKL14 : BKL1_2006_RCP26_lim10-warmsummer.epw',
            'BAS03 : CHE_BSL_Basel_0bstakes_05-09-2023_IDL.epw',
            'API' : 'modified_epw_file.epw']

cfn_file = cfn_list['BAS03'] # Wetterdaten aus der API-Bereitstellung

# IDD und IDF laden (EnergyPlus Modell-Grundlagen)
idd_file_path = str(idd_file) + ".idd"
idd_file_path = str(idd_file_path) + ".idd"
idf_setidname(idd_file_path)
idf_model = IDF(idd_file_path, cfn_file)

#####
# SIMULATIONSVORGABEN (Timesteps, Runtime, Algorithm) für EnergyPlus (File Anpassung)
#
# Simulations-Zeitschritte (Timesteps per Hour)

tspht[20] # 10, 12, 15, 20, 60'; # anpassen
simstep = int(tspht[20])

# Simulations-Laufzeit (Runtime)
# Tag festlegen für Simulationsstart
today = datetime.datetime.now()
tomorrow = today + datetime.timedelta(days=1)
fivedays = today + datetime.timedelta(days=5)

td = today.day
tdm = today.month
tm = tomorrow.day
tmm = tomorrow.month
tid = fivedays.day
tim = fivedays.month

# FD:From Date / PM:From Month / TD:To Date / TM:To Month / PPMax:Max. Warmup-Days / PPMIn:Min. Warmup-Days
PM = { 'sun' : { 'FD' : 16, 'PM' : 4, 'TD' : 15, 'TM' : 10, 'PPMax' : 40, 'PPMin' : 10},
        'win1' : { 'FD' : 1, 'PM' : 1, 'TD' : 3, 'TM' : 1, 'PPMax' : 30, 'PPMin' : 10},
        'win2' : { 'FD' : 16, 'PM' : 10, 'TD' : 31, 'TM' : 12, 'PPMax' : 30, 'PPMin' : 10},
        'year' : { 'FD' : 1, 'PM' : 1, 'TD' : 31, 'TM' : 12, 'PPMax' : 30, 'PPMin' : 10},
        'trnsun' : { 'FD' : 1, 'PM' : 4, 'TD' : 15, 'TM' : 6, 'PPMax' : 40, 'PPMin' : 10},
        'trnsun' : { 'FD' : 15, 'PM' : 9, 'TD' : 31, 'TM' : 10, 'PPMax' : 40, 'PPMin' : 10},
        'testsun' : { 'FD' : 1, 'PM' : 1, 'TD' : 5, 'TM' : 8, 'PPMax' : 5, 'PPMin' : 2},
        'testwin' : { 'FD' : 27, 'PM' : 1, 'TD' : 5, 'TM' : 2, 'PPMax' : 5, 'PPMin' : 2},
        'test' : { 'FD' : 16, 'PM' : 4, 'TD' : 15, 'TM' : 10, 'PPMax' : 10, 'PPMin' : 5},
        'weeksun' : { 'FD' : 20, 'PM' : 7, 'TD' : 27, 'TM' : 7, 'PPMax' : 2, 'PPMin' : 1},
        'weeksun' : { 'FD' : 1, 'PM' : 1, 'TD' : 7, 'TM' : 1, 'PPMax' : 2, 'PPMin' : 1},
        'tempdrop' : { 'FD' : 22, 'PM' : 8, 'TD' : 2, 'TM' : 9, 'PPMax' : 30, 'PPMin' : 10},
        'realtime' : { 'FD' : td, 'PM' : tdm, 'TD' : tm, 'TM' : tmm, 'PPMax' : 30, 'PPMin' : 10},
        'fivedays' : { 'FD' : td, 'PM' : tdm, 'TD' : tm, 'TM' : tmm, 'PPMax' : 30, 'PPMin' : 10}
    }
period_list = [ 'tempdrop' ] # anpassen

# Simulations-Algorithmus (HeatBalanceAlgorithm)
algo_list = { 'CFD' : 'ConductionTransferFunction',
              'CondFD' : 'ConductionFiniteDifference' }
algo = algo_list['CondFD'] # 'CondFD' # anpassen

# Modell gemäß Vorgaben anpassen
# Grundanpassung von Timestep, RunPeriod und Algorithm
#
# Timestep anpassen
idf_model.idfobjects['TIMESTEP'][0].Number_of_Timesteps_per_Hour = tspht[0]

# Runperiod im Modell anpassen
value_fm = PM[period_list[0]]['FD']
value_fm = PM[period_list[0]]['PM']
value_td = PM[period_list[0]]['TD']
value_tm = PM[period_list[0]]['TM']
start_date = str(value_fm) + "-" + str(value_fm) + "-" + "00:00"

idf_model.idfobjects['RUNPERIOD'][0].Begin_Month = value_fm
idf_model.idfobjects['RUNPERIOD'][0].Begin_Day_of_Month = value_fm
idf_model.idfobjects['RUNPERIOD'][0].End_Month = value_tm
idf_model.idfobjects['RUNPERIOD'][0].End_Day_of_Month = value_tm

# Warmupdays im Modell anpassen
wert_minwarmup = PM[period_list[0]]['PPMin']
wert_maxwarmup = PM[period_list[0]]['PPMax']

idf_model.idfobjects['BUILDING'][0].Maximum_Number_of_Warmup_Days = wert_maxwarmup
idf_model.idfobjects['BUILDING'][0].Minimum_Number_of_Warmup_Days = wert_minwarmup

# HeatBalanceAlgorithm anpassen
idf_model.idfobjects['HEATBALANCEALGORITHM'][0].Algorithm = algo

#####
# ANPASSUNGSVORGABEN VARIANTEN (People, Schedules, Lights, Electric Equipment,))
# PEOPLE (Personenbelegung)
# Verschiedene Szenarien können festgelegt werden, beliebig erweiterbar (Personen pro Zone)
# GB = Großraumbüro / CA = Cafeteria / KO = Konferenzraum/Sitzungsraum / BU = Büro
PPL = { 'low' : { 'GB' : 4, 'CA' : 10, 'KO' : 2, 'BU' : 2},
        'medium' : { 'GB' : 7, 'CA' : 16, 'KO' : 4, 'BU' : 4},
        'high' : { 'GB' : 12, 'CA' : 22, 'KO' : 6, 'BU' : 6} }

# SCHEDULES (Zeitliche Verfügbarkeit)
# ggf noch ergänzen--> if predicted temperature < 20°C start NAK earlier
def format_time(t):
    #Formatiert eine datetime.time-Instanz als 'HH:MM' oder als '24:00' für Mitternacht.
    if t.hour == 0 and t.minute == 0:
        return "24:00"
    else:
        return t.strftime("%H:%M")

# Erstellen der Liste mit verschiedenen NAK-Konfigurationen (darstellung wie in EP «Schedule:Day:Interval»)
# T1 = Time 1 / VUT1 = Value until Time 1, etc.
NAK = {
    'off': {
        'T1': datetime.time(8, 0), # 8 Uhr morgens (hours, minutes)
        'VUT1': 0, # Value until Time 1: 0:00 / 1:00
        'T2': datetime.time(19, 30), # 19:30 Uhr
        'VUT2': 0
        'T3': datetime.time(0, 0), # Mitternacht (muss als 24:00 ausgegeben werden, siehe def format_time)
        'VUT3': 0
    },
    'early': {
        'T1': datetime.time(8, 0), # 8 Uhr morgens
        'VUT1': 1, # Value until time 1 (läuft bis 08:00 Uhr)
        'T2': datetime.time(18, 0), # 18:00 Uhr
        'VUT2': 0, # Value until time 2 (ausgeschalten bis 18:00 Uhr)
        'T3': datetime.time(0, 0), # Mitternacht (wird als 24:00 ausgegeben)
        'VUT3': 1
    },
    'regular': {
        'T1': datetime.time(7, 30), # 8 Uhr morgens
        'VUT1': 1,
        'T2': datetime.time(20, 0), # 19:30 Uhr
        'VUT2': 0,
        'T3': datetime.time(0, 0), # Mitternacht (wird als 24:00 ausgegeben)
        'VUT3': 1
    }
}

#####
# VARIANTEN-Loop
# Neuen Ordner für die Simulationsergebnisse erstellen
# Einbezug Name Klimadatei
for cfn in cfn_list:

```

```

# Einbezug Anzahl Zeitschritte
for ts in tsph:
    # Einbezug Algorithmus-Name
    for algo in algo_list:
        # Einbezug Zeiterindename
        for per in period_list:
            # Definieren des neuen Ordnernamens
            directory_name = str(idf_file) + "_" + str(cln) + "_" + str(tsph[0]) + "_" + str(algo) + "_" + str(per)
            variant_name = str(directory_name)
            os.makedirs(output_directory, exist_ok=True)
            # Liste der erwarteten Output-Dateien von EnergyPlus definieren
            expected_files = ['eplussout.bnd', 'eplussout.csv', 'eplussout.eso', 'eplussout.end', 'eplussout.err', 'eplussout.eso', 'eplussout.mtd', 'eplussout.dxf', 'eplussout.mdd', 'eplussout.rdd', 'eplussout
            # definieren der eppy-von_end_simulation Funktion (was passiert am Schluss des Simulationsdurchlaufs)
            def on_end_simulation():
                global current_variant # Nutzt die globale Variable für den Variantennamen
                for file_name in expected_files:
                    original_path = os.path.join(output_directory, file_name)
                    if os.path.exists(original_path):
                        new_name = f'{current_variant}_{file_name}'
                        new_path = os.path.join(output_directory, new_name)
                        shutil.move(original_path, new_path)
                        print(f'Datei {file_name} umbenannt zu {new_name} und nach {output_directory} verschoben.')
                    else:
                        print(f'Warnung: {file_name} wurde nicht gefunden in {output_directory}.')
            # Hier muss angegeben werden, welche vordefinierte Liste (PPL und NAK) für Varianten genutzt werden sollen (siehe oben)
            # PPL: low, medium oder high (Belagung) und NAK: early, regular oder off (Verfügbarkeit der Nachtauskühlung)
            variants = {
                'Variante 1': {
                    'people_list': 'low',
                    'nak_list': 'early'
                },
                'Variante 2': {
                    'people_list': 'high',
                    'nak_list': 'regular'
                },
                'Variante 3': {
                    'people_list': 'medium',
                    'nak_list': 'off'
                }
            }
            # Loop-Hauptteil, der sich für alle Varianten wiederholt
            for variant, settings in variants.items():
                current_variant = variant
                print(f'Arbeite an {variant}...')
                # PEOPLE anpassen
                ppl_list = settings['people_list']
                ppl_groessraumbero = PPLppl_list[0][1][0][8]
                ppl_cafeteria = PPLppl_list[0][1][1][4]
                ppl_stuengszimmer = PPLppl_list[0][1][1][10]

                ppl_buero = PPLppl_list[0][1][1][10]

                idf_model.idfobjects['PEOPLE:1:20'].Number_of_People = ppl_buero
                idf_model.idfobjects['PEOPLE:1:20'].Number_of_People = ppl_cafeteria
                idf_model.idfobjects['PEOPLE:1:30'].Number_of_People = ppl_groessraumbero
                idf_model.idfobjects['PEOPLE:1:1:1'].Number_of_People = ppl_stuengszimmer

                # SCHEDULE anpassen
                nak_list = settings['nak_list']
                value_T1 = format_time(NAKnak_list[0][1][T1])
                value_WUT1 = NAKnak_list[0][1][WUT]
                value_T2 = format_time(NAKnak_list[0][1][T2])
                value_WUT2 = NAKnak_list[0][1][WUT]
                value_T3 = format_time(NAKnak_list[0][1][T3])
                value_WUT3 = NAKnak_list[0][1][WUT]

                idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL:1:0'].Time_1 = str(value_T1)
                idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL:1:0'].Value_Unit1_Time_1 = str(value_WUT1)
                idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL:1:0'].Time_2 = str(value_T2)
                idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL:1:0'].Value_Unit1_Time_2 = str(value_WUT2)
                idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL:1:0'].Time_3 = str(value_T3)
                idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL:1:0'].Value_Unit1_Time_3 = str(value_WUT3)

                # Modell speichern und Simulation ausführen
                filename = os.path.join('model_variation_replace', '_', '_').idf
                idf_model.save(filename)
                print(f'Modell {variant} gespeichert als {filename}.')
                idf_model.run(output_directory=output_directory)
                on_end_simulation()
                print(f'Simulation für {variant} ausgeführt.')

#####
# AUSWERTUNG
import os
import matplotlib.pyplot as plt
from datetime import datetime, timedelta

def read_specific_temperature_data(file_path, zone, parameter):
    index_to_data = {}
    with open(file_path, 'r') as file:
        for line in file:
            if line.strip().startswith('End of Data Dictionary'):
                break
            if ' ' in line:
                parts = line.split(' ')
                if len(parts) == 4 and parts[0].isdigit():
                    index = parts[0].strip()
                    zone_label = parts[1].strip()
                    data_label = parts[2].strip()
                    if zone_label in index and parameter.lower() in data_label.lower():
                        index_to_data[index] = data_label

    results = []
    with open(file_path, 'r') as file:
        results_section = False
        for line in file:
            if 'End of Data Dictionary' in line:
                results_section = True
                continue
            if results_section and ' ' in line:
                parts = line.split(' ')
                if len(parts) == 2 and parts[0].strip() in index_to_data:
                    index = parts[0].strip()
                    value = float(parts[1].strip())
                    data_label = index_to_data[index]
                    results.append((data_label, value))

    return results

def generate_time_labels(start_time, interval_minutes, num_points):
    """
    #Generiere Zeitlabels im 4-Stunden-Takt.
    #param start_time: Startzeit als datetime-Objekt.
    #param interval_minutes: Minuten zwischen den Messwerten.
    #param num_points: Anzahl der Messpunkte.
    #return: Liste von Tupeln mit (Index des Punktes, Zeitlabel).
    """
    labels = []
    current_time = start_time
    for i in range(num_points):
        if current_time.hour % 4 == 0 and current_time.minute == 0:
            # Füge das Label nur alle 4 Stunden hinzu
            labels.append((i, current_time.strftime('%d %m %H:%M')))
            current_time += timedelta(minutes=interval_minutes)
    return labels

def plot_temperature_data(temperatures, start_time_str, interval_minutes, filename):
    values = [value for _, value in temperatures]
    start_time = datetime.strptime(start_time_str, '%d %m %H:%M')
    time_labels = generate_time_labels(start_time, interval_minutes, len(temperatures))
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(values, marker='o', linestyle='-', color='b')
    if time_labels:
        ticks, labels = zip(*time_labels)
        plt.xticks(ticks, labels, rotation=45, ha='right')
    plt.title(f'Zone Operative Temperature [C] - {variant} - {zone_name}')
    plt.xlabel('Uhrzeit')
    plt.ylabel('Temperature [C]')
    plt.grid(True)
    plt.tight_layout()
    plt.savefig(filename) # Speichert den Plot als PNG
    plt.close()

def calculate_average_temperature(temperatures):
    values = [value for _, value in temperatures]
    return sum(values) / len(values) if values else 0

# Varianten und Parameter festlegen
variants = ['Variante 1', 'Variante 2', 'Variante 3']
zones = [
    'THERMAL_ZONE: A 01 0:0',
    'THERMAL_ZONE: A 02 0:0',
    'THERMAL_ZONE: A 03 0:0',
    'THERMAL_ZONE: A 04 0:0',
    'THERMAL_ZONE: A 05 0:0',

```

```
]
parameter = "Zone Operative Temperature [C]"
start_time_str = start_date
interval_minutes = simustep

# Durch die Varianten iterieren
for variant in variants:
    for zone in zones:
        file_path = f'{output_directory}/{variant}.eplusout.eso'
        results = read_specific_temperature_data(file_path, zone, parameter)
        #print(variant, zone)
        zone_name = (zone[-8:])
        #print(zone)

        plot_filename = f'{output_directory}/{variant}_{zone_name}_temperature_plot.png'
        plot_temperature_data(results, start_time_str, interval_minutes, plot_filename)

    if results:
        # Plot erstellen und speichern
        #zone_name = zone
        plot_filename = f'{output_directory}/{variant}_{zone_name}_temperature_plot.png'
        plot_temperature_data(results, start_time_str, interval_minutes, plot_filename)
        #print(f'Plot für {variant} gespeichert als {plot_filename}.')

        # Durchschnittstemperatur berechnen und ausgeben
        average_temp = calculate_average_temperature(results)
        print(f'Durchschnittstemperatur für {variant}_{zone_name}: {average_temp:.2f} °C')
    else:
        print(f'Keine Temperaturdaten gefunden für {variant}.')
```

Anhang 2: Skript «meteomatics_epw»

```

# -*- coding: utf 8 -*-
# Letzte Änderung: 12.04.2024
# Status: Produktion
# Autor: Philippe Marclay
#
# Dieses Skript führt eine API-Anfrage an die Meteomatics Weatherforecast API durch
# Die Daten werden verarbeitet und schliesslich in eine neue epw-Datei implementiert
# Das Skript sowie die entsprechenden Funktionsbibliotheken müssen
# in Ausführungsreihenfolge hinterlegt sein

# Generieren einer neuen EPW-Datei mit Vorhersagedaten der Meteomatics API

# Importieren der benötigten Libraries/Module (vor der Nutzung via pip install herunterladen)
import os
import datetime as dt
import meteomatics.api as api
from pyepw.epw import EPW

os.chdir(os.path.dirname(__file__))

# LOGIN-Information für Meteomatics API hinterlegen
# siehe auch https://www.meteomatics.com/en/api/data-connectors/python/ für weitere Informationen --> 14 Tage gratis Nutzung
username = 'fhw-marclay.philippe@master'
password = 'fYfppa@DV5C'

# Längen und Breitengraden des gewünschten Vorhersagestandort für die Koordinaten angeben
latitude = 47.5505
longitude = 7.5871
coordinates = [(latitude, longitude)] #47.5505, 7.5871 Objekt AUF BS

# Anfrageparameter für die API angeben (verfügbare Parameter unter: https://www.meteomatics.com/en/api/available-parameters/alphabetic-list/)
parameters = ['t_2m:C', 'relative_humidity_00z:p', 'pressure_00z:hPa', 'global_rad:W', 'direct_rad:W', 'diffuse_rad:W', 'is_rain_1h:idx', 'precip_1h:mm', 'wind_speed_10m:ms', 'wind_dir_10m:d']
model = 'mls'
startdate = dt.datetime.utcnow().replace(hour=12, minute=0, second=0, microsecond=0) - dt.timedelta(days=20)
enddate = startdate + dt.timedelta(days=20)
interval = dt.timedelta(hours=1)

# Definieren des Dataframes (df)
df = api.query_line_series(coordinates, startdate, enddate, interval, parameters, username, password, model=model, calibrate=True) #calibrate=True --> Vergangenheitsdaten werden anhand von

# Zeige die ersten 5 Zeilen des Dataframes an, um sicherzustellen, dass die Daten korrekt abgerufen wurden
print(df.head())

# Zugriff auf die einzelnen Spalten für die abgerufenen Parameter
temperature_values = df['t_2m:C']
humidity_values = df['relative_humidity_00z:p']
pressure_values = df['pressure_00z:hPa']
global_rad_values = df['global_rad:W']
dirrad_values = df['direct_rad:W']
difrad_values = df['diffuse_rad:W']
rain_values = df['is_rain_1h:idx']
precip_values = df['precip_1h:mm']
windspeed_values = df['wind_speed_10m:ms']
winddirection_values = df['wind_dir_10m:d']

# Abrufen der epw-Vorlagedatei zur weiteren Bearbeitung
epw = EPW()
epw.read("epwtemplate2021.epw")

# Loop über die spezifizierten Daten und die Zeit zum einfügen der über die API abgerufenen Werte in die epw-Datei
current_date = startdate
while current_date <= enddate:
    # Berechne das Datum und die Zeit für epw-Datei wegen unterschiedlicher Formatierung (00:00 == Stunde 24 in epw)
    if current_date.hour == 0: # Wenn Mitternacht
        epw_date = current_date - dt.timedelta(hours=1) # Gehe eine Stunde zurück
        epw_hour = 24 # Setze die Stunde auf 24
    else:
        epw_date = current_date
        epw_hour = current_date.hour
    specific_date = current_date.isoformat() + "+02:00" # Korrektur der UTC-Time für Sommerzeit
    if (latitude, longitude, specific_date) in df.index:
        specific_temperature = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 't_2m:C']
        specific_humidity = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'relative_humidity_00z:p']
        specific_pressure = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'pressure_00z:hPa']
        specific_global_radiation = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'global_rad:W']
        specific_direct_radiation = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'direct_rad:W']
        specific_diffuse_radiation = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'diffuse_rad:W']
        specific_rain_value = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'is_rain_1h:idx']
        specific_precip_value = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'precip_1h:mm']
        specific_wind_speed = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'wind_speed_10m:ms']
        specific_wind_direction = df.loc[(latitude, longitude, specific_date), 'wind_dir_10m:d']
        # Implementieren der abgerufenen Daten in der epw-Datei
        for wd in epw.weatherdate:
            if wd.year == epw.date.year and wd.month == epw.date.month and \
                wd.day == epw.date.day and wd.hour == epw_hour and \
                wd.minute == epw.date.minute:
                    wd.dry_bulb_temperature = specific_temperature # Setze die Temperatur
                    wd.relative_humidity = specific_humidity
                    wd.atmospheric_station_pressure = specific_pressure*100 #Multiplikation mit 100 um vom hPa zu Pa für EPW Format zu kommen
                    wd.global_horizontal_radiation = specific_global_radiation
                    wd.direct_normal_radiation = specific_direct_radiation
                    wd.diffuse_horizontal_radiation = specific_diffuse_radiation
                    wd.wind_speed = specific_wind_speed
                    wd.wind_direction = specific_wind_direction
                    #wd.present_weather_observation =
                    #wd.present_weather_codes =
                    break
            current_date += interval

# Speichern der epw-Datei
epw.save("modified_epw_file.epw")

# Ende des Skript

```

Anhang 3: Skript «AUEbuildingregulation»

```

# *. coding: utf-8 *.
# Letzte Änderung: 15.07.2024
# Status: Entwicklung, stabiler Lauf
# Autor: Philippe Marclay
#
# Dieses Skript startet das externe Skript «meteoromatic_epw» und aktualisiert die epw-Wetterdatei
# Mit dieser neuen epw-Datei wird dann die Simulation für das Objekt «AUE_BS» in EnergyPlus durchgeführt
# Es werden Varianten für den Setpoint der Zieltemperatur der Nachtauskühlung
# sowie Zeitliche Vorgaben für die Nachtauskühlung gemacht. Die simulierten Varianten werden
# ausgewertet und miteinander verglichen und die Setpoints der Besten Variante ausgegeben
# sodass diese in die GUI überführt werden können.
#
# Das Skript sowie die entsprechenden Funktionsbibliotheken müssen in Ausführungsreihenfolge hinterlegt sein.
# Einige strukturelle Grundlagen basieren auf dem Skript «batch_AUE.py» von Achim Geissler, FHNW
# AUE_BS - Simulations-Engine für EnergyPlus
#
# Importieren der benötigten Libraries (vor der Nutzung via pip install herunterladen)

import os
import subprocess
import sys
import math
import json
import humanfriendly
import pandas as pd
from datetime import datetime
from datetime import timedelta
import datetime
from eppy import modeleditor
from eppy.modeleditor import IDF
import shutil
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.integrate import simpson

# Dateipfade festlegen (Dateiablageort am Speicherort des Skripts festlegen)
os.chdir(os.path.dirname(__file__))

# Pfad zur Original IDF- und IDD-Datei
idf_file = "AUE_BS" # Template -> bleibt immer unverändert
idd_file = "Energy"

# Aufrufen des externen Skript «meteoromatic_epw» zur Bereitstellung der neuen epw-Datei (Wetterdaten)
subprocess.run(['python', 'meteoromatic_epw.py'])

# Wetterdatei (Weather-File) - gewünschte Datei angeben i.d.R. «modified_epw_file», welches automatisch angepasst wird
clm_list = ['BAS01': 'CHE_B1_Basel_Binnungen_066010_TMYx_2004-2018_epw',
            'BKLI10': 'BKLI10_RCP85_lin10-warmsummer_epw',
            'BKLI14': 'BKLI14_RCP85_lin10-warmsummer_epw',
            'BAS03': 'CHE_BS_Base1_ObjektAUEBS_05-09-2023_IDM_epw',
            'API': 'modified_epw_file.epw']

clm_file = clm_list['API'] # Wetterdaten aus der API-Bereitstellung

# IDD und IDF laden (EnergyPlus Modell-Grundlagen)
idf_file_path = str(idf_file) + '.idf'
idd_file_path = str(idd_file) + '.idd'
IDF.setidname(idf_file_path)
IDD.setidname(idd_file_path)
idf_model = IDF(idf_file_path, clm_file)

#####
# SIMULATIONSVORGABEN (Algorithmus für EnergyPlus Five Anpassung)
#
# Simulations-Zeitschritte (Timesteps per Hour)
timestep = 10 # 10, 15, 20, 30 # anpassen
simustep = int(60/timestep)

# Simulations-Laufzeit (Runtime)
# Tag festlegen für Simulationsstart
today = datetime.datetime.now()
tomorrow = today + datetime.timedelta(days=1)
fivedays = today + datetime.timedelta(days=5)

td = today.day
tm = today.month
tmn = tomorrow.month
fid = fivedays.day
fimd = fivedays.month

# FdFrom Date / FmFrom Month / TDTo Date / TMTo Month / PPHMax:Max. Warmup-Days / PPHMin:Min. Warmup-Days
PM = { 'sun' : { 'FD' : 16, 'FM' : 4, 'TD' : 15, 'TM' : 10, 'PPHmax' : 40, 'PPHmin' : 10},
        'win1' : { 'FD' : 16, 'FM' : 1, 'TD' : 31, 'TM' : 12, 'PPHmax' : 30, 'PPHmin' : 10},
        'year' : { 'FD' : 1, 'FM' : 1, 'TD' : 31, 'TM' : 12, 'PPHmax' : 30, 'PPHmin' : 10},
        'trnsun' : { 'FD' : 4, 'FM' : 15, 'TD' : 15, 'TM' : 6, 'PPHmax' : 40, 'PPHmin' : 10},
        'trnsun' : { 'FD' : 15, 'FM' : 8, 'TD' : 31, 'TM' : 10, 'PPHmax' : 40, 'PPHmin' : 10},
        'testsun' : { 'FD' : 27, 'FM' : 7, 'TD' : 9, 'TM' : 8, 'PPHmax' : 0, 'PPHmin' : 25},
        'test' : { 'FD' : 27, 'FM' : 1, 'TD' : 5, 'TM' : 2, 'PPHmax' : 0, 'PPHmin' : 25},
        'weeksun' : { 'FD' : 18, 'FM' : 4, 'TD' : 19, 'TM' : 4, 'PPHmax' : 10, 'PPHmin' : 5},
        'weeksun' : { 'FD' : 20, 'FM' : 7, 'TD' : 27, 'TM' : 2, 'PPHmax' : 0, 'PPHmin' : 15},
        'weeksun' : { 'FD' : 10, 'FM' : 1, 'TD' : 17, 'TM' : 1, 'PPHmax' : 2, 'PPHmin' : 13},
        'tempmod' : { 'FD' : 22, 'FM' : 8, 'TD' : 2, 'TM' : 9, 'PPHmax' : 30, 'PPHmin' : 10},
        'realtime' : { 'FD' : 'td', 'FM' : 'tm', 'TD' : 'tm', 'TM' : 'tmn', 'PPHmax' : 30, 'PPHmin' : 10},
        'fivedays' : { 'FD' : 'td', 'FM' : 'tm', 'TD' : 'fid', 'TM' : 'fimd', 'PPHmax' : 30, 'PPHmin' : 10} }

period_list = [ realime ] # anpassen

# Simulations-Algorithmus (HeatBalanceAlgorithm)
algo_list = { 'CTF' : { 'ConductionTransferFunction' },
              'CondFD' : { 'ConductionInteDifference' },
              'CondFD' : { 'CondFD' } # anpassen }

# Modell gemäß Vorgaben anpassen
# Grundanpassung von Timestep, RunPeriod und Algorithm
# Timestep anpassen
idf_model.idfobjects['Timestep'][0].Number_of_timesteps_per_hour = timestep

# Runperiod im Modell anpassen
value_fd = PM[period_list[0]]['FD']
value_fm = PM[period_list[0]]['FM']
value_td = PM[period_list[0]]['TD']
value_tm = PM[period_list[0]]['TM']

start_date = str(value_fd) + '-' + str(value_fm) + '-' + '00:00'
idf_model.idfobjects['RunPeriod'][0].Begin_Month = value_fm
idf_model.idfobjects['RunPeriod'][0].Begin_Day_of_Month = value_td
idf_model.idfobjects['RunPeriod'][0].End_Month = value_tm
idf_model.idfobjects['RunPeriod'][0].End_Day_of_Month = value_tm

# Warmupdays im Modell anpassen
wert_minwarmup = PM[period_list[0]]['PPHmin']
wert_maxwarmup = PM[period_list[0]]['PPHmax']
idf_model.idfobjects['BUILDING'][0].Maximum_Number_of_Warmup_Days = wert_maxwarmup
idf_model.idfobjects['BUILDING'][0].Minimum_Number_of_Warmup_Days = wert_minwarmup

# HeatBalanceAlgorithm anpassen
idf_model.idfobjects['HEATBALANCEALGORITHM'][0].Algorithm = algo

#####
# ANPASSUNGSVORGABEN VARIANTEN (People, Schedules, (Lights, Electric Equipment,))
#
# PEOPLE (Personenbelegung)
# Verschiedene Szenarien können festgelegt werden, beliebig erweiterbar (Personen pro Zone)
# GB = Grossraumbüro / CA = Cafeteria / KO = Konferenzraum-Sitzungsraum / BU = Buero
PPL = { 'low' : { 'GB' : 4, 'CA' : 10, 'KO' : 2, 'BU' : 2},
        'medium' : { 'GB' : 2, 'CA' : 15, 'KO' : 4, 'BU' : 4},
        'high' : { 'GB' : 12, 'CA' : 12, 'KO' : 6, 'BU' : 4} }

# SCHEDULES (Zeitliche Verfügbarkeit)
def format_time(t):
    # Formatiert eine datetime.time-Instanz als 'HH:MM' oder als '24:00' für Mitternacht.
    if t.hour == 0 and t.minute == 0:
        return "24:00"
    else:
        return t.strftime("%H:%M")

# Erstellen der Liste mit verschiedenen NAM-Konfigurationen (darstellung wie in EP «Schedule:Day:Interval»)
# T1 = Time 1 / VUT1 = Value until Time 1, etc.
NAM = {
    'early': {
        'T1': datetime.time(5, 0), # 8 Uhr morgens (hours, minutes)
        'VUT1': 1, # Value until Time 1 (Lauf bis 08:00 Uhr)
        'T2': datetime.time(19, 30), # 19:30 Uhr
        'VUT2': 0,
        'T3': datetime.time(0, 0), # Mitternacht (muss als 24:00 ausgegeben werden, siehe def format_time)
        'VUT3': 1
    },
    'inbetween': {
        'T1': datetime.time(6, 0), # 8 Uhr morgens
        'VUT1': 1, # value until time 1 (Lauf bis 08:00 Uhr)
        'T2': datetime.time(15, 30), # 15:30 Uhr
        'VUT2': 0, # value until time 2 (ausgeschaltet bis 15:30 Uhr)
        'T3': datetime.time(0, 0), # Mitternacht (wird als 24:00 ausgegeben)
        'VUT3': 1
    },
    'regular': {
        'T1': datetime.time(8, 0), # 8 Uhr morgens
        'VUT1': 1,
        'T2': datetime.time(19, 30), # 19:30 Uhr
        'VUT2': 1,
        'T3': datetime.time(0, 0), # Mitternacht (wird als 24:00 ausgegeben)
        'VUT3': 1
    }
}

# Anpassen der Zieltemperatur (Setpoint) für die Nachtauskühlung in °C
SET = { 'lowest' : { 'Setpoint' : 16},
        'intermediate' : { 'Setpoint' : 17},

```

```

'regular' : {'setpoint' : 19})

#####
# VARIANTEN-Loop
# Neuen Ordner für die Simulationsergebnisse erstellen
# Einbezug Name Klimadaten:
for clim in clim_list:
    # Einbezug Anzahl Zeitschritte
    for ts in tsph:
        # Einbezug Algorithmus-Name
        for algo in algo_list:
            # Einbezug Zeitperiodenname
            for per in period_list:
                # Definieren des neuen Ordners
                directory_name = str(idf_file) + "_" + str(clim) + "_" + str(tsph[0]) + "_" + str(algo) + "_" + str(per)
                variant_name=str(directory_name)
                output_directory = variant_name
                os.mkdir(output_directory, exist_ok=True)
                # Liste der erwarteten Output-Dateien von EnergyPlus definieren
                expected_files = ['epusout.bnd', 'epusout.csv', 'epusout.eso', 'epusout.end', 'epusout.err', 'epusout.mtd', 'epusout.dxf', 'epusout.mdd', 'epusout.rdd', 'epusout']
                # Definieren der eppy-von_end_simulation Funktion (was passiert am Schluss des Simulationsdurchlaufs)
                def on_end_simulation():
                    global current_variant # Nutzt die globale Variable für den Variantennamen
                    for file_name in expected_files:
                        original_path = os.path.join(output_directory, file_name)
                        if os.path.exists(original_path):
                            new_name = f'{current_variant}_{file_name}'
                            new_path = os.path.join(output_directory, new_name)
                            shutil.move(original_path, new_path)
                            print(f'Datei {file_name} umbenannt zu {new_name} und nach {output_directory} verschoben.')
                        else:
                            print(f'Warnung: {file_name} wurde nicht gefunden in {output_directory}')
                # Hier muss angegeben werden, welche vordefinierte Liste (PPL, NAK und SET) für Varianten genutzt werden sollen (siehe oben)
                # PPL: low, medium oder high (Belastung) und NAK: early, regular oder off (Verfügbarkeit der Nachtauskühlung)
                # weitere Varianten können jederzeit nach dem selben Schema ergänzt werden
                variante = {
                    'Variante 1': {
                        'people_list' : 'medium',
                        'nak_list' : 'regular',
                        'setpoint_list' : 'regular'
                    },
                    'Variante 2': {
                        'people_list' : 'medium',
                        'nak_list' : 'intermediate',
                        'setpoint_list' : 'intermediate'
                    },
                    'Variante 3': {
                        'people_list' : 'medium',
                        'nak_list' : 'early',
                        'setpoint_list' : 'lowest'
                    }
                }
            }
        # Loop-Hauptteil, der sich für alle Varianten wiederholt
        for variant, settings in variante.items():
            current_variant = variant
            print(f'Arbeite an {variant}...')
            # PEOPLE anpassen
            ppl_list = settings['people_list']
            ppl_grossraumbuero = PPL[ppl_list[0]]['GB']
            ppl_cafeteria = PPL[ppl_list[0]]['CA']
            ppl_sitzungszimmer = PPL[ppl_list[0]]['KO']
            ppl_buero = PPL[ppl_list[0]]['BU']
            idf_model.idfobjects['PEOPLE'][28].Number_of_People = ppl_buero
            idf_model.idfobjects['PEOPLE'][29].Number_of_People = ppl_cafeteria
            idf_model.idfobjects['PEOPLE'][30].Number_of_People = ppl_grossraumbuero
            idf_model.idfobjects['PEOPLE'][31].Number_of_People = ppl_sitzungszimmer
            # SCHEDULE anpassen
            nak_list = settings['nak_list']
            value_T1 = format_time(MAK[nak_list[0]]['T1'])
            value_WUT1 = MAK[nak_list[0]]['WUT1']
            value_T2 = format_time(MAK[nak_list[0]]['T2'])
            value_WUT2 = MAK[nak_list[0]]['WUT2']
            value_T3 = format_time(MAK[nak_list[0]]['T3'])
            value_WUT3 = MAK[nak_list[0]]['WUT3']
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL'][0].Time_1 = str(value_T1)
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL'][0].Value_Until_Time_1 = str(value_WUT1)
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL'][1].Time_2 = str(value_T2)
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL'][1].Value_Until_Time_2 = str(value_WUT2)
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL'][2].Time_3 = str(value_T3)
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL'][2].Value_Until_Time_3 = str(value_WUT3)
            # Zulufttemperatur NAK anpassen
            set_list = settings['setpoint_list']
            set_NAK = SET[set_list[0]]['Setpoint']
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:VPELIMITS'][1].Upper_Limit_Value = str(set_NAK)
            idf_model.idfobjects['SCHEDULE:DAY:INTERVAL'][2].Value_Until_Time_1 = str(set_NAK)
            # Modell speichern und Simulation ausführen
            filename = os.path.join(model_dir,variant.replace('_', '_').idf)
            idf_model.save(filename)
            print(f'Modell {variant} gespeichert als {filename}.')
            idf_model.run(output_directory,output_directory)
            on_end_simulation()
            print(f'Simulation für {variant} ausgeführt.')
        # AUSWERTUNG
        # Funktion zum Lesen der Temperaturdaten aus der ESO-Datei:
        def read_specific_temperature_data(file_path, zone, parameter):
            index_to_data = {}
            with open(file_path, 'r') as file:
                for line in file:
                    if line.strip().startswith('End of Data Dictionary'):
                        break
                    if 'in line:
                        parts = line.split(',')
                        if len(parts) == 4 and parts[0].isdigit():
                            index = parts[0].strip()
                            zone_label = parts[2].strip().lower()
                            data_label = parts[3].strip()
                            if zone.lower() in zone_label and parameter.lower() in data_label.lower():
                                index_to_data[index] = data_label
            results = []
            with open(file_path, 'r') as file:
                results_section = False
                for line in file:
                    if 'End of Data Dictionary' in line:
                        results_section = True
                        continue
                    if results_section and 'in line:
                        parts = line.split(',')
                        if len(parts) == 2 and parts[0].strip() in index_to_data:
                            index = parts[0].strip()
                            value = float(parts[1].strip())
                            data_label = index_to_data[index]
                            results.append((data_label, value))
            return results
        # Funktion zur Generierung der Zeitlabels
        def generate_time_labels(start_time, interval_minutes, num_points):
            labels = []
            current_time = start_time
            for i in range(num_points):
                if current_time.hour % 4 == 0 and current_time.minute == 0:
                    labels.append(i, current_time.strftime('%d.%m. %H:%M'))
                current_time += timedelta(minutes=interval_minutes)
            return labels
        # Funktion zum Plotten der Temperaturdaten
        def plot_temperature_data(temperatures, start_time_str, interval_minutes, filename, variant, zone_name):
            values = [value for _, value in temperatures]
            start_time = datetime.strptime(start_time_str, '%d.%m. %H:%M')
            time_labels = generate_time_labels(start_time, interval_minutes, len(temperatures))
            plt.figure(figsize=(10, 6))
            plt.plot(values, marker='o', linestyle='-', color='b')
            if time_labels:
                ticks, labels = zip(*time_labels)
                plt.xticks(ticks, labels, rotation=45, ha='right')
            plt.title(f'Zone Operative Temperature (C) - {variant} - {zone_name}')
            plt.xlabel('Uhrzeit')
            plt.ylabel('Temperatur (C)')
            plt.grid(True)
            plt.tight_layout()
            plt.savefig(filename)
            plt.close()
        # Funktion zur Berechnung der Durchschnittstemperatur
        def calculate_average_temperature(temperatures):
            values = [value for _, value in temperatures]

```

```

return sum(values) / len(values) if values else 0

# Funktion zur Berechnung und Vergleich der Integrale der Zeitreihen
def calculate_and_compare_integrals(temperatures1, temperatures2, interval_minutes):
    times = np.arange(0, len(temperatures1) * interval_minutes / 60, interval_minutes / 60)
    values1 = [value for _, value in temperatures1]
    values2 = [value for _, value in temperatures2]

    df = pd.DataFrame({'Zeit': times, 'Messwert1': values1, 'Messwert2': values2})
    df['Differenz'] = df['Messwert1'] - df['Messwert2']

    integral1 =.simps(df['Messwert1'], df['Zeit'])
    integral2 =.simps(df['Messwert2'], df['Zeit'])
    differenz_integral =.simps(df['Differenz'], df['Zeit'])

    prozentuale_differenz = (differenz_integral / (integral1 + integral2)) * 100

    return integral1, integral2, differenz_integral, prozentuale_differenz

# Varianten und Parameter festlegen
variante = ['Variante 1', 'Variante 2', 'Variante 3']
zones = [
    'THERMAL_ZONE: A 01 020',
    'THERMAL_ZONE: A 02 020',
    'THERMAL_ZONE: A 03 020',
    'THERMAL_ZONE: A 04 020',
    'THERMAL_ZONE: A 05 020',
    'THERMAL_ZONE: A 06 020',
    'THERMAL_ZONE: A 06 024',
    'THERMAL_ZONE: A 07 020'
]

parameter = "Zone operative Temperature [C]"
start_time_str = start_date
interval_minutes = simstep
output_directory = 'C:/Users/philip/Projects/Git/awe_sim/AUEBepyruntime/API_20_ConfD0_tempdrop' # Beispielhaftes Verzeichnis

# Speicherung der prozentualen Differenzen
differenzen_variante_2 = []
differenzen_variante_3 = []

# Auswertung der Varianten
for zone in zones:
    file_path1 = f'{output_directory}/Variante_1_epusout.eso'
    file_path2 = f'{output_directory}/Variante_2_epusout.eso'
    file_path3 = f'{output_directory}/Variante_3_epusout.eso'

    results1 = read_specific_temperature_data(file_path1, zone, parameter)
    results2 = read_specific_temperature_data(file_path2, zone, parameter)
    results3 = read_specific_temperature_data(file_path3, zone, parameter)

    if results1 and results2:
        integral1, integral2, differenz_integral, prozentuale_differenz = calculate_and_compare_integrals(results2, results1, interval_minutes)
        differenzen_variante_2.append(prozentuale_differenz)
        print(f'Vergleich Variante 1 und Variante 2 für {zone}:')
        print(f'Integral der Zeitreihe 1: {integral1}')
        print(f'Integral der Zeitreihe 2: {integral2}')
        print(f'Integral der Differenzfunktion: {differenz_integral}')
        print(f'Prozentuale Differenz: {prozentuale_differenz} %\n')

    if results1 and results3:
        integral1, integral2, differenz_integral, prozentuale_differenz = calculate_and_compare_integrals(results3, results1, interval_minutes)
        differenzen_variante_3.append(prozentuale_differenz)
        print(f'Vergleich Variante 1 und Variante 3 für {zone}:')
        print(f'Integral der Zeitreihe 1: {integral1}')
        print(f'Integral der Zeitreihe 2: {integral2}')
        print(f'Integral der Differenzfunktion: {differenz_integral}')
        print(f'Prozentuale Differenz: {prozentuale_differenz} %\n')

# Speicherung der prozentualen Differenzen
differenzen_variante_2 = []
differenzen_variante_3 = []

# Auswertung der Varianten
for zone in zones:
    file_path1 = f'{output_directory}/Variante_1_epusout.eso'
    file_path2 = f'{output_directory}/Variante_2_epusout.eso'
    file_path3 = f'{output_directory}/Variante_3_epusout.eso'

    results1 = read_specific_temperature_data(file_path1, zone, parameter)
    results2 = read_specific_temperature_data(file_path2, zone, parameter)
    results3 = read_specific_temperature_data(file_path3, zone, parameter)

    if results1 and results2:
        integral1, integral2, differenz_integral, prozentuale_differenz = calculate_and_compare_integrals(results2, results1, interval_minutes)
        differenzen_variante_2.append(prozentuale_differenz)
        print(f'Vergleich Variante 1 und Variante 2 für {zone}:')
        print(f'Integral der Zeitreihe 1: {integral1}')
        print(f'Integral der Zeitreihe 2: {integral2}')
        print(f'Integral der Differenzfunktion: {differenz_integral}')
        print(f'Prozentuale Differenz: {prozentuale_differenz} %\n')

    if results1 and results3:
        integral1, integral2, differenz_integral, prozentuale_differenz = calculate_and_compare_integrals(results3, results1, interval_minutes)
        differenzen_variante_3.append(prozentuale_differenz)
        print(f'Vergleich Variante 1 und Variante 3 für {zone}:')
        print(f'Integral der Zeitreihe 1: {integral1}')
        print(f'Integral der Zeitreihe 2: {integral2}')
        print(f'Integral der Differenzfunktion: {differenz_integral}')
        print(f'Prozentuale Differenz: {prozentuale_differenz} %\n')

# Berechnung der Durchschnittswerte der prozentualen Differenzen
durchschnitt_diff_variante_2 = np.mean(differenzen_variante_2) if differenzen_variante_2 else 0
durchschnitt_diff_variante_3 = np.mean(differenzen_variante_3) if differenzen_variante_3 else 0

print(f'Durchschnittliche prozentuale Differenz für Variante 2: {durchschnitt_diff_variante_2:.2f} %')
print(f'Durchschnittliche prozentuale Differenz für Variante 3: {durchschnitt_diff_variante_3:.2f} %')

# Bestimmung der besten Variante
beste_variante = "Variante 1"
beste_diff = 0

if durchschnitt_diff_variante_2 < 0 or durchschnitt_diff_variante_3 < 0:
    if durchschnitt_diff_variante_2 < durchschnitt_diff_variante_3:
        beste_variante = "Variante 2"
        beste_diff = durchschnitt_diff_variante_2
    else:
        beste_variante = "Variante 3"
        beste_diff = durchschnitt_diff_variante_3

print(f'Beste Variante: {beste_variante} mit einer durchschnittlichen prozentualen Differenz von {beste_diff:.2f} %')

# Ausgabe der Zieltemperatur und Zielzeit für die beste Variante
if beste_variante == "Variante 1":
    setpoint = SET['regular']
    setpoint_time = NAKI['regular']
elif beste_variante == "Variante 2":
    setpoint = SET['intermediate']
    setpoint_time = NAKI['inbetween']
else:
    setpoint = SET['lowest']
    setpoint_time = NAKI['early']

print(f'Setpoint Temperature: {setpoint[\"setpoint\"]} °C')
print(f'Setpoint Time: {setpoint_time}')
print(f'T1: {setpoint_time[\"T1\"]}, VUT1: {setpoint_time[\"VUT1\"]}')
print(f'T2: {setpoint_time[\"T2\"]}, VUT2: {setpoint_time[\"VUT2\"]}')
print(f'T3: {setpoint_time[\"T3\"]}, VUT3: {setpoint_time[\"VUT3\"]}')

# Ende des Simulationsdurchgangs und definieren der Setpoints für die Besten Werte

```

Anhang 4: «Lüftungspläne»

Abbildung 40 zeigt die Ansicht des 3D-Modells im IFC Format für den Teil der Lüftungsanlage.

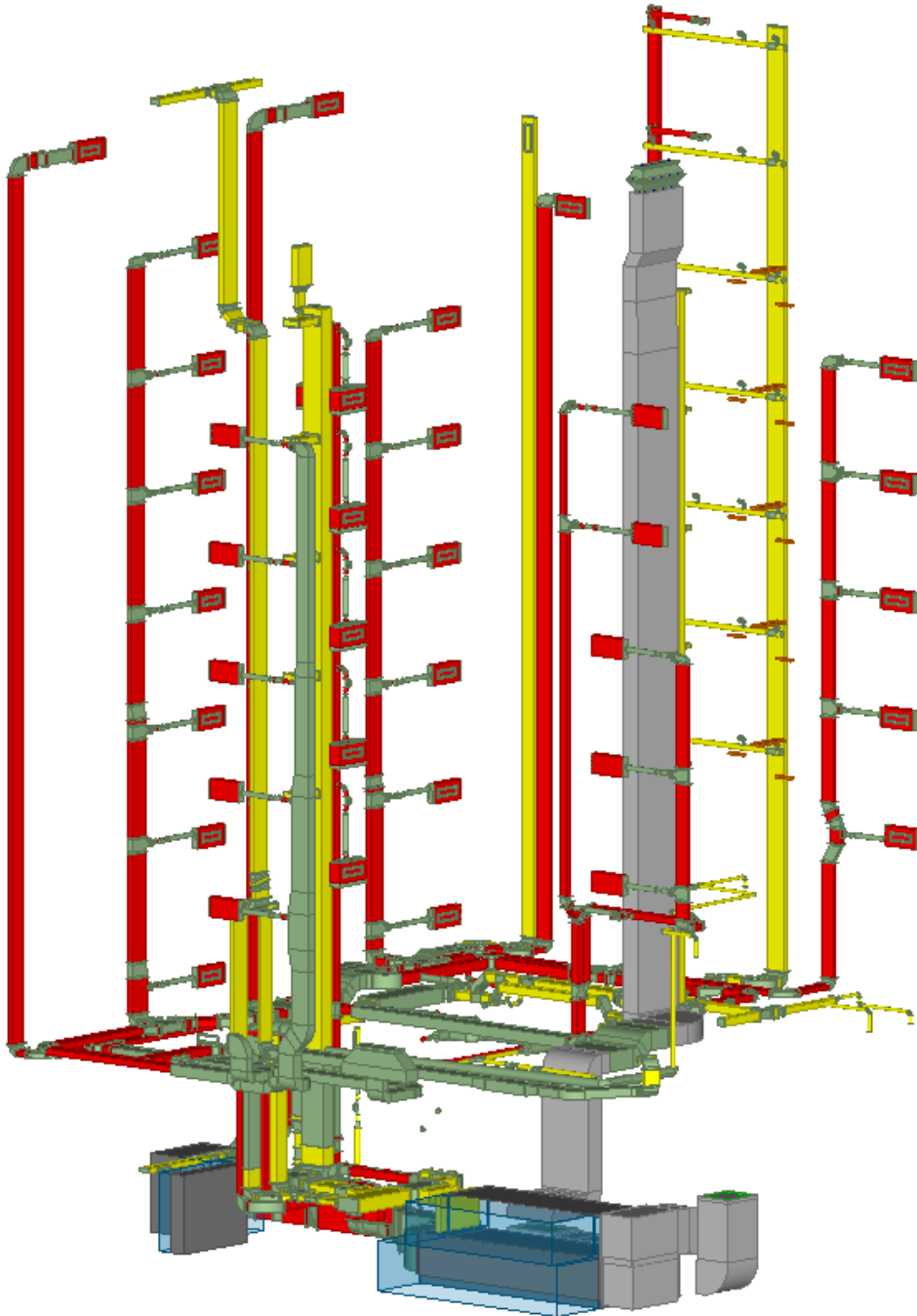
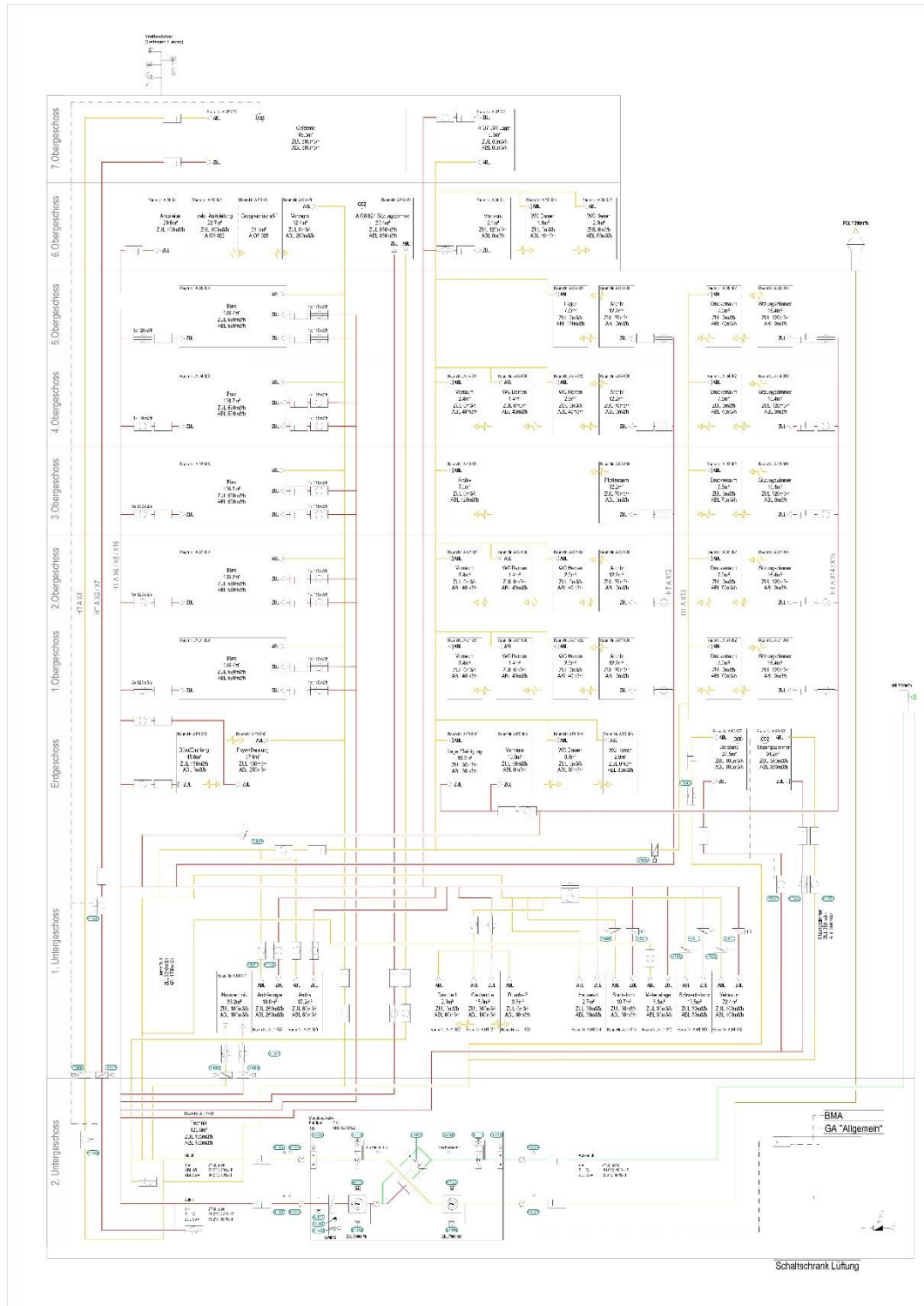


Abbildung 40. Darstellung des verzweigten Lüftungskanalnetz im Gebäude «AUE BS». Rot sind die Zuluftkanäle und gelb die Abluftkanäle. Dazu grau und grün Kanäle, welche isoliert sind.

Lüftungsschema



Luftmengen

Die Tabelle 22 zeigt die Luftmengen pro Raum sowie eine allfällige Überströmung aus anderen Zonen / in andere Zonen ist in den Bemerkungen angegeben.

Tabelle 22. Verteilung der Luftmengen pro Zone und Angaben zu Überströmungen von Raum zu Raum

Zone	Zuluft [m ³ /h]	Abluft [m ³ /h]	Bemerkung
UG02 Technik	150	150	
UG01 Garderoben, Archiv	960	960	Verteilt auf einzelne separate Räume
E0 003 Vorraum	60	0	Überströmen von je 30 m ³ /h nach E0 004 und E0 005
E0 004 WC-Damen	0	30	Überströmen von 30 m ³ /h aus E0 003
E0 005 WC-Herren	0	30	Überströmen von 30 m ³ /h aus E0 003
E0 006 Sitzungszimmer	350	350	CO ₂ geregelter Volumenstrom
E0 007 Beratung	100	100	CO ₂ geregelter Volumenstrom
E1 002 Lager / Reinigung	30	30	
E1 009 Foyer / Beratung	100	250	Überströmen von 150 m ³ /h aus E1 010
E1 010 Büro / Empfang	150	0	Überströmen von 150 m ³ /h nach E1 009
O1 020 Grossraumbüro	590	590	
O1 001 Archiv	70	0	Überströmen von 50 m ³ /h aus O1 002 Überströmen von 120 m ³ /h nach WC OG01
O1 002 Druckerraum	0	70	Überströmen von 120 m ³ /h aus O1 010 Überströmen von 50 m ³ /h nach O1 001
O1 010 Sitzungszimmer	120	0	Überströmen von 120 m ³ /h nach O1 002
WC OG01	0	120	Überströmen aus O2 001
O2 020 Grossraumbüro	590	590	
O2 001 Archiv	70	0	Überströmen von 50 m ³ /h aus O2 002 Überströmen von 120 m ³ /h nach WC OG02
O2 002 Druckerraum	0	70	Überströmen von 120 m ³ /h aus O2 010 Überströmen von 50 m ³ /h nach O2 001
O2 010 Sitzungszimmer	120	0	Überströmen von 120 m ³ /h nach O2 002
WC OG02	0	120	Überströmen aus O2 001
O3 020 Grossraumbüro	590	590	
O3 001 Archiv	70	0	Überströmen von 50 m ³ /h aus O3 002 Überströmen von 120 m ³ /h nach O3 031
O3 002 Druckerraum	0	70	Überströmen von 120 m ³ /h aus O3 010 Überströmen von 50 m ³ /h nach O3 001
O3 010 Sitzungszimmer	120	0	Überströmen von 120 m ³ /h nach O3 002
O3 031	0	120	Überströmen aus O3 001
O4 020 Grossraumbüro	590	590	
O4 001 Archiv	70	0	Überströmen von 50 m ³ /h aus O4 002 Überströmen von 120 m ³ /h nach WC OG04
O4 002 Druckerraum	0	70	Überströmen von 120 m ³ /h aus O4 010 Überströmen von 50 m ³ /h nach O4 001
O4 010 Sitzungszimmer	120	0	Überströmen von 120 m ³ /h nach O4 002
WC OG04	0	120	Überströmen aus O4 001
O5 020 Grossraumbüro	590	590	
O5 001 Archiv	70	0	Überströmen von 50 m ³ /h aus O5 002 Überströmen von 120 m ³ /h nach O5 031
O5 002 Druckerraum	0	70	Überströmen von 120 m ³ /h aus O5 010 Überströmen von 50 m ³ /h nach O5 001
O5 010 Sitzungszimmer	120	0	Überströmen von 120 m ³ /h nach O5 002
O5 031 Lager	0	120	Überströmen aus O5 001
O6 020 Grossraumbüro	200	200	
O6 024 Sitzungszimmer	360	360	CO ₂ geregelter Volumenstrom
WC OG06	120	120	
O7 020 Cafeteria	800	800	
O7 031 Lagerraum	80	80	
Total	7'360	7'360	

Anhang 5: «Modellierung in EnergyPlus™»

Konfiguration des AirLoopHVAC

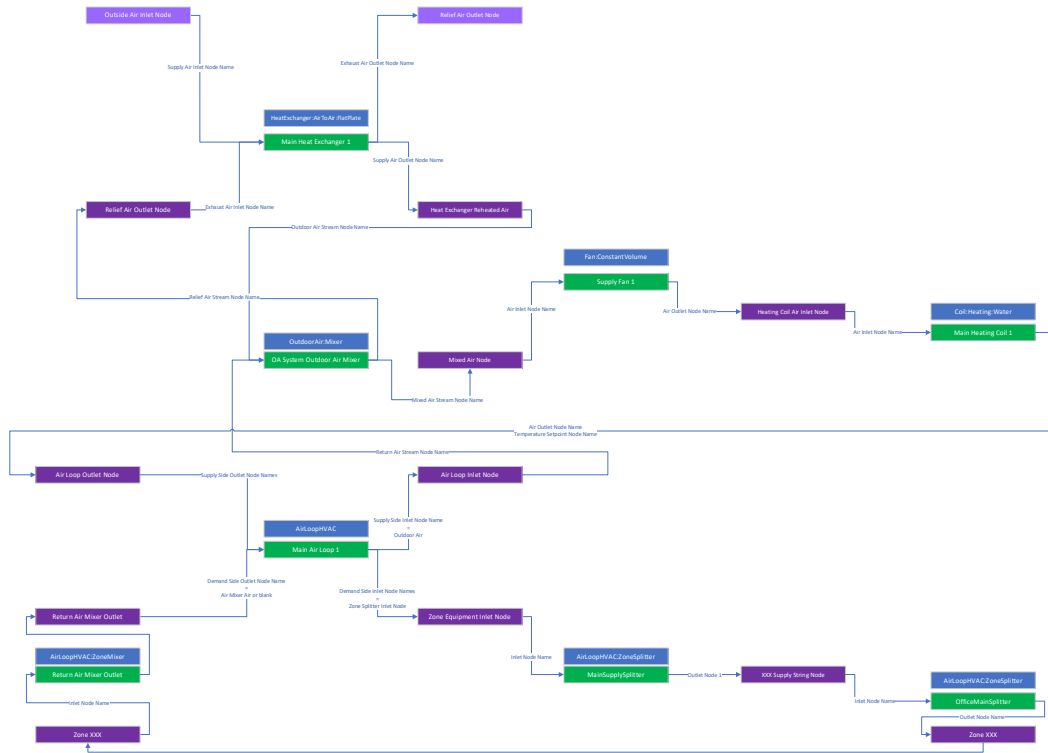


Abbildung 41. Konfiguration des AirLoopHVAC für das Modell «AUE BS».

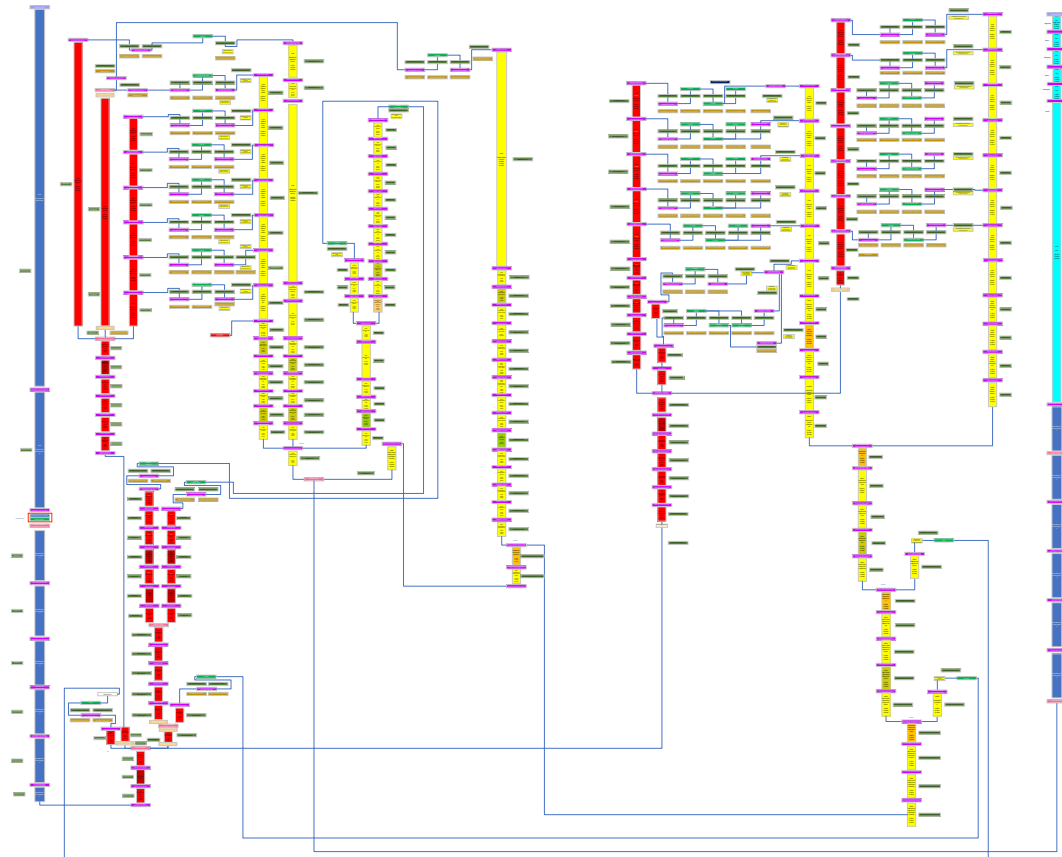
Konfiguration des AFN

Abbildung 42. Ursprünglich geplante Darstellung des AFN bevor die Limitationen der Luftverteilung festgestellt wurden (vergrößerbar).

Verknüpfung der regulären EP-Elemente mit den AFN-Elementen in EnergyPlus™

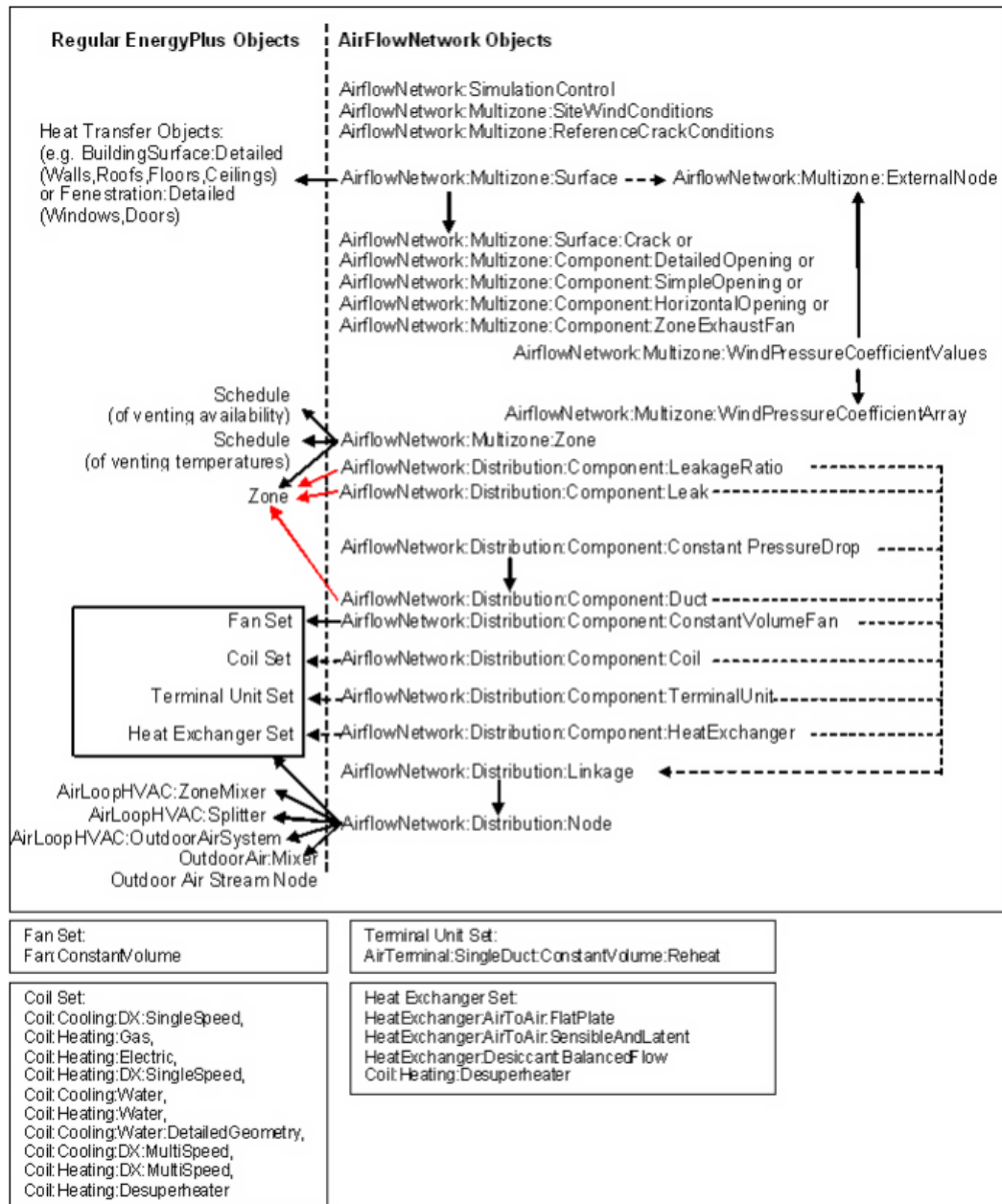


Abbildung 43. Verknüpfung der regulären EnergyPlus™ Elemente mit den AFN-Elementen aus [38, S. 1099].

Anhang 6: «Auswertung der Simulationen»

Quantifizierte Ergebnisse

Tabelle 23. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Sitzungszimmer»

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				19.-25.08.2023 (Tropennächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				2-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	1-2 «Nacht»		1-3 «Dauer-Ein»		2-2 «Nacht»		2-3 «Dauer-Ein»		3-2 «Nacht»		3-3 «Dauer-Ein»	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 010	7.69	9.51	0.41	85.62	0	175.08	0	345.50	0	65.94	0	137.73
O2 010	6.60	11.50	0.21	94.58	0	164.67	0	302.87	0	59.82	0	122.63
O3 010	10.51	5.41	0.44	79.42	0	175.67	0	308.97	0	47.57	0	100.73
O4 010	8.34	10.23	0.39	85.85	0	202.59	0	312.71	0	58.78	0	116.85
O5 010	11.16	3.32	0.56	65.18	0	216.68	0	332.19	0	38.56	0	81.17

Tabelle 24. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Archiv»

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				19.-25.08.2023 (Tropennächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				2-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	1-2 «Nacht»		1-3 «Dauer-Ein»		2-2 «Nacht»		2-3 «Dauer-Ein»		3-2 «Nacht»		3-3 «Dauer-Ein»	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 001	6.87	8.47	0.33	103.59	0	160.27	0	379.32	0	44.1	0	121.68
O2 001	19.41	3.59	1.20	69.28	0	143.26	0	343.29	5.12	9.95	2.92	58.46
O3 001	7.51	6.56	0.49	86.67	0	153.31	0	322.31	0.09	35.21	0	101.13
O4 001	18.94	2.42	1.06	61.13	0	166.49	0	338.57	1.67	16.33	0.47	62.76
O5 001	16.77	1.98	0.77	54.77	0	162.74	0	303.87	1.35	17.28	0.32	61.19

Tabelle 25. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Druckerraum»

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				19.-25.08.2023 (Tropennächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				2-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	1-2 «Nacht»		1-3 «Dauer-Ein»		2-2 «Nacht»		2-3 «Dauer-Ein»		3-2 «Nacht»		3-3 «Dauer-Ein»	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
O1 002	57.55	0	54.19	0.29	0	194.36	0	400.05	14.65	1.31	9.08	14.94
O2 002	59.28	0	54.49	0.11	0	200.56	0	403.27	26.8	0.05	15.93	6.3
O3 002	61.34	0	46.19	2.1	0	212.83	0	422.07	21.95	0.55	11.48	15.52
O4 002	64.6	0	57.05	0.11	0	227.96	0	429.64	30.91	0.06	20.71	6.16
O5 002	58.23	0	54.21	0.02	0	236.35	0	427.57	28.65	0.07	19.77	6.08

Tabelle 26. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «WC/Lager»

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				19.-25.08.2023 (Tropennächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				2-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	1-2 «Nacht»		1-3 «Dauer-Ein»		2-2 «Nacht»		2-3 «Dauer-Ein»		3-2 «Nacht»		3-3 «Dauer-Ein»	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
WC OG01	28.98	0	39.47	0	0	175.68	0	377.59	0	18.08	0	40.3
WC OG02	26.34	0	38.11	0	0	187.66	0	393.49	0	17.72	0	39.08
O3 031	21.90	0	34.26	0	0	201.92	0	397.85	0	20.54	0	42.22
WC OG04	16.94	0	34.25	0	0	211.87	0	338.05	0	27.81	0	51.17
O5 031	5.76	5.13	44.98	3.36	0	247.18	0	227.26	0	69.58	0.85	108.8
WC OG06	49.04	0	19.08	0.28	0	229.53	0	325.69	1.13	10.91	0	45.35
O7 031	153.27	0	128.41	0.04	0.44	176.6	0	279.88	71.78	0	65.5	10.79

Tabelle 27. Kennzahlen für den Effekt der mechanischen Lüftung für die Raumgruppe «Erdgeschoss»

Raum	03. - 09.06.2023 (Kalte Nächte)				19.-25.08.2023 (Tropennächte)				13.-19.07.2023 (Neutrale Nächte)			
	1-1 «Lüftung regulär»				2-1 «Lüftung regulär»				3-1 «Lüftung regulär»			
	1-2 «Nacht»		1-3 «Dauer-Ein»		2-2 «Nacht»		2-3 «Dauer-Ein»		3-2 «Nacht»		3-3 «Dauer-Ein»	
	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber	darunter	darüber
E0 006	167.61	0	193.98	0	0	174.22	0	396.3	77.04	0	74.87	8.12
E0 007	21.04	1.59	2.02	27.46	0	103.26	0	277.89	0.25	7.67	0.03	43.58
E0 009	17.93	0.37	1.39	18.32	0	91.52	0	248.88	0.75	8.41	0.16	35.29

Simulationszeiten

Tabelle 28. Zusammenstellung der Simulationszeiten

Variante	Simulationsdauer [h]	Zeitraum (Runperiod)	Betriebsart Lüftung	Bemerkung
Ausgangsvarianten				
1-1	01:26	03. – 09.06.2023	Tagbetrieb	-
1-2	03:47		Tag- und Nachtbetrieb	-
1-3	06:59		Dauerbetrieb	-
2-1	01:23	19. -25.08.2023	Tagbetrieb	-
2-2	02:59		Tag- und Nachtbetrieb	-
2-3	11:12		Dauerbetrieb	-
3-1	05:51	13. - 19.07.2023	Tagbetrieb	-
3-2	11:15		Tag- und Nachtbetrieb	-
3-3	10:38		Dauerbetrieb	-
Varianten Klappen TH / Oblichter und Dämmung Kanäle				
4-1	01:48	03.-09.06.2023	Tagbetrieb	
4-2	-		Tag- und Nachtbetrieb	Konvergiert nicht
4-3	01:25		Tagbetrieb	-
4-4	02:59		Tag- und Nachtbetrieb	-
4-5	01:46		Tagbetrieb	-
4-6	03:23		Tag- und Nachtbetrieb	-
4-7	01:48	19.-25.08.2023	Tagbetrieb	-
4-8	01:33		Tag- und Nachtbetrieb	-
4-9	01:25		Tagbetrieb	-
4-10	02:59		Tag- und Nachtbetrieb	-
4-11	01:46		Tagbetrieb	-
4-12	03:23		Tag- und Nachtbetrieb	-
Varianten zur Optimierung				
6-1	01:59	19.-25.08.2023	Tagbetrieb	-
6-2	02:03		Tagbetrieb	-
6-3	01:49		Tagbetrieb	-
6-4	01:52		Tagbetrieb	-
6-5	02:01	03.-09.06.2023	Tagbetrieb	-
6-6	02:11		Tagbetrieb	-
6-7	01:48		Tagbetrieb	-
6-8	01:57		Tagbetrieb	-
6-9	13:48	01.06. - 31.08.2023	Tagbetrieb	-
6-10	20:55		Tagbetrieb	-
6-11	26:19		Tagbetrieb	-
6-12	26:25		Tagbetrieb	-
6-13	01:36	03.-09.06.2023	Tagbetrieb	-
6-14	01:47		Tagbetrieb	-
6-15	01:43		Tagbetrieb	-

Anhang 7: Programmablauf Nachtauskühlung

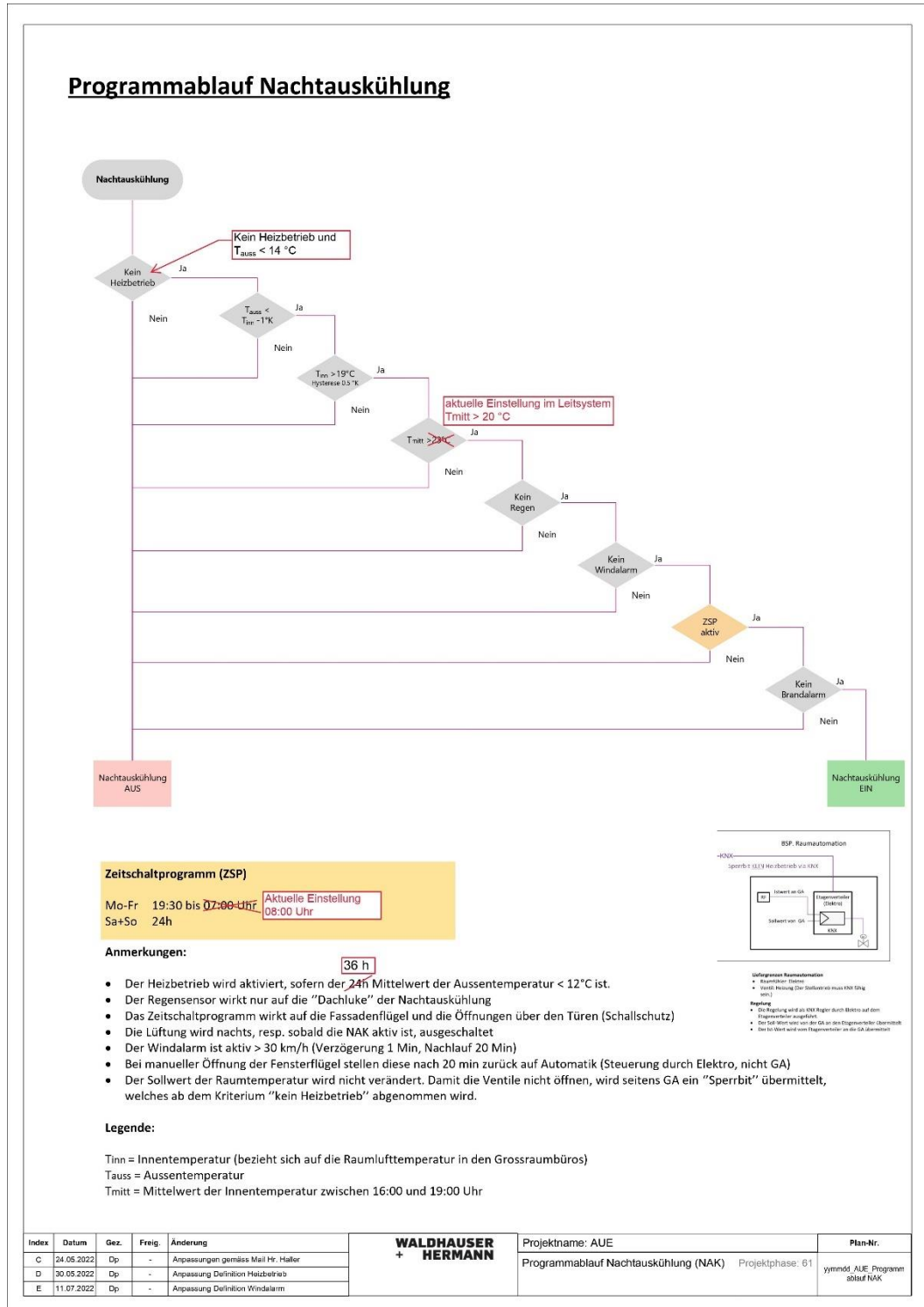


Abbildung 44. Programmablauf Nachtauskühlung.

Anhang 8: «Übersicht Temperaturverlauf Sommer»

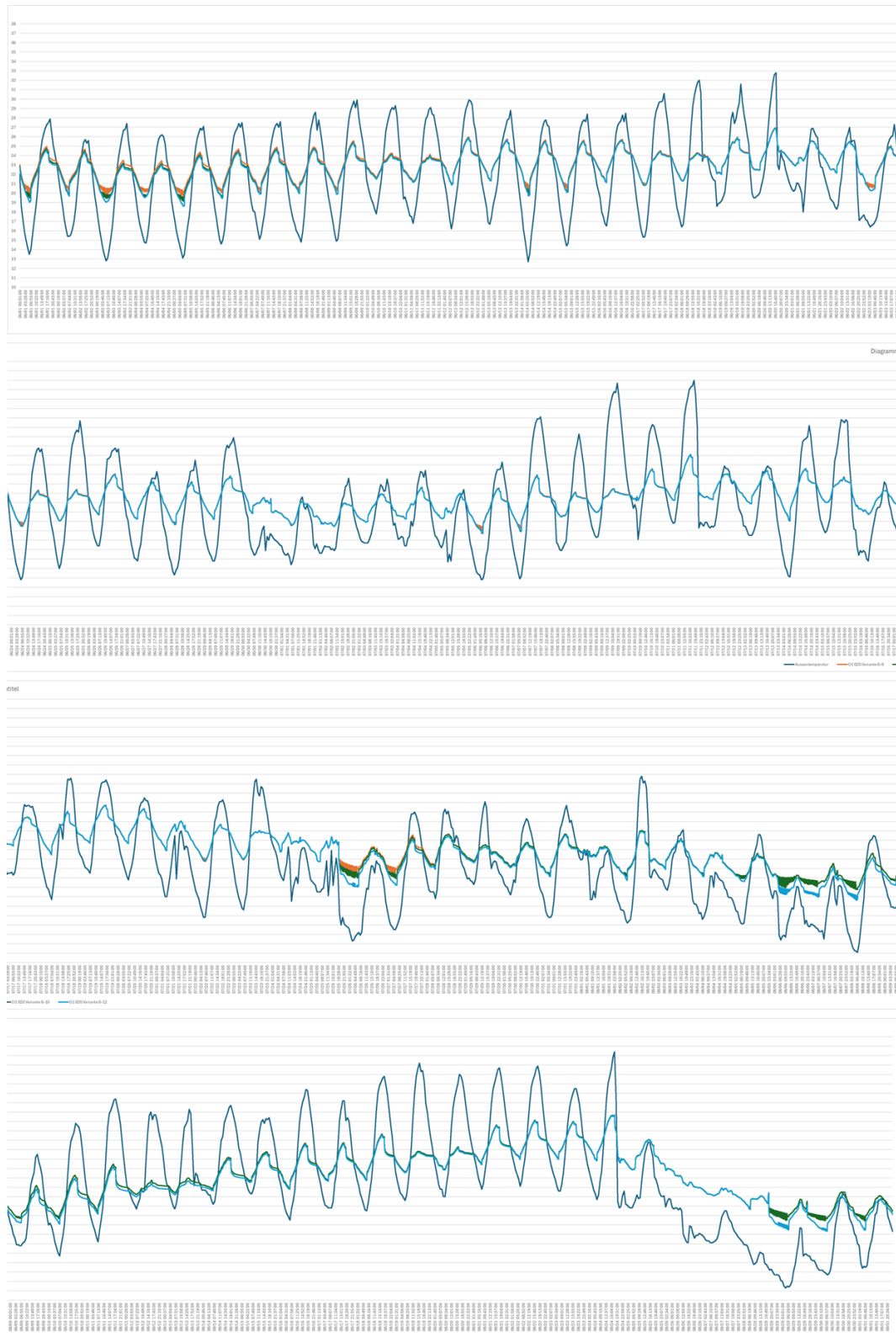


Abbildung 45. Temperaturverlauf der Grossraumbüro O1 020 über den gesamten Sommer mit einer variierenden Zieltemperatur der Nachtauskühlung von 19°C (orange), 18°C (grün) und 16°C (hellblau)

Anhang 9: «Auswertung operative Raumtemperatur»

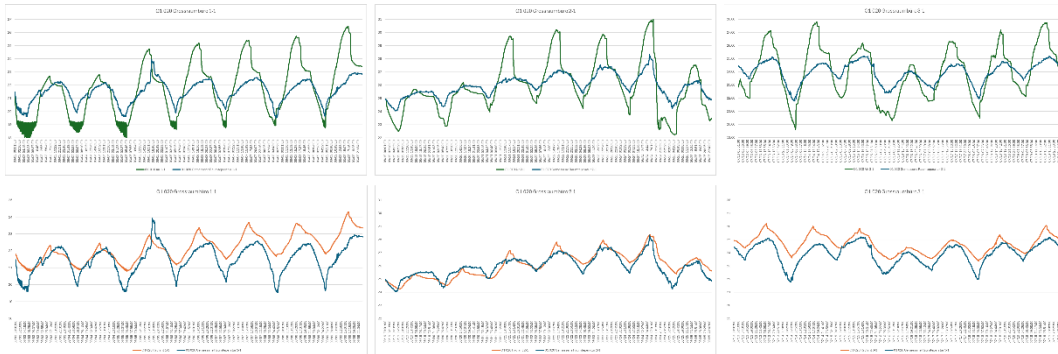


Abbildung 46. Auswertung für den Raum O1 020. Reguläre (oben) und korrigierte Simulation (unten).

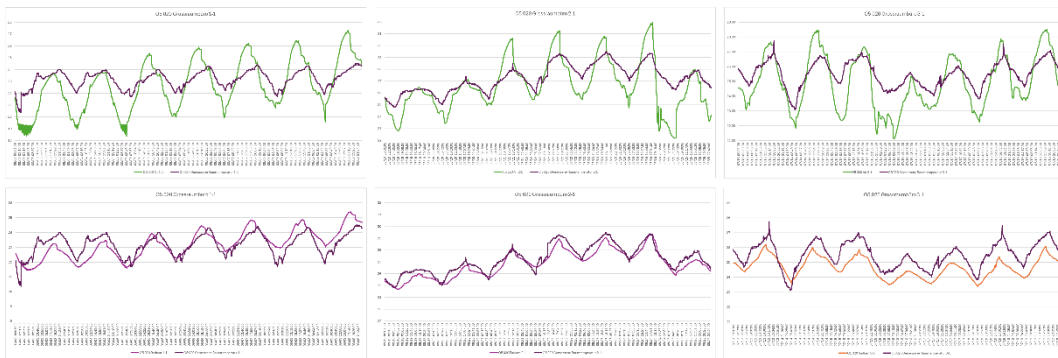


Abbildung 47. Auswertung für den Raum O5 020. Reguläre (oben) und korrigierte Simulation (unten).

Anhang 9: «EMS-Programm»

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:SENSOR =====
EnergyManagementSystem:Sensor,
  OperativeTemp,           !- Name
  THERMAL_ZONE: A 01 020,  !- Output:Variable or Output:Meter Index Key Name
  Zone Operative Temperature; !- Output:Variable or Output:Meter Name

EnergyManagementSystem:Sensor,
  OutdoorTemp,             !- Name
  Environment,             !- Output:Variable or Output:Meter Index Key Name
  Site Outdoor Air Drybulb Temperature; !- Output:Variable or Output:Meter Name

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:ACTUATOR =====
EnergyManagementSystem:Actuator,
  WindowOpenActuator,     !- Name
  FE-01-025-LUEFTUNG,     !- Actuated Component Unique Name
  Airflow Network Window/Door Opening, !- Actuated Component Type
  Venting Opening Factor; !- Actuated Component Control Type

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:PROGRAMCALLINGMANAGER =====
EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager,
  WindowControlManager,   !- Name
  InsideHVACSystemIterationLoop, !- EnergyPlus Model Calling Point
  ControlWindows;         !- Program Name 1

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:PROGRAM =====
EnergyManagementSystem:Program,
  ControlWindows,         !- Name
  IF (OperativeTemp > OutdoorTemp), !- Program Line 1
  IF ((Hour >= 19) || (Hour < 8)), !- Program Line 2
  SET WindowOpenActuator = 1.0, !- Program Line 3 (fully open)
  ELSE,
  SET WindowOpenActuator = 0.0, !- Program Line 4 (fully closed)
  ENDF,
  ELSE,
  SET WindowOpenActuator = 0.0, !- Program Line 5 (fully closed)
  ENDF;

```

Abbildung 48. EMS-Programm zum Verwenden der operativen Raumtemperatur statt der Lufttemperatur für die Steuerung der Aussenklappen.