



Schlussbericht 08.02.2017

ROGEK - Robustheitsbewertung von integrierten gebäudetechnischen Kühlkonzepten in Verwaltungsbauten hinsichtlich Klima und Nutzervariabilität



Quelle: <http://techsterous.blogspot.ch/2011/08/domino-effect-its-more-than-just-fall.htm>



Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE LUZERN

Technik & Architektur
Zentrum für Integrale Gebäudetechnik

Datum: 8. Februar 2017

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG)
Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur (CCTP)
Hochschule Luzern - Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw

Autor/in:

Andrii Zakovorotnyi, Hochschule Luzern, andrii.zakovorotnyi@hslu.ch
Dominic Jurt, Hochschule Luzern, dominic.jurt@hslu.ch
Nadège Vetterli, Hochschule Luzern, nadege.vetterli@hslu.ch
Axel Seerig, Hochschule Luzern, axel.seerig@hslu.ch
Christian Struck, Hochschule Luzern, christian.struck@hslu.ch
Thomas Heim, Hochschule Luzern, thomas.heim@hslu.ch
Doris Ehrbar, Hochschule Luzern, doris.ehrbar@hslu.ch

Projektteilnehmer:

Patrick Baschnagel, HKG, p.baschnagel@hkg.ch

Begleitgruppe:

Beat Frei, Aicher, De Martin, Zweng AG, beat.frei@adz.ch
Volker Wouters, HKG, v.wouters@hkg.ch

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Rolf Moser, moser@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/500962-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Kurzzusammenfassung

Die Robustheit von Kühlszenarien hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit und des Energieverbrauchs in Bürogebäuden wurde untersucht. Zu diesem Zweck wurden drei Kälteabgabesysteme ausgewählt: Umluftkühlung, Kühldecke und Betonkernaktivierung. Die genannten Systeme wurden für drei typische Bürobauten mit unterschiedlicher thermischer Trägheit und unterschiedlichen Fensterflächenanteilen simuliert. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Lüftungssysteme (mechanisch oder natürlich, mit oder ohne Nachtbetrieb) ohne Kälteabgabesystem untersucht. Die Robustheit der unterschiedlichen Kühlszenarien wurde für vier verschiedene Klimaszenarien (historische und prognostizierte) und bezüglich drei verschiedener Varianten von Nutzerverhalten ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kälteabgabesysteme zum Zeitpunkt der Erstellung bis zu einem gewissen Grad überdimensioniert werden sollten, um den zunehmenden Klimakältebedarf in der Zukunft abzudecken. Es wurde gezeigt, dass die Kühldecke und Betonkernaktivierung bei der prognostizierten Klimaänderung grundsätzlich robuster sind als andere untersuchte Kühlszenarien. Die Nachtauskühlung durch mechanische Lüftung ist eine zusätzliche robuste Option für Gebäude mit grosser thermischer Trägheit; bzw. die Umluftkühlung für Gebäude mit hohem Fensteranteil. Zudem zeigt diese Studie, dass Kühldecke und Umluftkühlung bezüglich der Variabilität des Nutzerverhaltens robuster sind als andere Kühlszenarien.

Résumé

Différents scénarios de refroidissement de bureaux ont été évalués quant à leur robustesse par rapport au confort thermique et au besoin d'énergie. Pour cela, trois différents systèmes de refroidissement ont été choisis : réfrigération active par air pulsé, plafond froid et dalle active. Ces derniers ont été simulés dans trois types de bureaux avec une capacité thermique et une surface de vitrage différentes. De plus, différents systèmes de ventilation (mécanique ou naturelle, avec ou sans refroidissement nocturne) sans refroidissement actif ont été évalués. La robustesse des différents types de refroidissement définis a été analysée pour quatre scénarios climatiques (historique et prédicts) et trois comportements d'utilisateurs variables. Les résultats montrent qu'il faudrait surdimensionner la puissance de refroidissement installée lors de la planification afin de tenir compte de l'augmentation des besoins de refroidissement dans le futur. L'analyse montre que les plafonds froids et dalles actives sont les solutions les plus robustes en cas de changements climatiques. Le refroidissement nocturne par ventilation constitue une option robuste supplémentaire pour les bâtiments avec grande inertie thermique, respectivement la réfrigération active par air pulsé pour les bâtiments avec grandes surfaces vitrées. Les résultats montrent aussi que les plafonds froids et la réfrigération active par air pulsé sont les solutions les plus robustes lorsque le comportement des usagers varie.

Summary

The robustness of cooling systems regarding their energy consumption and thermal comfort in office buildings was analysed. For this purpose, three cooling systems were selected: air cooling, cooling ceiling and concrete core activation system. The different cooling systems were simulated in three buildings with different thermal capacity and proportion of window area. Additionally, the robustness of different ventilation systems (mechanical or natural, with or without night operation) was analysed. The robustness of the cooling systems was investigated for different climate scenarios (historical and projected) and for different user behaviour. The results show that the installed power of current cooling systems should be oversized to a certain extent in order to fulfil the increasing cooling demand of the buildings in future. It was shown that, in case of climate change, the cooling ceiling and concrete core activation system are basically more robust than other cooling scenarios. Night cooling via mechanical ventilation is an additional option for buildings with high thermal capacity, while air cooling is an additional option for buildings with a high proportion of window area. Furthermore, this study shows that cooling ceiling and air cooling are more robust regarding variation in user behaviour.



Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
1. Zusammenfassung.....	6
2. Abkürzungsverzeichnis.....	9
3. Ausgangslage und Motivation.....	10
4. Aufgabe und Ziele.....	11
5. Methode.....	12
5.1 Herangehensweise und Abgrenzung.....	12
5.2 Definition der Robustheit.....	13
5.2.1 Robustheitsbewertung in der Gebäudeplanung.....	13
5.2.2 Definition der Robustheitskriterien.....	13
5.3 Auswahl der Kühlszenarien.....	16
5.3.1 Auswahl der Lüftungskonzepte.....	16
5.3.2 Auswahl der Kühlkonzepte.....	17
5.3.3 Zusammenfassung der Kühlszenarien.....	18
5.4 Definition der Variabilität.....	20
5.4.1 Auswahl der Bürogebäude.....	20
5.4.2 Definition des Referenzfalls (Dimensionierungsfall).....	22
5.4.3 Definition der Klimavariabilität.....	22
5.4.4 Definition der Nutzervariabilität.....	25
5.4.5 Vergleich der Klima- und Nutzervariabilität (T-Test).....	27
5.4.6 Zusammenfassung der Variabilität.....	28
6. Ergebnisse / Erkenntnisse.....	31
6.1 Einfluss des Standorts und des Gebäudetyps.....	31
6.2 Dimensionierungsfall.....	33
6.2.1 Altbau.....	33
6.2.2 Referenzgebäude.....	35
6.2.3 Firmenhauptsitz.....	37
6.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse für den Dimensionierungsfall.....	38
6.3 Simulation der Klimavariabilität.....	39
6.3.1 Altbau.....	39
6.3.2 Referenzgebäude.....	42
6.3.3 Firmenhauptsitz.....	45



6.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Simulationen der Klimavariabilität	48
6.4	Simulation der Nutzervervariabilität	50
6.5	Ergebnisse des T-Tests	54
6.6	Fazit	55
7.	Schlussfolgerung	57
8.	Diskussion / Empfehlungen	58
9.	Literaturverzeichnis	59
10.	Anhang	62
10.1	Interviews	62
10.1.1	Kernfragen	62
10.1.2	Ergebnisse der Interviews	62
10.2	Einführung von Bürotypen	65
10.2.1	Büroflächen im Bestand	65
10.2.2	Bürraumkonzepte	65
10.2.3	Bauteiltypen	66
10.3	Zusätzliche Beschreibung der Kühlszenarien	68
10.3.1	Umlufkühlung	68
10.3.2	Kühldecke	69
10.3.3	Betonkernaktivierung (TABS)	71
10.4	Simulationsergebnisse - Hilfsenergie	74
10.4.1	Dimensionierungsfall	74
10.4.2	Klimaänderungsszenarien	77
10.4.3	Nutzervervariabilität	79



1. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat den Zweck, die Robustheit unterschiedlicher Kühlszenarien für Bürogebäude in Bezug auf den Einfluss Klimaänderungen und Nutzervariabilität zu bewerten. Der Begriff Robustheit (engl. robustness) wurde im Rahmen der Studie definiert, um die Funktionalität der unterschiedlichen Kühlszenarien bei geänderten Randbedingungen zu bewerten.

Fünf Interviews wurden zur Ermittlung der Bedürfnisse und Anforderungen der Planer und Betreiber in Bezug auf die Robustheitsbetrachtung von gebäudetechnischen Systemen über deren Lebenszyklus durchgeführt. Die Kernbedürfnisse bei den Interviewpartnern sind, den geplanten Energiebedarf über die Lebensdauer zu gewährleisten und die Anpassungsfähigkeit während der Nutzungsphase zu sichern. Dabei interessiert besonders, wie stark sich der Energiebedarf der Kühlszenarien und die Behaglichkeit im Bürogebäude ändert, wenn die Gebäudenutzung und die klimatischen Randbedingungen von den Auslegungswerten abweichen.

Basierend auf den Umfragen wurden zwei Kennwerte für die Robustheitsbeurteilung der Kühlszenarien definiert:

- (1) jährlicher akkumulierter Klimakältebedarf (Nutzenergiebedarf);
- (2) die jährlichen akkumulierten Überhitzungsstunden des Bürogebäudes.

Der erste Kennwert dient für die Beurteilung der Effizienz der Kühlszenarien, der zweite wurde zur Beurteilung der Behaglichkeit verwendet. Bei mehrjährigen thermischen Simulationen wurde jeweils das Mittel aller jahresbasierten Kennwerte gebildet. Auf der Basis dieser Berechnung wurden die Robustheitskriterien definiert:

- (1) Absolute Änderung des Mittels aller jahresbasierten Überhitzungsstunden zwischen den Klima- oder Nutzungsszenarien je Gebäudetyp;
- (2) Mittel des jahresbasierten akkumulierten Klimakältebedarfs.

Die untersuchten Kühlszenarien wurden miteinander verglichen und als „robust“ bewertet, wenn sich bei geänderten Randbedingungen die Überhitzungsstunden nicht ändern oder die Änderung minimal ist. Der Klimakältebedarf von gewissen Kühlszenarien wurde entsprechend variiert, um die Behaglichkeit garantieren zu können. Jedoch wurden diese Kühlszenarien trotzdem als „robust“ bewertet, wenn auch der Klimakältebedarf bei Klimaänderungen zugenommen hat.

Folgende Kühlszenarien wurden in dieser Studie untersucht:

- (1) Mechanische Lüftung inkl. Nachtauskühlung, ohne zusätzliches Kälteabgabesystem;
- (2) Mechanische Lüftung (nur während der Nutzungszeit) ohne zusätzliches Kälteabgabesystem;
- (3) Natürliche Lüftung anhand Fensteröffnung ohne zusätzliches Kälteabgabesystem;
- (4) Umluftkühlung mit mechanischer Lüftung;
- (5) Umluftkühlung mit natürlicher Lüftung;
- (6) Kühldecke mit mechanischer Lüftung;
- (7) Kühldecke mit natürlicher Lüftung;
- (8) Betonkernaktivierung mit mechanischer Lüftung.



Für die Berechnung der genannten Kennwerte pro Kühlszenario wurden thermische Simulationen mit dem Programm IDA ICE 4.6.1 durchgeführt.

Es wurden ein altes Bürogebäude mit grosser thermischer Trägheit (Bezeichnung „Altbau“), zwei Bürogebäude mit modernen Bauwerken und typischen Fenstern (Bezeichnung „Büroneubau“ und „Referenzgebäude“) sowie ein neues Bürogebäude mit grosser Fensterfläche (90 % der Oberfläche der Fassade, Bezeichnung „Firmenhauptsitz“) ausgewählt.

In diesem Projekt wurden die thermischen Simulationen in vier Schritten durchgeführt:

- I. Zuerst wurde der Einfluss des Klimas (Standort und Periode) auf den vier verschiedenen Bürogebäuden untersucht. Hier wurden der Heizwärme- und Klimakältebedarf für die ausgewählten Gebäude in Abhängigkeit des Standorts (Genf, Luzern und Locarno) und der Klimaperiode („Referenzperiode“ und „A1B mittel“) berechnet. Die genannten Kühlszenarien wurden noch nicht betrachtet. Somit konnten allgemeine Tendenzen bezüglich des Gebäudetyps und des Klimas erkannt und die Auswahl der vier Bürogebäuden für die weitere Untersuchung der Kühlszenarien überprüft werden. Nach dieser Auswertung wurden nur noch drei Bürogebäude für die weiteren Untersuchungen beibehalten.
- II. In einem zweiten Schritt wurde ein Dimensionierungsfall (bezüglich Kälteabgabesysteme) definiert. Hier wurden die Leistungen der ausgewählten Kälteabgabesysteme für die drei Bürogebäuden dimensioniert.
- III. In einem dritten Schritt wurden Simulationen der Klimavariabilität durchgeführt. Hier wurden die dimensionierten Kühlszenarien in den drei ausgewählten Bürogebäuden mit verschiedenen Klimaänderungsszenarien der Periode von 2021 bis 2050 für den Standort Basel simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen wurden mit den definierten Robustheitskriterien ausgewertet. Insgesamt wurden 3 Klimaszenarien für den Standort Basel verwendet: „Referenzperiode“ (historische Wetterdaten), „A1B lower“ und „A2 upper“, welche nach Swiss Climate Change Scenarios CH2011 definiert sind.
- IV. Zuletzt wurde die Untersuchung der Nutzervariabilität im Zusammenhang mit den Klimaänderungsszenarien durchgeführt. Für diese Studie wurden die definierten Kühlszenarien mit zwei Nutzervariabilitätsszenarien (maximalen und minimalen Nutzungsbelastungen) und drei Klimaänderungsszenarien kombiniert simuliert. Es wurden die Einflüsse der Klimaänderung und des Nutzerverhaltens auf die Robustheit der Kühlszenarien untereinander verglichen.

Bereits die Simulation des Dimensionierungsfalls zeigte einen Unterschied zwischen den Kälteabgabesystemen bezüglich des Klimakältebedarfs. Wenn die gleiche Behaglichkeit garantiert ist (gleiche Anzahl Überhitzungsstunden), ist der Klimakältebedarf bei den Kühlszenarien mit mechanischer Lüftung kleiner als die denjenigen mit natürlicher Lüftung. Dies lässt sich mit der grösseren Kühlwirkung der mechanischen Lüftung auf Grund deren Wärmerückgewinnung gegenüber der Fensterlüftung erklären.

Die Simulation der prognostizierten 30 Jahre Klimaänderungsszenarien zeigte folgendes:

- „Altbau“: deutliche Zunahme des Klimakältebedarfs sowie der Überhitzungsstunden im Vergleich zur „Referenzperiode“ (Klima). Der Klimakältebedarf steigt durchschnittlich von 1.5 bis auf 2.7 kWh/m² (Zunahme von 80%);
- „Referenzgebäude“: mittlere Zunahme des Klimakältebedarfs sowie der Überhitzungsstunden zur „Referenzperiode“ (Klima). Der Klimakältebedarf steigt durchschnittlich von 7.9 bis auf 11.3 kWh/m² (Zunahme von 43%);



- „Firmenhauptsitz“ (komplett verglasten Bürogebäude): geringe Zunahme des Klimakältebedarfs aber relevante Zunahme der Überhitzungsstunden zur „Referenzperiode“ (Klima). Der Klimakältebedarf steigt durchschnittlich von 26.8 bis auf 32.2 kWh/m² (Zunahme von 20%).

Die Robustheitsbeurteilung der untersuchten Kühlszenarien bei geänderten Klimabedingungen zeigte, dass die Betonkernaktivierung und die Kühldecke mit und ohne mechanische Lüftungsanlage grundsätzlich für alle untersuchten Bürogebäude robuster als andere sind.

Die mechanische Lüftung inkl. Nachtauskühlung ohne zusätzliches Kälteabgabesystem ist eine alternative robuste Option für Bürogebäude wie den „Altbau“, welche mehr thermische Trägheit haben. Die Umluftkühlung mit mechanischer Lüftung ist auch robust für Bürogebäude mit grossen Fensterflächen wie den „Firmenhauptsitz“.

Die Robustheitsbeurteilung der Kühlszenarien bezüglich der Nutzervariabilität zeigte grundsätzlich die gleichen Aussagen wie für die Robustheitsbeurteilung bezüglich der Klimaänderung. Die Kühlszenarien mit Betonkernaktivierung zeigen sich im Fall einer Nutzungsänderung als weniger robust gegenüber den Kühlszenarien mit Kühldecke oder Umluftkühlung. Der Vergleich zwischen der Nutzervariabilität und der Klimaänderung zeigte, dass der Einfluss der Klimaänderung nur bei Kühlszenarien mit Umluftkühlung oder Kühldecke zu erkennen ist, und dass diese Beobachtung unabhängig vom Nutzerprofil ist.



2. Abkürzungsverzeichnis

c_W	spezifische Wärmekapazität des Wassers J/(kg·K)
c_L	spezifische Wärmekapazität der Luft J/(kg·K)
d	Innendurchmesser des Rohrs m
E_{aux}	Hilfsenergiebedarf pro Gebäudemodell W
E_{aux_Raum}	Hilfsenergiebedarf pro Raum W
F_{Raum}	Bodenfläche des Raums
F_K	Querschnittsfläche des Luftkanals m ²
F_T	Oberfläche des Wärmetauschers m ²
G_W	Massenstrom des Wassers kg/s
K	Wärmedurchgangskoeffizient W/(m ² ·K)
L	Rohrlänge im Wärmetauscher m
n	Anzahl der Räume im Gebäudemodell
Q_C	Klimakältebedarf des Gebäudemodells kWh
Q_{C_Raum}	Klimakältebedarf des einzelnen Raums kWh
Q_{W_T}	Leistung des Wärmestauschers W
t_a	Luftaustrittstemperatur °C
t_e	Luft Eintrittstemperatur °C
t_R	mittlere Raumlufttemperatur °C
$t_{\ddot{U}}$	die Überhitzungsstunden eines Gebäudemodells
$t_{\ddot{U}_Raum}$	Anzahl der Überhitzungsstunden eines einzelnen Raums
t_W	mittlere Wassertemperatur °C
t_{W1}	Wassereintrittstemperatur °C
t_{W2}	Wasseraustrittstemperatur °C
u_L	Luftgeschwindigkeit m/s
u_W	Geschwindigkeit des Wassers im Rohr m/s
ρ_L	Dichte der Luft kg/m ³
ρ_W	Dichte des Wassers kg/m ³
Φ	Abkühlungszahl
A1B lower	Prognostizierte Periode der Klimadaten 2021-2050 basierend auf dem tiefen A1B Emissionsszenario
A2 upper	Prognostizierte Periode der Klimadaten 2021-2050 basierend auf dem hohen A2 Emissionsszenario
DRY	Design Reference Year nach SIA Merkblatt 2028
Referenzperiode	historische Klimadaten von 1980-2009
WRG	Wärmerückgewinnung



3. Ausgangslage und Motivation

Heutige normative Anforderungen [1], [2] für die Simulation und Dimensionierung der Lüftungs- und Klimaanlage verlangen keine zusätzlichen Untersuchungen des Einflusses von geänderten Randbedingungen wie Klima- und Nutzervariabilität. Planungsgrundlagen bieten auch keine direkt nutzbare Datensätze an, welche die Variabilität des Nutzerverhaltens und des Klimas beschreiben. Häufig fehlt es den Planern auch an dokumentiertem methodologischem Wissen, um solche Analysen zielführend durchzuführen.

Integrierte gebäudetechnische Systeme wurden in diesem Projekt so verstanden, dass die eigentliche Gebäudetechnik, wie Lüftung und Kühlung, in eine Gebäudehülle eingebettet und darauf abgestimmt sind. Solche Systeme haben Lebenszyklen von mehreren Jahrzehnten. Innerhalb dieses Zeitraumes ändert sich nicht nur die Nutzung der Gebäude mehrfach, sondern aller Wahrscheinlichkeit nach auch das Aussenklima. Es wird erwartet, dass die gebäudetechnischen Anlagen energieeffizient ein behagliches Raumklima gewährleisten unter Randbedingungen, die von den Auslegungsbedingungen abweichen. Jedoch sollte diese Fähigkeit des Systems in jedem Fall überprüft werden.

In der Regel wird dem Risiko durch ein Überdimensionieren der gebäudetechnischen Komponenten begegnet. Die Überdimensionierung führt unter anderem zu unnötig hohen Investitionskosten und ineffizientem Betrieb der Anlagen im Teillastbereich (das gilt insbesondere für die in diesem Projekt nicht betrachteten Kälteerzeugungssysteme). Auf der anderen Seite birgt die punktgenaue Dimensionierung der Technik aufgrund der fehlenden Leistungsreserven das Risiko, nicht auf kurzfristig auftretende Lastspitzen reagieren zu können, was zu einem unbehaglichen Raumklima führen kann.

Die vermutete Erhöhung der Aussentemperatur in den nächsten 30 Jahren geht einher mit der Veränderung des Energiebedarfs und der Behaglichkeit von Gebäude [3]. Die bestehenden Heizsysteme in den Gebäuden können in Zukunft die Anforderungen vermutlich erfolgreich erfüllen, weil davon auszugehen ist, dass der jährliche Heizwärmebedarf und die Leistungsspitze reduziert werden. Aus der gleichen Vermutung wird der Klimakältebedarf des Gebäudes erhöht und der Nutzerkomfort im Sommer und teilweise im Herbst und Frühling verschlechtert [3]. Die Berechnungsergebnisse zeigten [3], dass der jährliche Klimakältebedarf für Bürogebäude mit internen Wärmegegewinnen von 20-30 W/m² um 223-1050 % steigt, während der Heizwärmebedarf um 36-58% sinken wird.

In diesem Projekt wurde erstmals mit der Hilfe von dynamisch-thermischen Gebäudesimulationen die Frage untersucht, welche Kühlkonzepte für verschiedene Bürogebäude am „robustesten“ auf Lastschwankungen reagieren. Diese helfen somit, im Gebäudebetrieb die geplante energetische Qualität (z.B. Net-Zero Energy oder Plusenergie) [4] zu erreichen und über den Lebenszyklus der Gebäudekomponenten zu gewährleisten.



4. Aufgabe und Ziele

Erfahrungen aus dem Gebäudebetrieb zeigen, dass das Erreichen der Planungszielwerte keine triviale Aufgabe ist. Häufig werden diese nicht erreicht [5]. Um die Effizienzziele der Energiestrategie 2050 [6] zu gewährleisten, ist es notwendig, Gebäude so zu planen, zu bauen und zu betreiben, dass die Zielwerte mindestens über den Lebenszyklus der gebäudetechnischen Anlagen erreicht werden. Dazu ist es notwendig, die Einflüsse des Klimas und der Gebäudenutzung auf die Energiebilanz schon während der Planungsphase zu berücksichtigen.

Das Ziel aktueller Forschungsinitiativen der Europäischen Kommission ist, Gebäuden und deren gebäudetechnischen Anlagen die Fähigkeit mitzugeben, sich auf ändernde Randbedingungen wie Klima und/oder Nutzung einzustellen [7]. Um das zu erreichen, ist es nötig, Voraussetzungen zu schaffen, die es Architekten, Planern und Betreibern erlaubt, die Qualität des Gebäudebetriebes zu bewerten.

Bis dato gibt es keine vergleichende Bewertung gebäudetechnischer Kälteabgabesysteme hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Nutzungsschwankungen und Klimawandel. Wie die Robustheit der untersuchten Kühlkonzepte bewertet werden kann, wurde im Rahmen dieses Projektes definiert. Der Einfluss der verschiedenen Eigenschaften der Gebäude (z.B. thermische Speicherfähigkeit oder Fensteranteil) auf die Robustheit der untersuchten Kälteabgabesysteme wurde in dieser Studie untersucht. Es wurden mechanische und natürliche Lüftungskonzepte betrachtet. Anschliessend wurden Empfehlungen für die Auswahl Kühl- und Lüftungskonzepte je verschiedene Gebäudetypen gemacht.

Dabei interessierte besonders, wie stark sich die thermische Behaglichkeit und der Betriebsenergiebedarf der Kälteabgabesysteme ändert, wenn die Gebäudenutzung und die klimatischen Randbedingungen von den Auslegungswerten abweichen. Das Ziel des Projektes war, Ansätze zu erarbeiten, die den Planern und Betreibern des Kälteabgabesystems eine frühe Robustheitsbewertung ermöglichen, sowie Massnahmen zu identifizieren, die dazu beitragen, die Robustheit bestehender Systeme zu erhöhen.

Die erarbeiteten Datensätze sollen die Planer in die Lage versetzen, selbst Robustheitsanalysen durchzuführen.

5. Methode

5.1 Herangehensweise und Abgrenzung

In dieser Studie wurden nur Bürogebäude untersucht. Der Klimakältebedarf und die Hilfsenergie der ausgewählten Kühlkonzepte, wie auch die empfundenen Raumtemperaturen in den verschiedenen Bürogebäuden wurden durch thermische Simulationen berechnet [8]. Bedingt durch die breite Funktionalität und Branchenverwendung wurde dazu IDA-ICE verwendet. IDA-ICE ist ein kommerzielles dynamisch-thermisches Gebäudesimulationsprogramm, das die Simulation von Gebäuden inkl. der Gebäudetechnik-Systeme erlaubt. Im Projekt wurde die Version 4.6.1 verwendet.

In diesem Projekt wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt (Abbildung 1), welche in den Kapiteln 5.2-5.4 im Detail erläutert sind:

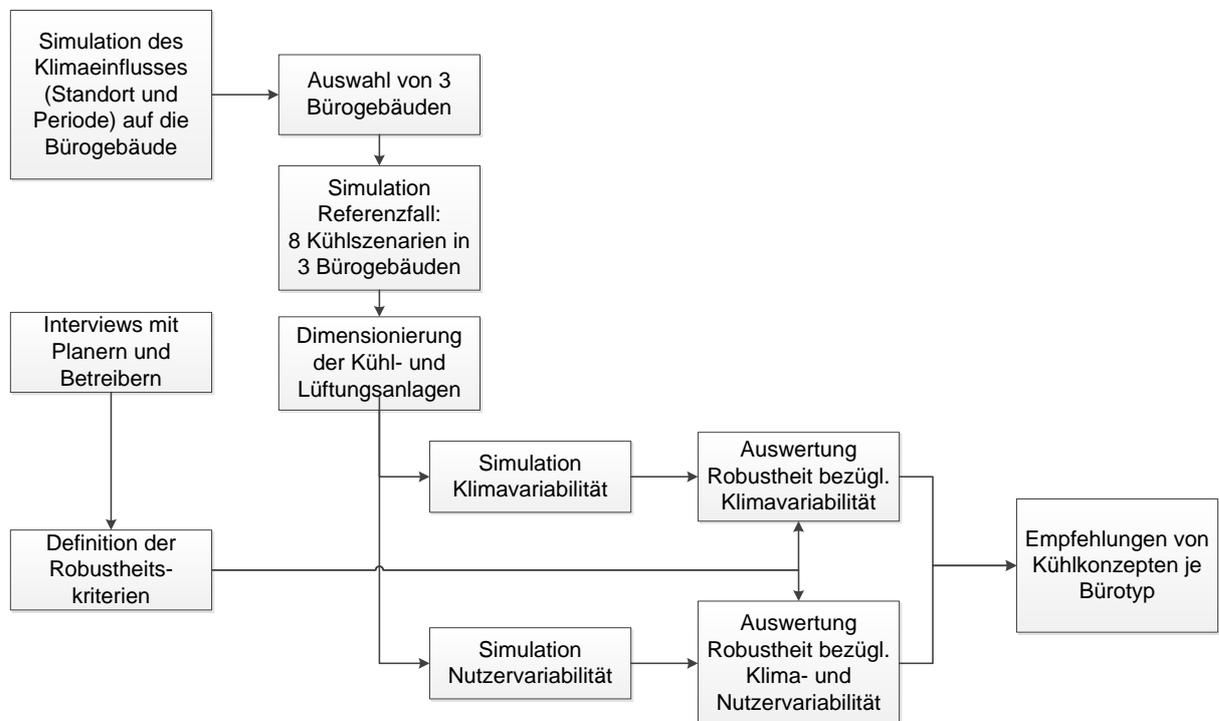


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise.

Es wurden vier Serien von Gebäudesimulationen durchgeführt:

- I. Zuerst wurde für die ausgewählten Bürogebäude (siehe Kap. 5.4.1) und für drei verschiedene Standorte der Einfluss von zwei Klimaperioden („Referenzperiode“ und „A1B mittel“) simuliert.
- II. Des Weiteren wurden die acht ausgewählten Kühlszenarien (siehe Kap. 5.3.2) für jedes Bürogebäude simuliert, um die Kälteabgabesysteme zu dimensionieren (Dimensionierungsfall).
- III. Als nächstes wurde die Klimavariabilität für die verschiedenen Kühlszenarien und Bürogebäude simuliert und die Robustheit der Kälteabgabesysteme diesbezüglich ausgewertet.
- IV. Zuletzt wurde die Nutzervariabilität zusätzlich zur Klimavariabilität simuliert und die Robustheit der Kälteabgabesysteme wiederum ausgewertet.



5.2 Definition der Robustheit

5.2.1 Robustheitsbewertung in der Gebäudeplanung

Zur qualitativen Bewertung des Gebäudebetriebs werden mehrere Begriffe parallel verwendet. Zusätzlich zum Begriff Robustheit werden alternative Begriffe wie z.B. Flexibilität (engl. flexibility), und Belastbarkeit (engl. resilience) genutzt [9]. In dieser Studie begrenzten sich die Autoren auf die Betrachtung der Robustheit des Gebäudekonzeptes.

Die Autoren definierten die Robustheit eines integrierten Gebäudekonzeptes nach [10] als:

„Die Fähigkeit eines Systems, welches Architektur und Gebäudetechnik integriert, Änderungen zu widerstehen ohne seine Struktur anzupassen. Somit funktioniert ein integriertes Gebäudekonzept dann robust, wenn es trotz sich ändernder Randbedingungen in der Lage ist, die Planungszielwerte innerhalb akzeptabler Grenzen zu gewährleisten.“

Für die Ermittlung der Bedürfnisse und Anforderungen wurden mit Planern und Verwaltern in Bezug auf die Robustheitsbetrachtung von Kühlszenarien Interviews durchgeführt. Dabei lag der Fokus sowohl auf der Planungs- aber auch auf der Betriebsphase von Gebäuden. Die Kernfragen und die Ergebnisse der Interviews sind im Anhang (Kapitel 10.1) dargestellt. Die daraus erkannten Kernbedürfnisse der Interviewten sind: den geplanten Energiebedarf, die Behaglichkeit und die Anpassungsfähigkeit über die Lebensdauer der Gebäude zu gewährleisten.

5.2.2 Definition der Robustheitskriterien

Für die Definition der Robustheitskriterien wurden in dieser Studie zwei Kennwerte bestimmt, welche aus den Antworten der Interviews hergeleitet wurden:

- (1) die jährlichen akkumulierten **Überhitzungsstunden**;
- (2) der jährliche akkumulierte **Klimakältebedarf** (Nutzenergiebedarf).

Weil die Bürogebäude naturgemäss über mehrere Räume verfügen, wurden diese Kennwerte für das gesamte Gebäudemodell betrachtet. Der Klimakältebedarf des gesamten Gebäudemodells wurde dazu mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$Q_C = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_{C_Raum}^i}{F_{Raum}^i}, \quad (1)$$

wo Q_C – der Klimakältebedarf des ganzen Gebäudemodells; n – die Anzahl der Räume; F_{Raum}^i – die Bodenfläche des einzelnen Raums, $Q_{C_Raum}^i$ – der Klimakältebedarf des einzelnen Raums ist.

In der SIA Normen [1] wird der zulässige Bereich der empfundenen Temperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur beschrieben (Abbildung 2). Dieser Bereich gilt für Räume, die gekühlt, beheizt und mechanisch belüftet werden [1]. Für die Räume mit natürlicher Lüftung sind die Anforderungen in Abbildung 3 dargestellt.

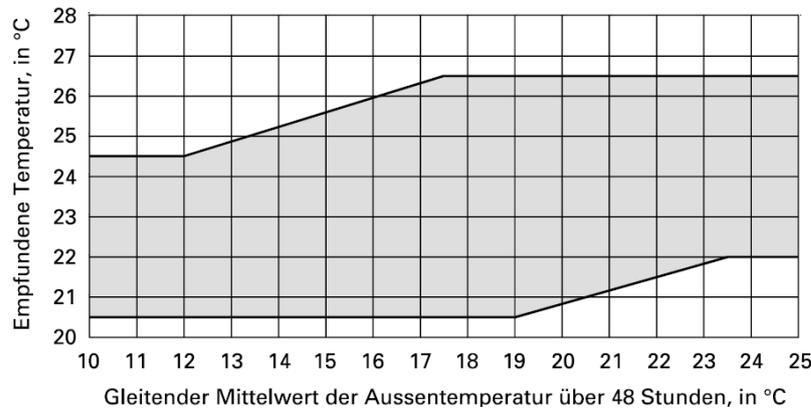


Abbildung 2: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen mit mechanischer Lüftung [1].

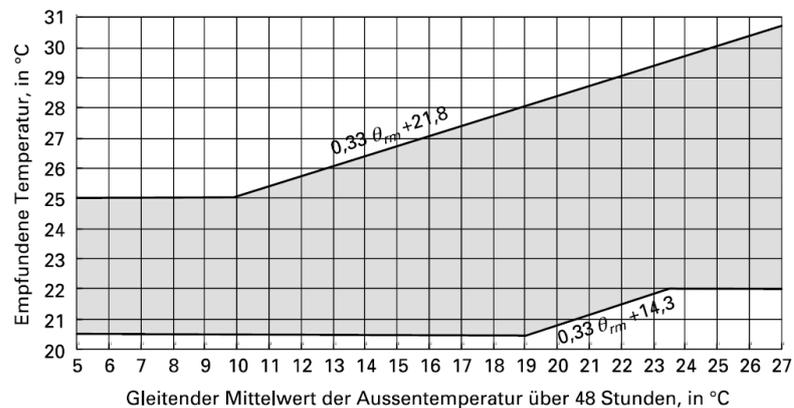


Abbildung 3: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen mit natürlicher Lüftung [1].

Der Vergleich zwischen den oberen Grenzkurven in der Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigt eine deutliche Differenz. Die Kühlszenarien mit mechanischer und natürlicher Lüftung sind somit nicht direkt vergleichbar. Es wurde darum entschieden, die empfundene Temperatur mit den Kälteabgabesystemen auf die obere Grenzkurve der Abbildung 2 zu regeln.

Die Überheizungsstunden des gesamten Gebäudemodells wurden mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$t_{\dot{U}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{\dot{U}\text{-Raum}}^i \quad (2)$$

wo $t_{\dot{U}\text{-Raum}}^i$ – die Überheizungsstunden eines einzelnen Raums im Gebäudemodell ist.

Die Überheizungsstunden von Räumen sind die akkumulierten Stunden im Jahr, bei welchen die operative Raumlufttemperatur 0.5 K über der oberen Grenzkurve der Abbildung 2 liegt. Dieser Abstand zur Grenzkurve wurde gewählt, um sehr kleine Abweichungen zum Sollwert aufgrund der Regelung nicht schon als Überheizungsstunde zu werten. Es wurde angenommen, dass eine Überschreitung von maximal 100h im Jahr toleriert werden kann. Anstelle der Berechnung mit dem gleitenden Mittelwert wurde der aktuelle Wert der Aussentemperatur angenommen. Die Überheizungsstunden können also nicht mit den Werten aus der SIA Normen [1] verglichen werden.



Für die Auswertung der Kühlszenarien bezüglich ihrer Robustheit wurden schrittweise folgende Berechnungen durchgeführt:

- (1) Absolute Werte des Klimakältebedarfs (kWh) und der Überhitzungsstunden (h) je Gebäudetyp, Klimaperiode und Nutzerprofil;
- (2) Absolute Änderungen der Überhitzungsstunden (h) bei der Variation der Klimaperioden / Nutzerprofile je Gebäudetyp;
- (3) Vergleich der absoluten Änderungen der Überhitzungsstunden zwischen den verschiedenen Kühlszenarien je Gebäudetyp, Klimaperiode und Nutzerprofil;
- (4) Ordnen der Kühlszenarien je Gebäudetyp, Klimaperiode und Nutzerprofil basierend auf dem Vergleich der absoluten Änderungen der Überhitzungsstunden;
- (5) Falls die absoluten Änderungen der Überhitzungsstunden ähnlich sind, Vergleich des absoluten Klimakältebedarfs zwischen den verschiedenen Kühlszenarien je Gebäudetyp, Klimaperiode und Nutzerprofil.

Ein Kühlszenario wurde somit als „robuster“ bewertet, wenn die absoluten Änderungen der Überhitzungsstunden im Vergleich zu einem anderen Kühlszenario entsprechend kleiner sind.

Für die Simulationsstudie zur Nutzungsvariabilität wurde die absolute Änderung der Überhitzungsstunden zwischen den Kühlszenarien der Nutzerbelastung beurteilt. Eine kleine Änderung wurde als robuster bewertet als eine grosse.

Je nach Kühlszenario wird bei einer höheren Kühllast aufgrund der Änderung der Randbedingungen (Klimaperioden / Nutzerprofile) durch die Regelung und eine grössere Kühlleistung eines Kälteabgabesystems abgerufen. Damit werden die Überhitzungsstunden tief gehalten und der Komfort beibehalten. Wenn für die Überhitzungsstunden der Wert von 100 h/a beibehalten werden konnte, aber der Klimakältebedarf dafür zugenommen hatte, wurde das entsprechende Kühlszenario trotzdem als „robust“ bewertet. Wenn zwei Kühlszenarien eine etwa gleiche Anzahl Überhitzungsstunden erzielt haben ($\pm 5\%$ der absoluten Werte), wurde das Kühlszenario, welches den tieferen absoluten Klimakältebedarf aufweist, als „robuster“ ausgewertet.

Für die Anordnung der acht Kühlszenarien bezüglich ihrer Robustheit bei Klima- oder Nutzeränderungen wurde eine Skala von 1 bis 8 definiert. Die Anordnung wurde je Gebäudetyp, Klimaperiode und Nutzerprofil durchgeführt. Das „robusteste“ Kühlszenario wurde mit einer Note von 8 bezeichnet, das wenigsten „robust“ mit einer Note von 1.



5.3 Auswahl der Kühlszenarien

5.3.1 Auswahl der Lüftungskonzepte

Es wurden jeweils zwei verschiedene Lüftungskonzepte ausgewählt:

- mechanische Lüftung;
- natürliche Lüftung durch das Öffnen der Fenster.

Die Kühlung eines Gebäudes kann je nach Situation ohne Kälteanlage durchgeführt werden. Die Räume können mit mechanischer oder natürlicher Lüftung während der Nutzungszeit oder der Nacht gekühlt werden, was nach [1] als Freecooling bezeichnet wird. Dabei erfolgt die Kühlung durch Nutzung einer natürlichen Wärmesenke (z.B. kühle Aussenluft) ohne Kältemaschine [1]. Zum Freecooling gehören die genannte mechanische und natürliche Lüftung. Der Klimakältebedarf ist für diese Kühlkonzepte gleich null. In dieser Studie wurde die Nachtkühlung nur mit einer mechanischen Lüftung betrachtet.

(1) Mechanische Lüftung

Für die mechanische Lüftung wurde eine Wärmerückgewinnung (WRG) mit einem Wirkungsgrad von 85% modelliert. Der Aussenluftvolumenstrom wurde nach [11] definiert (Tabelle 1).

Raumtyp	Aussenluftvolumenstrom [l/(s·m ² Bodenfläche)]
Einzelbüro	0.722
Grossraumbüro	1.000
Sitzungszimmer	3.333
Verkehrsfläche	0.555
Nebenraum	0.138
WC	2.222

Tabelle 1: Parameter der Lüftung für die untersuchten Bürogebäude [11]

Sind die Raumtemperaturen entsprechend hoch, so dass ein Klimakältebedarf besteht, aber die Aussenlufttemperaturen genügend tief sind, um Freecooling zu betreiben, ist die Wärmerückgewinnung nicht sinnvoll. Der Grund für den Klimakältebedarf liegt dabei meistens in den internen Wäreinträgen durch Betriebseinrichtungen, Beleuchtung und die Belegung. Um das Freecooling möglich zu machen wurde die WRG somit für die entsprechenden Konditionen jeweils ausgeschaltet (Bypass).

Insgesamt hat die Regelung der Wärmerückgewinnung drei Operationsmodi:

- EIN, wenn Heizen notwendig ist (die Raumlufttemperatur ist tiefer als 21 °C)
- AUS, wenn die Raumtemperatur zwischen dem unteren und oberen Grenzwert liegt, mindestens aber 1K kühler ist als der obere Grenzwert der Raumtemperatur (Abbildung 2).
- EIN, wenn die Raumtemperatur über den oberen Grenzwert der Raumtemperatur abweicht (Abbildung 2).

Die Hysterese von einem Kelvin wurde aus Gründen der numerischen Berechnung gewählt.



Es wurden zwei verschiedenen Kühl Szenarien mit mechanischer Lüftung definiert:

- a) Mechanische Lüftung während der Nutzungszeit und Nachtbetrieb (S1)
- b) Mechanische Lüftung während der Nutzungszeit (S2)

Der Nachtbetrieb bezieht sich auf die Erweiterung der Betriebszeit der Lüftungsanlage von 19 Uhr bis 7 Uhr [12] für die Sommerperiode (15. April – 15. Oktober). Die Wärmerückgewinnung (WRG) ist während der Nachtkühlung ausgeschaltet. Der Luftvolumenstrom für die Nachtkühlung wird um einen Faktor 3 erhöht [13]. Die Nachtkühlung ist ausgeschaltet, wenn die Innenlufttemperatur unten 21 °C ist.

(2) Natürliche Lüftung

Die natürliche Lüftung ist nur während der Nutzungszeit im Betrieb (S3). Für die Kühl Szenarien mit einer natürlichen Lüftung erfolgt die Regelung der Fensteröffnung abhängig von der Raumlufttemperatur und vom CO₂-Pegel. Die Schwellenwerte des Thermostats liegen bei 21°C und 26°C, der untere und obere Grenzwert des CO₂-Pegels liegt bei 950 und 1350 ppm.

Da der Aussenluftvolumenstrom nicht begrenzt wird, kann dieser höher sein als beim Einsatz eines mechanischen Lüftungssystems.

5.3.2 Auswahl der Kühlkonzepte

Die Erzeugungsseite des Kälteanlage wurde nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass nur der Klimakältebedarf (Nutzenergie) berechnet wurde. Per definitionem ist der Klimakältebedarf eine Wärme, die dem klimatisierten Raum durch ein Kälteabgabesystem entzogen werden muss, um den Sollwert der Raumtemperatur zu halten. Der Wert kann absolut oder bezogen auf die Energiebezugsfläche [14] angegeben werden. Jedoch beeinflusst die natürliche und mechanische Lüftung den Klimakältebedarf, weshalb für die Umluftkühlung und die Kühldecke beide Lüftungssysteme (mechanisch und natürlich) separat betrachtet wurden. Die Betonkernaktivierung wurde in dieser Studie nur mit einer mechanischen Lüftung untersucht.

Folgende Kälteabgabesysteme wurden im Rahmen dieser Studie untersucht.

(1) Umluftkühlung

Das Umluftkühlssystem in dieser Studie wurde als Luft-Wasser-Wärmeübertrager mit einem Ventilator auf der Primärseite und einer Wasserpumpe auf der Sekundärseite betrachtet. Es handelt sich also um eine klassische Fancoil-Unit, auch Gebläsekonvektor genannt. Mit diesem System strömt die Raumluft durch den Wärmeübertrager, wird dort mit Kaltwasser gekühlt und wieder zurück in den Raum geblasen. Die Leistung des Systems ist direkt abhängig vom Luftvolumenstrom, welcher durch eine PI-Regelung so eingestellt wird, dass die empfundene Temperatur unter der oberen Grenzkurve nach der Abbildung 2 gehalten wird. Jedoch hängt die Effizienz des Wärmeübertragers wiederum vom Luftvolumenstrom ab. Diese Abhängigkeit wird nach [15] definiert und im Kapitel 10.3.1 dargestellt.

In diesem Kälteabgabesystem gibt es Druckverluste, welche der Ventilator auf der Primärseite des Wärmetauschers und die Pumpe auf der Sekundärseite kompensieren müssen. Die Bestimmung der Druckverluste auf den beiden Seiten des Wärmetauschers wird im Anhang 10.3.1 beschrieben.

(2) Kühldecke

Die Effizienz der Kühldecke ist abhängig von der Konstruktion und kann in einem grossen Bereich variieren. Typische Formen von Konstruktionen von Kühldecken und die Leistungskurve sind im Anhang (Kapitel 10.3.2) dargestellt. Aus diesen Formen wurde Form B für die weitere Untersuchung gewählt, weil die Leistungskurve dieser Form eine mittlere Leistungskurve im Vergleich mit alle anderen darstellt. Es wurde angenommen, dass die Kühldecke 80% der Deckenfläche des Raums abdeckt und der Wassermassenstrom entsprechend der Raumtemperatur geregelt wird.



(3) **Betonkernaktivierung (TABS)**

Bei herkömmlichen Kälteabgabesystemen der thermischen Bauteilaktivierung werden wasserdurchflossene Rohrsysteme im Inneren von speicherfähigen Bauteilen eingesetzt, deren Oberflächen gleichzeitig die räumliche Leistungsbegrenzung darstellen. Vorzugsweise kommen Massivdecken zum Einsatz. Die Gebäudemodelle wurden deshalb für die entsprechenden Kühlszenarien mit 30cm dicken Betondecken ausgestattet, egal welche Konstruktion der Gebäudetyp sonst aufwies. Die Dimensionierungsmethode für die Betonkernaktivierung ist im Anhang zu finden (Kapitel 10.3.3). Es wurde keine Regelung für die Betonkernaktivierung implementiert. Die Betriebszeit der Betonkernaktivierung wurde im Dimensionierungsfall bestimmt und bleibt danach für die Untersuchung der Klima- und Nutzervariabilität konstant.

Die Betonkernaktivierung ist ein Kälteabgabesystem mit hoher Wärmekapazität. Das erlaubt, die Einschaltdauer der Betonkernaktivierung während der Nacht als ihre Anpassungsfähigkeit zu nutzen. Das kann im Rahmen einer modellprädiktiven Regelung erfolgen, stellt aber auch eine durch das Betriebspersonal von Hand nachstellbare Leistungsreserve dar. Um die maximale theoretische Anpassungsfähigkeit zu demonstrieren, wurde die Betriebszeit während der Nacht für die Fälle der Klimavariabilität (Klimaperiode „A1B lower“ und „A2 upper“) manuell erhöht (von 20 Uhr am Abend bis 9 Uhr am Morgen). Danach wurden die Änderung der Überhitzungsstunden als Differenz zwischen den Überhitzungsstunden während der Klimaperiode „A1B lower“ (oder A2 upper“) mit angepasster Betonkernaktivierung und den Überhitzungsstunden während der „Referenzperiode“ mit nicht angepasste Betonkernaktivierung berechnet.

Die anderen Kälteabgabesysteme (Umluftkühlung und Kühldecke) weisen eine solche Anpassungsfähigkeit nicht oder nur beschränkt auf.

Bei der Untersuchung der Nutzervariabilität wurden keine Anpassungen in der Einschaltdauer der Betonkernaktivierung vorgenommen, da deren Kurzfristigkeit eine Anpassung nicht zulässt (Ausnahme: modellprädiktive Regelung). Im Fall von prinzipiellen und bleibenden Nutzungsänderungen (z.B. Nutzerwechsel mit starker Änderung der Belegungsdichte) wäre eine Anpassung durch das Betriebspersonal jedoch auch möglich.

5.3.3 Zusammenfassung der Kühlszenarien

Die Kombination der vier ausgewählten Kühlkonzepte mit den zwei Lüftungskonzepten führt zu insgesamt acht Kühlszenarien, welche in dieser Studie untersucht wurden (siehe Tabelle 2).

Lüftungskonzept	Keine Kälteabgabesysteme	Umluftkühlung	Kühldecke	Betonkernaktivierung
Mechanische Lüftung mit Nachbetrieb	S1	-	-	-
Mechanische Lüftung	S2	S4	S6	S8
Natürliche (Fenster-)Lüftung	S3	S5	S7	-

Tabelle 2: Untersuchte Kühlszenarien S1-S8.

In allen Kühlszenarien mit und ohne spezifische Kälteabgabesysteme wird elektrische Energie für die Hilfsaggregate benötigt. Diese Hilfsenergie ist die elektrische Energie, die benötigt wird, um die Energietransformation zur Deckung des Klimakältebedarfs zu unterstützen [14]. Sie besteht aus dem Energiebedarf für Ventilatoren und Pumpen.

Es wurde ein Wirkungsgrad von 60% für die Ventilatoren und Pumpen angenommen. Für die Kühlszenarien S2 und S3 ist die Hilfsenergie gleich null.



Zusätzlich wurde der jährliche akkumulierte Hilfsenergiebedarf für die verschiedenen Kühlszenarien gerechnet, um der Einfluss der Änderung des Nutzenergiebedarfs auf die Hilfsenergie zu überprüfen. Letzterer ist wie folgt definiert (die simulierten Werte wurden nicht ins Detail analysiert und sind im Kapitel 10.4 zu finden):

$$E_{aux} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{E_{aux_Raum}^i}{F_{Raum}^i} \quad (3)$$

Dabei sind

E_{aux} der elektrische Energiebedarf der Kühlszenarien des gesamten Gebäudes;

$E_{aux_Raum}^i$ der elektrische Energiebedarf des Kälteabgabesystems des einzelnen Raums.



5.4 Definition der Variabilität

5.4.1 Auswahl der Bürogebäude

Die unterschiedlichen Gebäudetypologien erfordern individuelle Gebäudetechnikkonzepte. Für die Wahl des geeigneten Konzeptes wurden folgende Faktoren berücksichtigt: (1) Fassadenaufbau und Verglasungsanteil; (2) Bauteiltypen; (3) Alter des Gebäudes (Umbau oder Neubau). Die Auswahl der Gebäude erfolgte auf Grundlage der abgeleiteten Gebäudetypen mit dem Ziel, eine möglichst grosse Bandbreite an Bürogebäuden abzudecken und gleichzeitig typische Bürogebäude auszuwählen. Die Grundlagen für die Auswahl der Bürogebäude sind im Anhang 10.2 dargestellt. In den Gebäudeauswahl, siehe Tabelle 3, sind Gebäudetypologien aus unterschiedlichen Bauperioden vertreten mit punkt-, riegel-, und u-förmigen Grundrissen sowie Gebäudetiefen von ca. 12 – 40 m. Die Raumtypologien beinhalten Einzel-, Gruppen und Grossraumbüros mit unterschiedlichen Fassadentypen (Loch-, Band- und Ganzglasfassaden) und den entsprechenden Fensterflächenanteilen von ca. 40% - 90%.

Charakteristiken				Beispiel	
Pos.	Bezeichnung	Architektur/Raum	Gebäudetechnik	Gebäude	Bild
1	Referenzgebäude	Bestandsbau; Lochfassade mit 50% Verglasung, Einzel- und Gruppenbüros, Decke Beton roh	Kühlung und Grundbeheizung durch Betonkernaktivierung; mechanische Lüftung im Deckenbereich, Deckenleuchten, Erschliessung der Arbeitsplätze über Brüstungskanäle	Actelion, Allschwil [16]	
2	Altbau (Riegel)	Bestandsbau; Lochfassade mit 30%-40% Verglasung, vorwiegend Einzelbüros, Unterlagsboden mit fugenloser Abdeckung, Decke Beton roh	Keine mechanische Kühlung, Gaskessel mit Radiatorenheizung, mechanische Lüftung im Deckenbereich, Deckenleuchten, Erschliessung der Arbeitsplätze funktioniert über Brüstungskanäle	Landis und Gyr Gebäude Zug [17]	
3	Büroneubau	Bestand oder Neubau; U-Form; Bandfassade; 30-60% Verglasung; Doppelboden; Decke roh; Einzel- und Gruppenbüros	Quelllüftung über Doppelboden; mechanische Kühlung; Gaskessel mit Radiatorenheizung; Stehleuchten	Anaxo, Pratteln [18]	
4	Firmenhauptsitz	Bestand oder Neubau; Bandfassade; bis 90% Verglasung; Doppelboden; Decke Beton roh; überwiegend Grossraumbüros	mechanische durch deckennahe Kühlsegel, Sole/Wasser Wärmepumpe; verwenden; Deckenheizung; Quelllüftung über den Doppelboden, Stehleuchten.	EuropTec Oftringen [19]	

Tabelle 3: Gebäudetypen für die Robustheitsbewertung.

Nach Vorlage der oben beschriebenen realen Gebäude wurden Simulationsmodelle erstellt.



Der Heizwärme- und Klimakältebedarf der ausgewählten Objekte aus der Simulation wurde anschliessend mit den gemessenen jährlichen Verbrauchswerten zur Validierung verglichen. Bei diesem ersten Schritt wurden als Vereinfachung das Erd-, Mittel- und Dachgeschoss jedes Gebäudes modelliert. Um die Simulationszeit weiter zu reduzieren, wurde für die Studie dann jeweils nur ein Mittelgeschoss pro Gebäude simuliert. Damit Aussagen für das ganze Gebäude abgeleitet werden konnten, wurden Skalierungsfaktoren für den Nutzenergiebedarf eingeführt (Tabelle 4) Diese Faktoren skalieren den berechneten Nutzenergiebedarf des mittleren Stockwerks auf das ganze Gebäude hoch.

	Referenz	Altbau	Büroneubau	Firmenhauptsitz
Geschossfläche	724	1161	2422	387
Anzahl Geschosse	6	7	5	3
Fläche Total	4'345	8'127	12'108	1'160
Faktor Heizen	6.28	8.80	6.89	n/a
Faktor Kühlen	5.40	6.83	4.98	n/a

Tabelle 4: Skalierungsfaktoren für den Heizwärme- und Klimakältebedarf.

Die Betriebseinrichtungen, die Beleuchtung und die Belegung pro Raum wurden nach [11] definiert (Tabelle 5).

Raumtyp	Betriebseinrichtungen [W/m ²]	Beleuchtung [W/m ²]	Belegung [Personen pro m ²]
Einzelbüro	7.0	15.9	0.1
Grossraumbüro	10.0	15.9	0.1
Sitzungszimmer	2.0	15.9	0.3
Verkehrsfläche	0.0	7.0	0.0
Nebenraum	0.0	7.1	0.0
WC	0.0	17.2	0.0

Tabelle 5: Interne Lasten der untersuchten Gebäude.

Um die Simulationszeit weiter zu reduzieren, wurden die Modelle bezüglich ihres Aufbaus vereinfacht.

Folgende Vereinfachungen wurden für den Altbau angenommen (Abbildung 4):

- Die Anzahl der Zonen wurde von 200 bis 14 reduziert;
- Einige Fenster wurden zusammengefasst, so dass aber die Fläche gleich blieb.

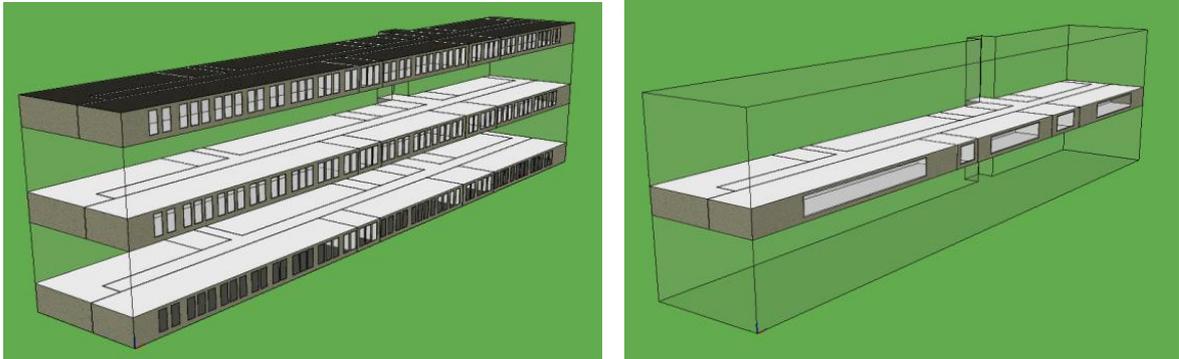


Abbildung 4: Die Modell des Altbaus (links – detailliertes Gebäude, rechts – vereinfachte Gebäude).

Für das Referenzgebäude wurde die Anzahl der Zonen von 20 auf 8 reduziert. Das Mittelgeschoss des Firmenhauptsitzes wurde ohne Vereinfachungen modelliert. Die Modelle des Referenzgebäudes und des Firmenhauptsitzes sind in Abbildung 5 dargestellt.

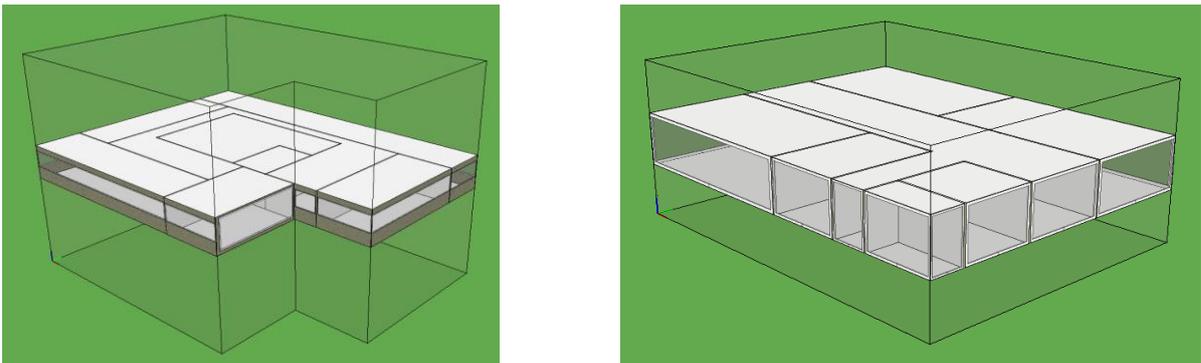


Abbildung 5: Die Modelle des Referenzgebäudes (links) und des Firmenhauptsitzes (rechts).

5.4.2 Definition des Referenzfalls (Dimensionierungsfall)

Um die Kälteabgabesysteme für jedes ausgewählte Gebäude dimensionieren zu können, wurde das Design Referenz Year (DRY) [20] für den Standort Basel in den Simulationsmodellen verwendet. Das Dimensionierungskriterium war die jährliche Anzahl der Überhitzungsstunden, definiert im Kapitel 5.2. Es wurde festgelegt, dass die Bürogebäude mit dem Kälteabgabesystem für das DRY nicht mehr als 100 Überhitzungsstunden aufweisen dürfen. Die Dimensionierung der Leistung der Kälteabgabesysteme wurde iterativ durchgeführt.

Die Kühlszenarien ohne Kälteabgabesysteme (S1-S3) wurden auch mit dem DRY berechnet, um die Behaglichkeit in den Bürogebäuden ohne Kälteabgabesysteme auszuwerten.

5.4.3 Definition der Klimavariabilität

(1) Klimaperiode

In der Studie [3] wurden erste Ergebnisse des Einflusses des Klimawandels auf den Heizwärme- und Klimakältebedarf dargestellt. Jedoch gibt es eine breite Auswahl der Klimaänderungsszenarien [3], [21]. Um die Variabilität des Klimas abzubilden, wurden die "Swiss-Climate-Change" - Szenarien, basiert auf den Projektionen des IPCC 2011 [21], verwendet. Die Daten wurden durch das Center for Climate Systems Modeling (C2SM) der ETH Zürich verfügbar gemacht und umfassen die zwei Parameter - Temperatur und Niederschlag.



Die Klimaänderungsszenarien sind verbunden mit den stark unterscheidenden Treibhausgas-Emissionsszenarien (Abbildung 6 – links) [21]. In der Diskussion zur Klimavariabilität wurden drei Regionen differenziert: die Nordost-, West- und Südschweiz (Abbildung 6 – rechts).

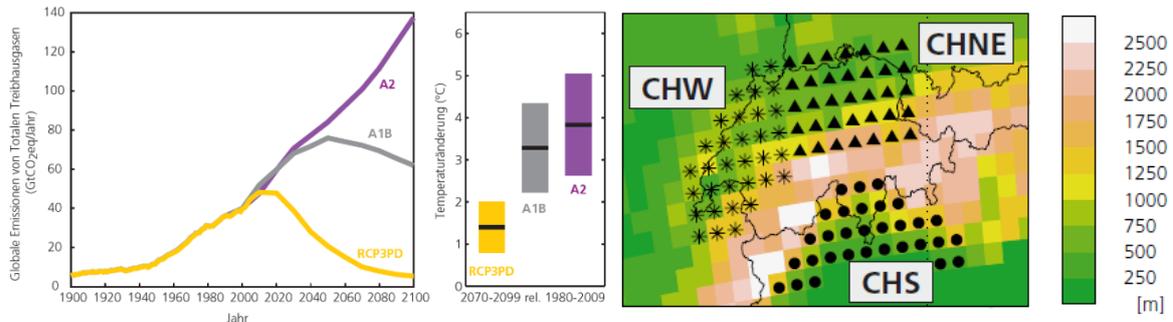


Abbildung 6: Schweizer Klimaänderungsszenarien, Regionen und Topographie [21].

Die Mitteltemperatur wird in der Nordostschweiz bis 2035 verglichen mit der Periode 1980 bis 2009 um 0.5 bis 1.7 K wärmer, siehe Tabelle 6. Im Frühling kann bis 2035 mit einer zusätzlichen Erwärmung von 1 K gerechnet werden. Im Sommer wie auch im Winter wird bis 2035 die stärkste Erwärmung prognostiziert. Bis 2035 wird die mittlere Aussenlufttemperatur im Sommer bei 18.9°C liegen. Der Herbst hat sich in der Nordostschweiz bisher nur geringfügig erwärmt. Bis zum Jahr 2035 dürften die Herbstmonate aber um 1.3 K wärmer werden.

Klimaszenario	Jahresmitteltemperatur [°C]
Referenzperiode	10.1
A1B low	10.6
A2 upper	11.8

Tabelle 6: Statistik der Klimaszenarien.

Die Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz wurden für die drei erwähnten Regionen und für drei Zeitperioden (2035, 2060, 2085) ermittelt. Bei der in diesem Projekt verwendeten Periode 2035 handelt es sich um ein 30-jähriges Mittel der Jahre 2020 bis 2049. Die Datensätze sind in drei Formaten verfügbar:

- Klimaszenarien mit saisonalen Mittelwerten (vier Jahreszeiten, drei Regionen, drei verschiedenen Projektionsperioden und drei Treibhausgasemissionsszenarien „A1B“, „A2“, „RCP3PD“);
- Tagesmittelwerte für die drei Regionen Nordost-, West- und Südschweiz je eine Projektionsperiode 2035 und drei Emissionsszenarien;
- Tagesmittelwerte für das Emissionsszenario „A1B“, für 188 Schweizer Standorte für die Projektionsperiode 2035. Für jeden Standort und jede Projektionsperiode wurden Resultate aus 10 GCM-RCM Modelketten publiziert.

Begründet durch die höhere zeitliche Auflösung der Datensätze wurden für die Simulationsstudien die zwei letztgenannten Datenformate verwendet.

Die Vielfalt der verfügbaren Datensätze machte es nötig, den Charakter der Datensätze zu differenzieren, um beurteilen zu können, welche der Datensätze am besten geeignet sind, die Zielgrößen zu berechnen. Als Basis für die Beurteilung wurde der Standort Basel in der Region Nordost-Schweiz betrachtet. Als Beurteilungskriterium wurde die repräsentierte Variabilität genutzt.



Bei der Analyse der Temperaturänderungsprofile, dargestellt in Abbildung 7 und Abbildung 8, wurde deutlich, dass die Resultate aus den zehn Modellketten der regionalen Zirkulationsmodelle (RCM) zur Abbildung des Emissionsszenarios „A1B“ für den Standort Basel eine höhere Amplitude aufweisen als die Resultate aus den globalen Zirkulationsmodellen für die drei Szenarien „A2“, „A1B“ und „RCP3PD“ für die Region Nordost-Schweiz.

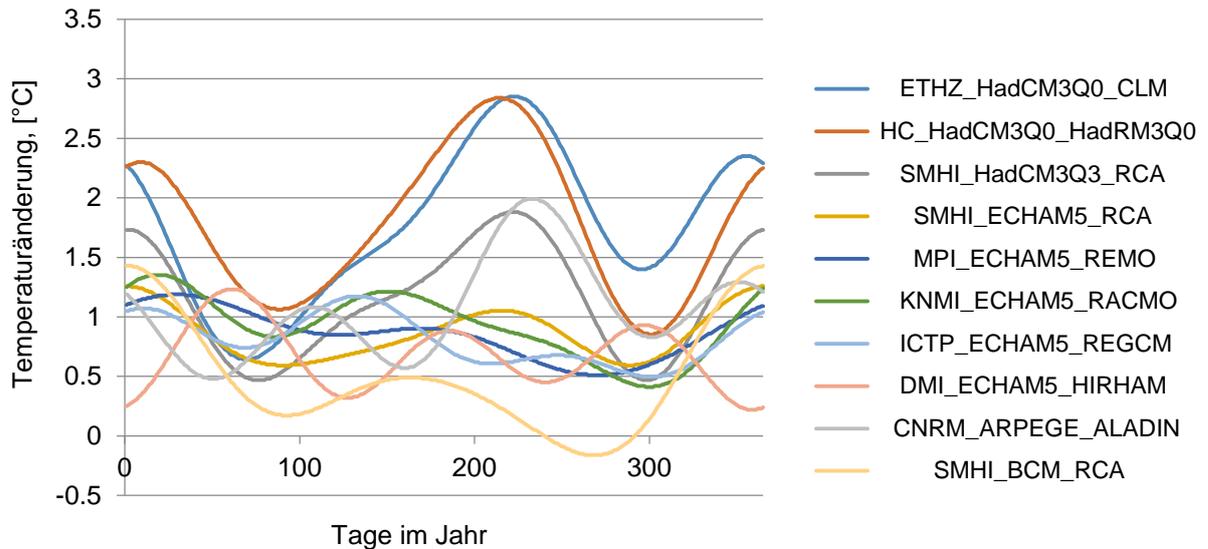


Abbildung 7: Emissionsszenario „A1B“; Temperaturänderungsprofile für Basel, 2035.

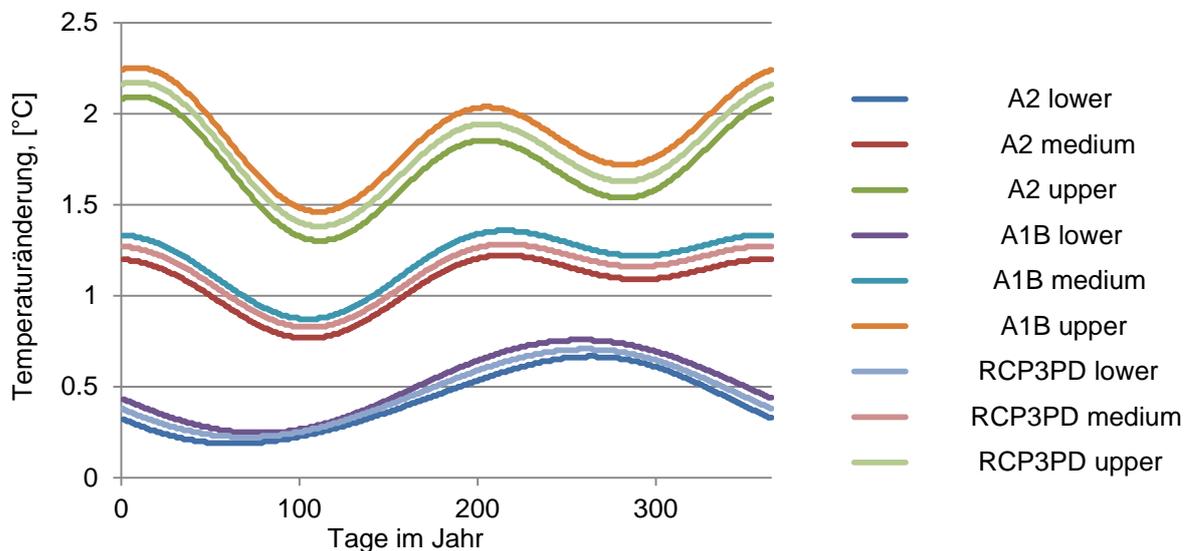


Abbildung 8: Emissionsszenarien „A2“, „A1B“ und „RCP3PD“, Temperaturänderungsprofile für die Region Nordostschweiz, 2035.

Weiter war ersichtlich, dass die saisonalen Schwankungen für den Standort Basel stärker ausgeprägt sind als für die Region Nordost-Schweiz, während die mittleren Profile der Emissionsszenarien für die Nordost-Schweiz sehr eng beieinander liegen und dem Mittel der Profile für den Standort Basel entsprechen.

Deshalb wurden die Emissionsszenarien (weiter Klimaperiode) „A1B lower“ und „A2 upper“ für die Region Nordostschweiz für den Standort Basel in dieser Studie verwendet. Diese Klimaperioden wurden weiterhin für die Untersuchung der Kühlszenarien verwendet.



Zusätzlich wurden historische Wetterdaten von 1980 bis 2009 als „Referenzperiode“ für die Untersuchung der Kühlszenarien verwendet. Für die Untersuchung des Einflusses des Standorts und des Gebäudetyps wurden der Klimakälte- und Heizwärmebedarf mit der Klimaperiode „A1B mittel“ berechnet.

(2) Standort

Um den Einfluss des Standorts zu demonstrieren, wurde für die Gebäudekonzepte der Standort zwischen Genf, Luzern und Locarno variiert und die Veränderung der Nutzenergie zwischen den Zeithorizonten 1995 und 2035 verglichen. Die Variation der Standorte wirkt sich im Endeffekt nur durch ein unterschiedliches Klima des jeweiligen Standortes auf das Gebäude aus. Es wurde dafür der jeweilige regionale Datensatz des mittleren A1B Emissionsszenarios verwendet. Die allgemeine Information über das Klima an genannten Standorten wird in Tabelle 7 dargestellt.

Standort	Lufttemperatur ¹	Heizgradtage ²	Globalstrahlung	Sonnenscheindauer
	[°C]	Mittelwert (2012/13)	horiz. ¹ [MJ/m ²]	Mittelwert (2012/13) [h] ²
Luzern	9.7	3'318	3'767	1'517
Genf (Cointrin)	10.7	3'049	4'453	1'831
Locarno (Monti)	12.3	2'380	4'513	2'194

Tabelle 7: Standortsspezifische Klimakennwerte, 1 – nach [20]; 2 - nach [22].

5.4.4 Definition der Nutzervariabilität

(1) Robustheit bezüglich Nutzerverhalten

Neben den äusseren Einflüssen auf ein Gebäude wurden auch die inneren betrachtet. Die drei Faktoren (Nutzerpräsenz, Beleuchtung und Betriebseinrichtungen) resultieren in einem Wärmeeintrag in das Gebäude, was einen direkten Einfluss auf die Robustheitskriterien hat. In ähnlicher Weise wie für das Klima variieren diese Faktoren innerhalb von gewissen Bandbreiten.

Die Standard-Tagesprofile der Nutzeranwesenheit, der Beleuchtung und der Aktivität der Geräte können zu einem Tagesprofil der internen Wärmelast zusammengefasst werden (Abbildung 9) [11]. Dieses Standard-Tagesprofil wurde für die Simulationen des Dimensionierungsfalls und bei der Untersuchung der Klimavariabilität genutzt. Die Beleuchtung muss aber separat berücksichtigt werden, weil sie aufgrund einer Konstantlichtregelung von der Sonnenstrahlung abhängig ist. Es konnte deshalb kein Tagesprofil für die Beleuchtung erstellt werden. Das SIA Merkblatt 2024 [11] gibt für die Belegung und die Geräte nicht nur ein einzelnes Profil an, sondern einen Bereich mit oberen und unteren Grenzwerten. Das daraus resultierende obere und untere Tagesprofil für die zusammengefassten Wärmegewinne der Nutzer und der Geräte ist in der Abbildung 10 dargestellt. Der absolute Wert der Wärmelast der Beleuchtung verändert sich zwischen 11.9 bis 15.9 W/m².

Mit diesen zwei Tagesprofilen der internen Wärmeeinträge wurden thermische Simulationen durchgeführt. Jeweils eine Simulation mit dem oberen und den unteren Tagesprofil als Zielgrösse wurden der Klimakältebedarf, die Hilfsenergie und die Überhitzungsstunden, definiert im Kapitel 5.2.2 und Kapitel 5.3.3, betrachtet.

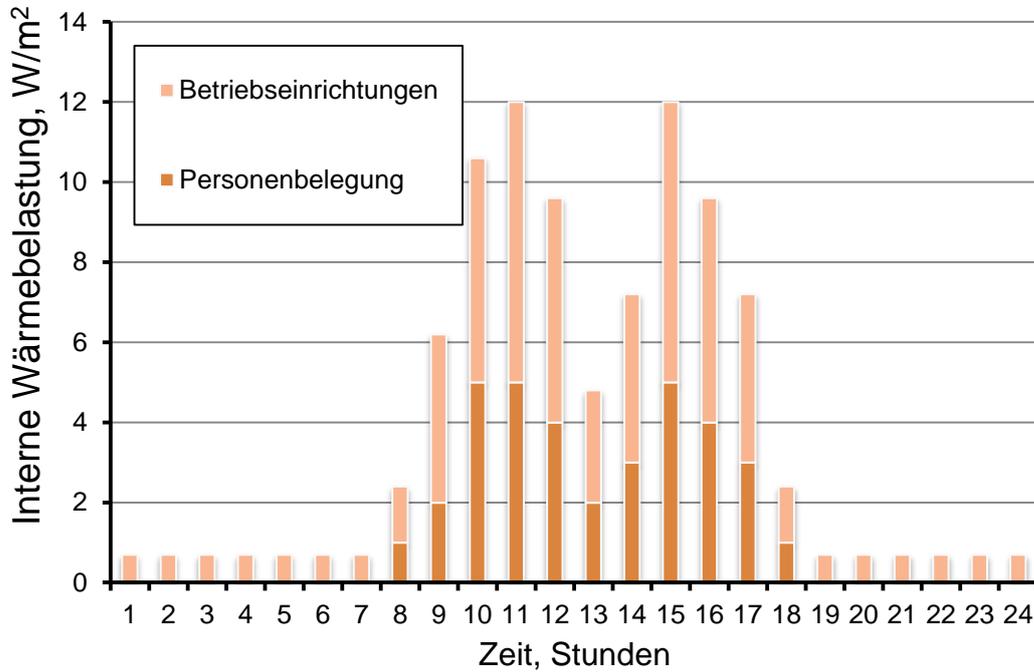


Abbildung 9: Standard-Tagesprofil der internen Wärmelast ohne Berücksichtigung der Beleuchtung.

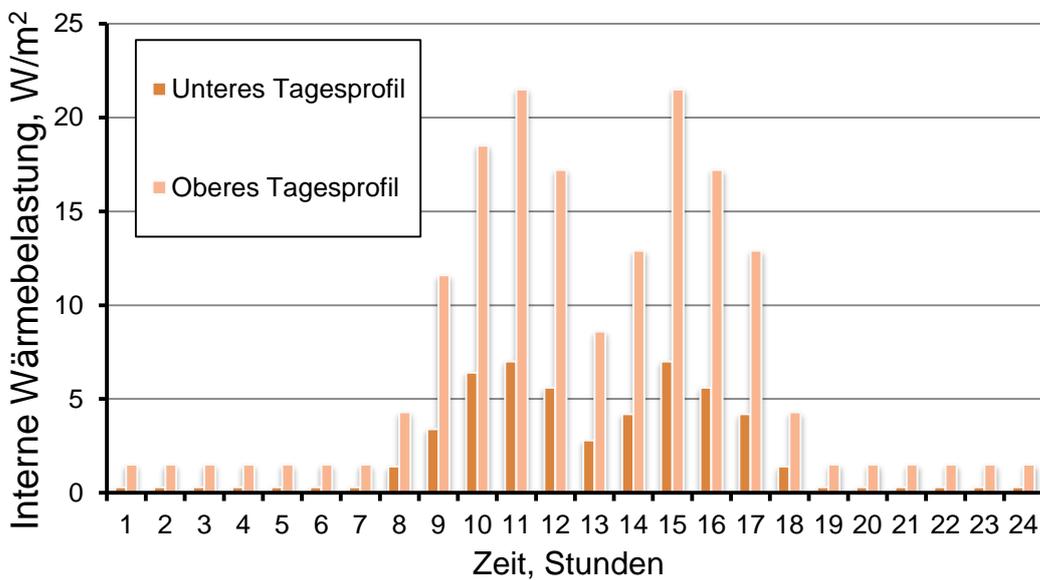


Abbildung 10: Tagesprofile der internen Wärmelast (Personenbelegung und Betriebseinrichtungen).

In der Abbildung 10 entspricht das untere Tagesprofil der minimalen Nutzerbelastung, das obere Tagesprofil der maximalen Nutzerbelastung. Die Simulationsrunde mit den zwei Varianten (der unteren und oberen) Nutzerprofile wurde nur für einen Gebäudetypen durchgeführt, welcher im Kapitel 6.1 ausgewählt wird. Es kamen dazu die Klimaperioden „Referenzperiode“, „A1B lower“ und „A2 upper“ zur Anwendung.



Für die Auswertung der Ergebnisse in Bezug auf Nutzervariabilität wurde eine Differenz der Überhitzungsstunden für jede Klimaperiode berechnet, welche in der Simulation der unteren und oberen Tagesprofile bestimmt wurde, und danach zwischen den Kühlszenarien verglichen. Wenn die Differenz der Überhitzungsstunden zwischen zwei Kühlszenarien klein ist, wurde der Klimakältebedarf verglichen, welchen mit dem Standardprofil für den Fall von Klimavariabilität berechnet wurde.

5.4.5 Vergleich der Klima- und Nutzervariabilität (T-Test)

Es wurde der Frage nachgegangen, wie das gegenseitige Verhältnis der Grössenordnungen der Einflüsse von Klima- und Nutzervariabilität ist.

Um diese Frage zu beantworten, wurde ein statistischer T-Test durchgeführt [23]. Der T-Test zeigt, wie ähnlich sich zwei Variationen sind. In diesem Fall wurde die Nutzervariabilität mit den Klimavariabilität n zwischen den Perioden „Referenzperiode“ und „A1B lower“ sowie zwischen den Perioden „Referenzperiode“ und „A2 upper“ verglichen.

Das Ergebnis eines T-Tests variiert von 0 % bis 100 % Ähnlichkeit. 0 % bedeutet einen deutlichen Unterschied zwischen zwei Variationen. 100 % bedeutet hingegen, dass kein Unterschied zwischen zwei Variationen beobachtet wird. In diesem Fall kann eine Variation eine andere ersetzen. Wenn die Ähnlichkeit mehr als 50 % ist, ist eine Differenz zwischen Klima- und Nutzervariabilität nicht signifikant. Im Gegenfall ist eine Differenz signifikant.

Um diese Ähnlichkeit zu quantifizieren wurden die Werte des Klimakältebedarfs und der Überhitzungsstunden für die obere und untere Nutzerbelastung und verschiedene Klimaperiode verwendet.



5.4.6 Zusammenfassung der Variabilität

Es wurden vier **Bürogebäude** ausgewählt:

- (1) Referenz
- (2) Altbau (Riegel)
- (3) Büroneubau
- (4) Firmenhauptsitz

Es wurden vier **Standorte** untersucht:

- (1) Basel
- (2) Genf
- (3) Luzern
- (4) Locarno

Es wurden vier **Klimaperioden** untersucht:

- (1) Design Referenz Year (DRY) für den Standort Basel
- (2) „Referenzperiode“
- (3) „A1B lower“
- (4) „A2 upper“

Es wurden drei **Nutzerprofile** untersucht:

- (1) Standard-Tagesprofil
- (2) oberes Tagesprofil
- (3) unteres Tagesprofil

Es wurde acht **Kühlszenarien** definiert:

- (1) **S1**: Mechanische Lüftung während der Nutzungszeit mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung
- (2) **S2**: Mechanische Lüftung während der Nutzungszeit, ohne Kühlung
- (3) **S3**: Natürliche Fensterlüftung während der Nutzungszeit, ohne Kühlung
- (4) **S4**: Umluftkühlung mit mechanischer Lüftung während der Nutzungszeit
- (5) **S5**: Umluftkühlung mit natürlichen Fensterlüftung während der Nutzungszeit
- (6) **S6**: Kühldecke mit mechanischer Lüftung während der Nutzungszeit
- (7) **S7**: Kühldecke mit natürlichen Fensterlüftung während der Nutzungszeit
- (8) **S8**: Betonkernaktivierung mit mechanischer Lüftung während der Nutzungszeit

Die allgemeinen Simulationsparameter für die Fälle der Klimavariabilität und Nutzervariabilität sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 aufgezeigt.



Parameter	Bürogebäudemodelle	Klimaperiode	Nutzerprofil
Simulationsrunde 1	Altbau	Referenzperiode	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 2	Altbau	A1B lower	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 3	Altbau	A2 upper	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 4	Referenzgebäude	Referenzperiode	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 5	Referenzgebäude	A1B lower	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 6	Referenzgebäude	A2 upper	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 7	Firmenhauptsitz	Referenzperiode	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 8	Firmenhauptsitz	A1B lower	Standard-Tagesprofil
Simulationsrunde 9	Firmenhauptsitz	A2 upper	Standard-Tagesprofil

Tabelle 8: Allgemeine Simulationsparameter für die Untersuchung der Klimavariabilität. Die Bezeichnung „Simulationsrunde“ bedeutet ein Set von Simulationen der Kühlszenarien gemäss Tabelle 2.

Parameter	Bürogebäudemodelle	Klimaperiode	Nutzerprofil
Simulationsrunde 10	Referenzgebäude	Referenzperiode	Unteres Tagesprofil
Simulationsrunde 11	Referenzgebäude	Referenzperiode	Oberes Tagesprofil
Simulationsrunde 12	Referenzgebäude	A1B lower	Unteres Tagesprofil
Simulationsrunde 13	Referenzgebäude	A1B lower	Oberes Tagesprofil
Simulationsrunde 14	Referenzgebäude	A2 upper	Unteres Tagesprofil
Simulationsrunde 15	Referenzgebäude	A2 upper	Oberes Tagesprofil

Tabelle 9: Allgemeine Simulationsparameter für die Untersuchung der Nutzervariabilität. Die Bezeichnung „Simulationsrunde“ bedeutet ein Set von Simulationen der Kühlszenarien gemäss Tabelle 2.

Die Robustheitsbeurteilung der Simulationsergebnisse wurde im Kapitel 5.2.2 geschrieben. Sie erfolgt separat bezüglich Klima- und Nutzervariabilität. Im Fall der Klimavariabilität wurden die Aussagen pro Gebäude und pro Klimaperiode „A1B lower“ und „A2 upper“ getrennt; die Berechnung der Robustheitskriterien für die Auswertung ist in Tabelle 10 dargestellt.



Gebäudemodell	Klimaperiode	Robustheitskriterien	
		Änderung der Überhitzungsstunden	Klimakältebedarf
Altbau	A1B lower	Simulationsrunde 2 – Simulationsrunde 1	Simulationsrunde 2
	A2 upper	Simulationsrunde 3 – Simulationsrunde 1	Simulationsrunde 3
Referenzgebäude	A1B lower	Simulationsrunde 5 – Simulationsrunde 4	Simulationsrunde 5
	A2 upper	Simulationsrunde 6 – Simulationsrunde 4	Simulationsrunde 6
Firmenhauptsitz	A1B lower	Simulationsrunde 8 – Simulationsrunde 7	Simulationsrunde 8
	A2 upper	Simulationsrunde 9 – Simulationsrunde 7	Simulationsrunde 9

Tabelle 10: Berechnung der Robustheitskriterien hinsichtlich Simulationsrunden bezüglich Klimavariabilität

Ähnlich wurden die Robustheitskriterien bezüglich Nutzervariabilität (Tabelle 11) berechnet.

Gebäudemodell	Klimaperiode	Robustheitskriterien	
		Änderung der Überhitzungsstunden	Klimakältebedarf
Referenzgebäude	Referenzperiode	Simulationsrunde 11 – Simulationsrunde 10	Simulationsrunde 4
	A1B lower	Simulationsrunde 13 – Simulationsrunde 12	Simulationsrunde 5
	A2 upper	Simulationsrunde 15 – Simulationsrunde 14	Simulationsrunde 6

Tabelle 11: Berechnung der Robustheitskriterien hinsichtlich Simulationsrunden bezüglich Nutzervariabilität

6. Ergebnisse / Erkenntnisse

6.1 Einfluss des Standorts und des Gebäudetyps

Der Vergleich des simulierten Heizwärme- und Klimakältebedarfs für die vier untersuchten Bürogebäude mit drei unterschiedlichen Standorten und zwei prognostizierten Klimaperioden ist in der Abbildung 11 dargestellt. Es ist dabei eine Gruppierung zu erkennen, welche die verschiedenen Gebäudetypen widerspiegelt. Der Altbau hat den höchsten Heizwärmebedarf und den tiefsten Klimakältebedarf, was auf die schlechte Wärmedämmung des Daches und die grosse Masse dieses Gebäudetyps zurückzuführen sein dürfte. Der Firmenhauptsitz weist aufgrund des hohen Glasanteiles in der Fassade von nahezu 100% den höchsten Klimakältebedarf auf. Das Referenzgebäude liegt bezüglich der beiden Kenngrössen in der Mitte und wird nur noch vom Büroneubau untertroffen.

Der Klimakältebedarf ist bei allen Klimaperioden und Bürotypen, ausser für den Firmenhauptsitz, am Standort Locarno am grössten. Der Grund für dieses Muster liegt im unterschiedlichen Klima der Standorte und in den Eigenschaften der Gebäude. In Tabelle 7 ist ersichtlich, dass Locarno zum einen die wenigsten Heizgradtage und auch die grösste solare Gewinne aufweist. Das führt dazu, dass an diesem Standort weniger geheizt, jedoch mehr gekühlt werden muss. Das Gegenteil ist Luzern, wo die meisten Heizgradtage und die geringsten solaren Gewinne verzeichnet werden. Entsprechend sind der Heizwärmebedarf höher und der Klimakältebedarf tiefer als an den anderen Standorten. Der Standort Genf liegt jeweils dazwischen.

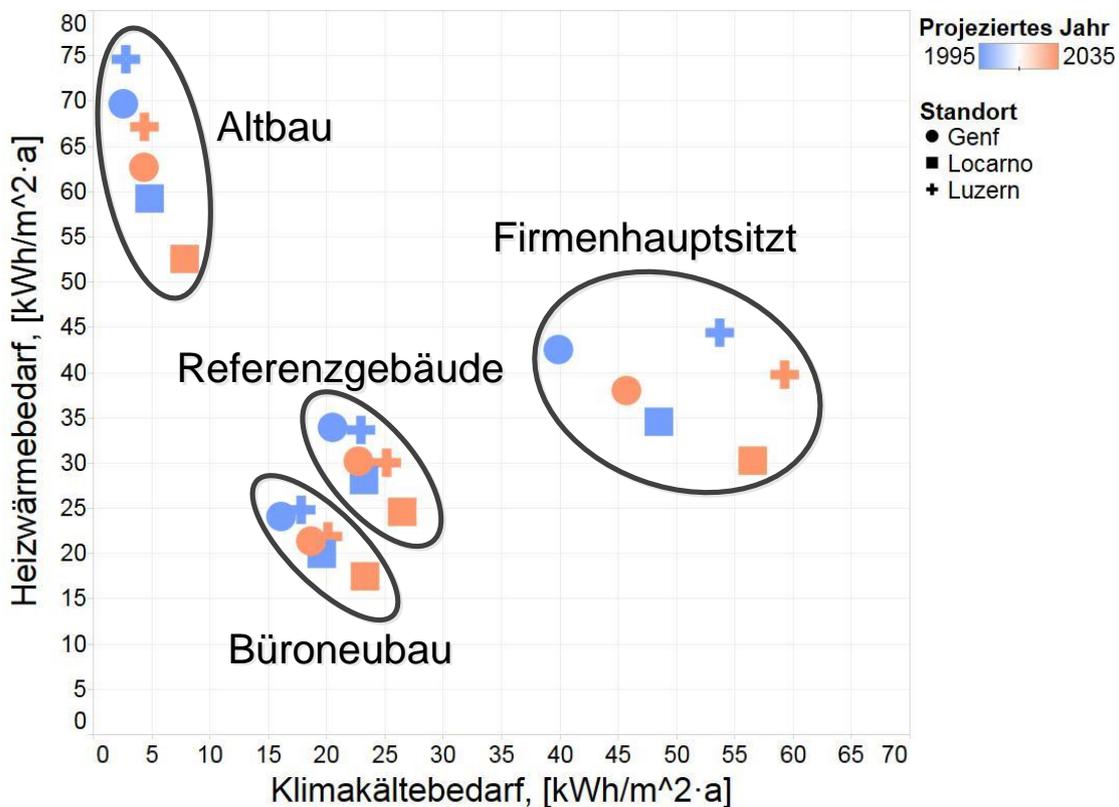


Abbildung 11: Vergleich der spez. Heizwärme- und Klimakältebedarf.

Es ist anzunehmen, dass der Firmenhauptsitz im Vergleich zu den anderen Bürogebäuden aufgrund des hohen Glasanteiles am sensitivsten auf Änderungen des Klimas reagiert.



Die Unterschiede zwischen den Standorten und Klimaperioden sind grösser als die Unterschiede zwischen den Gebäudetypen. Weil der Nutzenergiebedarf des Büroneubaus und des Referenzgebäudes sehr ähnlich ist, wurde der Büroneubau schlussendlich für die nachfolgende Systemuntersuchung nicht berücksichtigt. Es wurden also nur drei Gebäudemodelle weiter untersucht: Referenzgebäude, Altbau, Firmenhauptsitz.

6.2 Dimensionierungsfall

Für die Dimensionierung der Kälteabgabesysteme (Dimensionierungsfall) wurden die acht definierten Kühlszenarien mit den Klimadaten des Design Reference Years (DRY) für jedes der drei ausgewählte Bürogebäude (Altbau, Referenzgebäude, Firmenhauptsitz) simuliert. Die Kombination von Betonkernaktivierung mit Altbau wurde nicht untersucht, da diese keine praktische Relevanz hat. Der simulierte Klimakälte- und Hilfsenergiebedarf sowie die Überhitzungsstunden wurden verglichen.

Die ersten drei Kühlszenarien (S1, S2, S3) haben einen Klimakältebedarf von null, weil keine Kälteabgabesysteme vorhanden ist. Die zwei Szenarien S2 und S3 haben ebenfalls einen Hilfsenergiebedarf von null, weil der Ventilator der Lüftungsanlage nur für die hygienische Luftzufuhr und nicht für die Kühlung verwendet wird (keine Erhöhung des Luftvolumenstromes und der Betriebszeit ausserhalb der Nutzungszeit). Für das Kühlszenario S1 wurde nur für den Nachtbetrieb der zusätzliche Hilfsenergiebedarf berechnet, welcher durch die Erhöhung des Luftvolumenstromes mit einem Faktor 3 und der Verlängerung der Betriebszeit ausserhalb der Nutzungszeit verursacht wird.

6.2.1 Altbau

Der simulierte Klimakältebedarf des Altbaus für die Kühlszenarien mit Kälteabgabesystemen S4-S7 ist in der Abbildung 12 dargestellt. In Abbildung 12 erkennt man, dass die Kühlszenarien mit mechanischer Lüftungsanlage einen um ca. 0.7 kWh/m^2 geringeren Klimakältebedarf aufweisen als Kühlszenarien mit natürlicher Lüftung. Bei Umluftkühlung ist der Klimakältebedarf geringer als im Fall der Kühldecke.

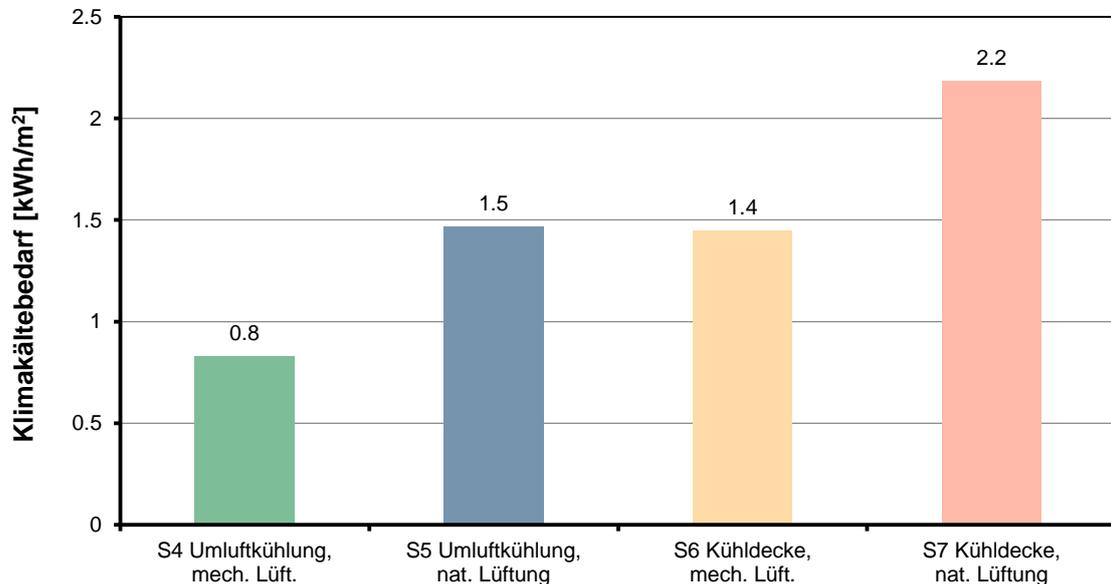


Abbildung 12: Jährlicher Klimakältebedarf des Altbaus je nach Kühlszenario (mit Umluftkühlung (S4-S5) oder Kühldecke (S6-S7)).

Es muss erwähnt werden, dass nicht alle Räume im Altbau mehr als 100 Überhitzungsstunden aufweisen und Kühlung benötigen.

Das gilt für die Kühlszenarien S1, S2 und S3, welche kein Kälteabgabesystem aufweisen (Abbildung 13). Die Kühlszenarien mit Kälteabgabesystemen und mechanischer Lüftung (S4, S6) haben für den Dimensionierungsfall 71 Überhitzungsstunden; die Kühlszenarien mit Kälteabgabesystemen und natürlicher Lüftung (S5, S7) 93. Bei den Kühlszenarien mit Kälteabgabesystemen (S4-S7) haben alle Räume im Altbau weniger als 100 Überhitzungsstunden.

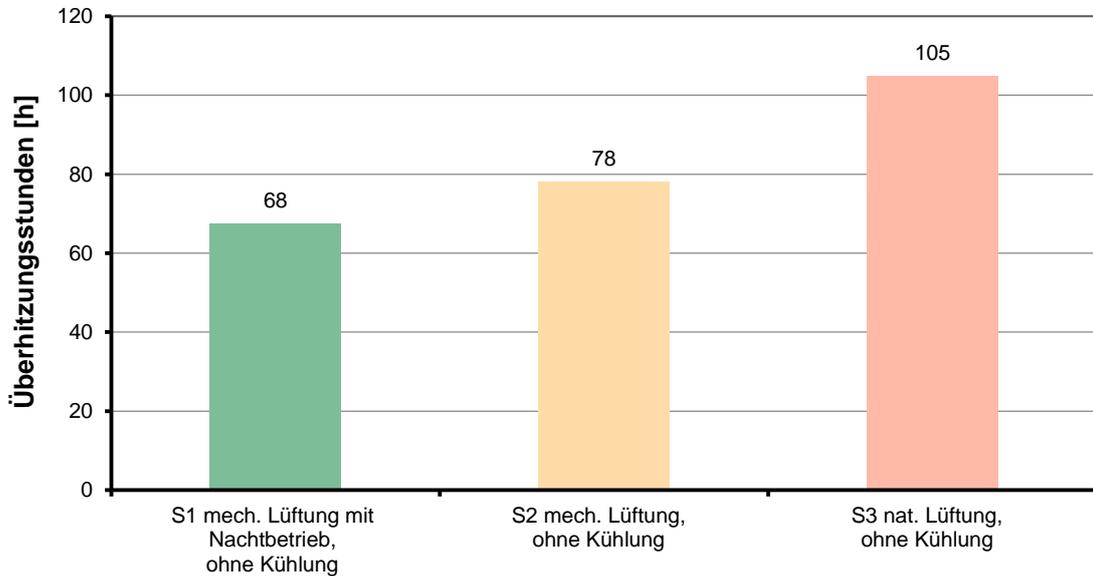


Abbildung 13: Überhitzungsstunden im Altbau je nach Kühlszenarien ohne Kälteabgabesysteme (S1-S3).

Die simulierte Hilfsenergie im Altbau ist für die Kühlszenarien S1 und S4-S7 in dem Kapitel 10.4.1 angegeben (die Kühlszenarien S2-S3 benötigen keine zusätzliche Hilfsenergie für die Kühlung). Da kann man erkennen, dass die Kühlszenarien mit Umlüftkühlung mehr Hilfsenergie benötigen als die anderen. Der Grund ist, dass die Ventilatoren grundsätzlich mehr elektrische Energie benötigen als die Pumpen. Das Kühlszenario S1 hat den grössten Hilfsenergiebedarf. In diesem Fall ist er so hoch, weil die Lüftungsanlage während Nacht mit dem dreifachen Volumenstrom betrieben wird.



6.2.2 Referenzgebäude

Der simulierte Klimakältebedarf des Referenzgebäudes für die Kühlszenarien mit Kälteabgabesystemen ist in Abbildung 14 dargestellt. Insgesamt ist der Klimakältebedarf des Referenzgebäudes höher als derjenige des Altbaus. Die qualitativen Aussagen über den Klimakältebedarf der Kühlszenarien S4-S7 bleiben gleich wie im Fall des Altbaus. Jedoch hat das Kühlszenario S8 den grössten Klimakältebedarfs wegen des Nachtbetriebs.

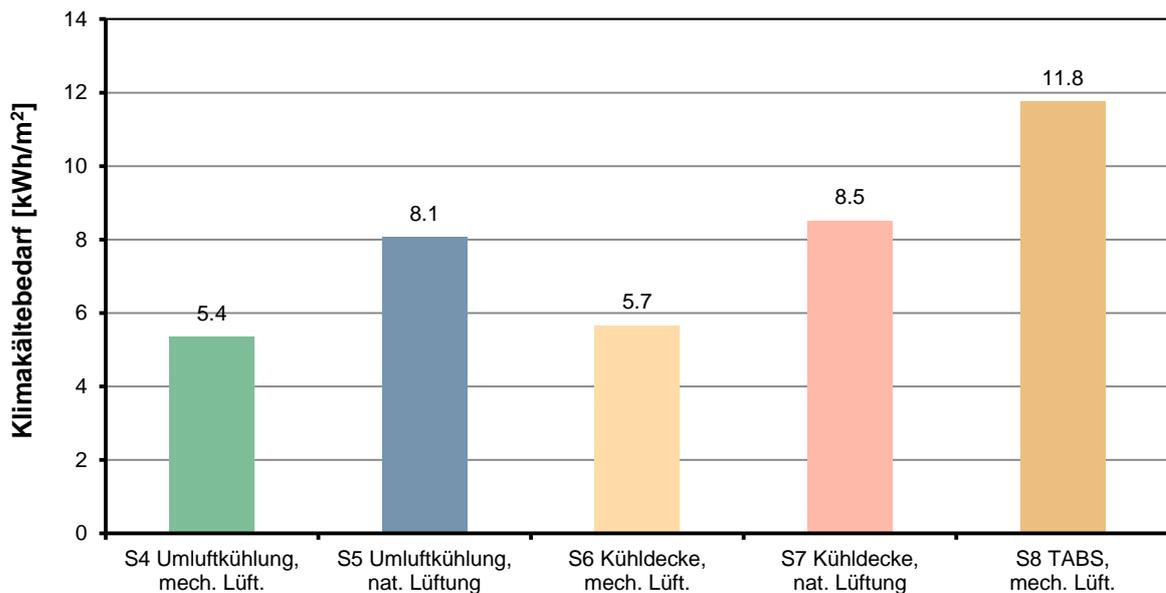


Abbildung 14: Jährlicher Klimakältebedarf des Referenzgebäudes je nach Kühlszenario mit Kälteabgabesystemen (S4-S8).

Im Referenzgebäude benötigen alle Räume eine Kühlung. Die simulierten Überhitzungsstunden für die Kühlszenarien S1-S3 sind in Abbildung 15 dargestellt. Die restlichen Kühlszenarien (S4-S8) haben für den Dimensionierungsfall genau 100 Überhitzungsstunden.

Die simulierte Hilfsenergie im Referenzgebäude ist für die Kühlszenarien S1 und S4-S8 im Kapitel 10.4.1 dargestellt (die Kühlszenarien S2-S3 benötigen keine zusätzliche Hilfsenergie für die Kühlung). Wie im Altbau benötigen die Kühlszenarien S6, S7 am wenigsten Hilfsenergie. Die Betonkernaktivierung (Kühlszenario S8) benötigt weniger Hilfsenergie als die Kühlszenarien S1, S4 und S5.

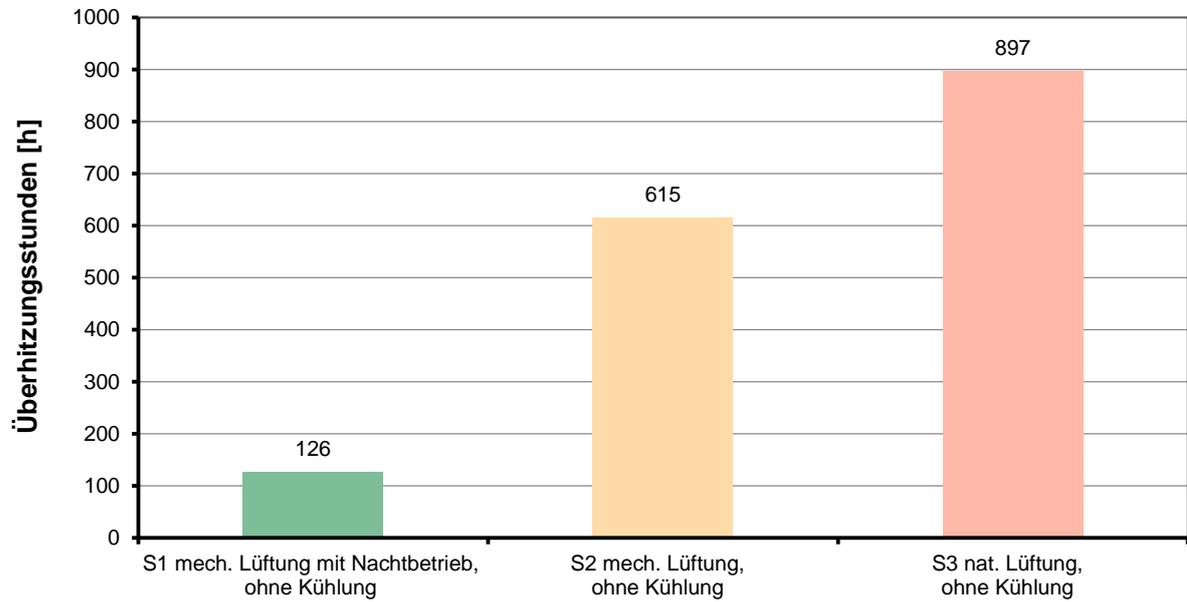


Abbildung 15: Überheizungsstunden im Referenzgebäude je nach Kühlszenario ohne Kälteabgabesysteme (S1-S3).



6.2.3 Firmenhauptsitz

Der simulierte Klimakältebedarf des Firmenhauptsitzes für die Kühlszenarien mit Kälteabgabesystemen ist in Abbildung 16 dargestellt. Der Klimakältebedarf aller Kühlszenarien ist für dieses Gebäude am höchsten.

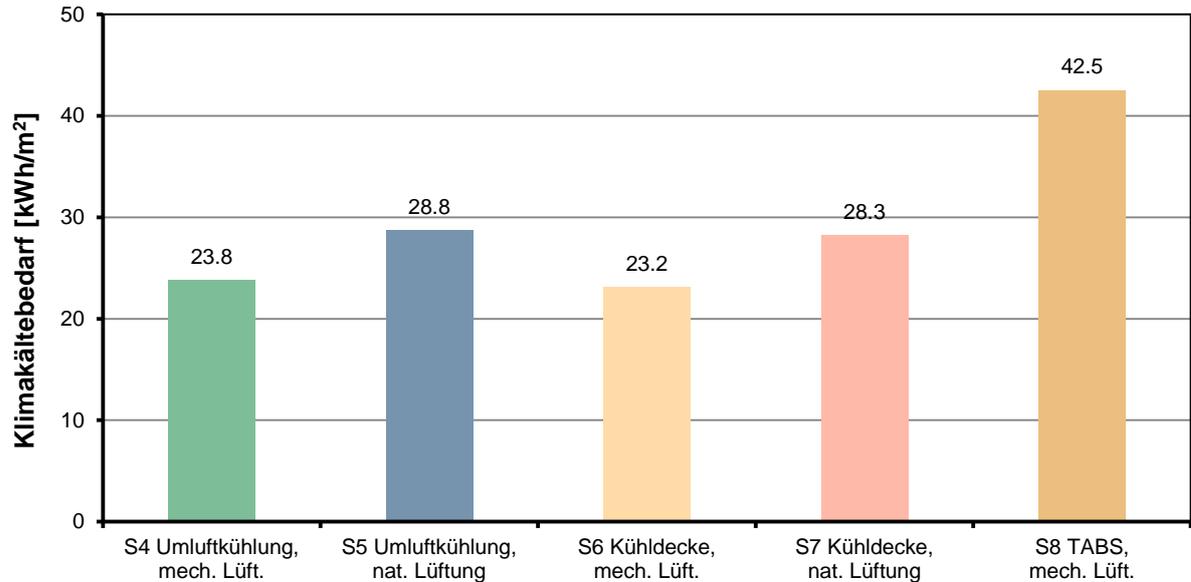


Abbildung 16: Jährlicher Kühlenergiebedarf des Firmenhauptsitzes je nach Kühlszenario mit Kälteabgabesystemen (S4-S8).

Die simulierten Überhitzungsstunden für die Kühlszenarien S1, S2 und S3 ohne Kälteabgabesysteme sind in der Abbildung 17 dargestellt. Die restlichen Kühlszenarien (S4-S7) weisen für den Dimensionierungsfall genau 100 Überhitzungsstunden auf. Die Aussagen des qualitativen Vergleichs zwischen den Kühlszenarien bleiben gleich wie im Fall von Altbau und Referenzgebäude. Die simulierte Hilfsenergie wird im Anhang Kapitel 10.4.1 dargestellt.

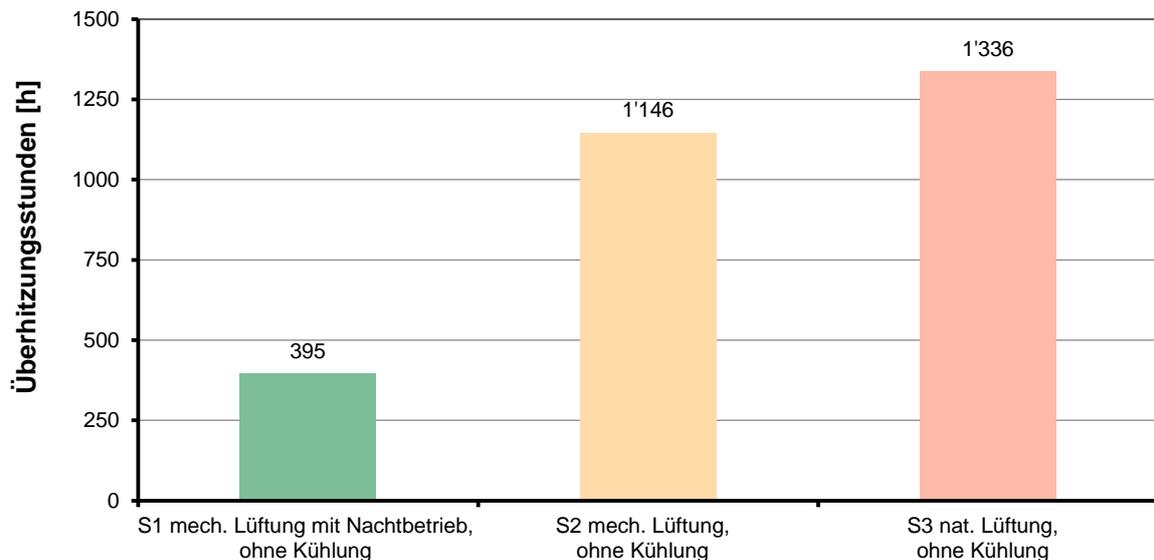


Abbildung 17: Überhitzungsstunden im Firmenhauptsitz je nach Kühlszenario ohne Kälteabgabesystemen (S1-S3).



6.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse für den Dimensionierungsfall

Die Zusammenfassung des simulierten Klimakältebedarfs und der Überhitzungsstunden für die untersuchten drei Bürogebäude ist aufgeteilt nach Kühlscenario in Tabelle 12 dargestellt.

Kühlszenarien	Altbau		Referenzgebäude		Firmenhauptsitz	
	Klimakälte- bedarf [kWh/m ²]	Über- hitzungs- stunden [h]	Klimakälte- bedarf [kWh/m ²]	Über- hitzungs- stunden [h]	Klima- kälte- bedarf [kWh/m ²]	Über- hitzungs- stunden [h]
S1 Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	-	68	-	126	-	395
S2 Mech. Lüftung, ohne Kühlung	-	78	-	615	-	1'146
S3 Nat. Lüftung, ohne Kühlung	-	105	-	897	-	1'336
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	1.10	71	5.36	100	23.78	100
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	1.57	93	8.07	100	28.78	100
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	1.93	71	5.67	100	23.17	100
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	2.67	93	8.52	100	28.28	100
S8 TABS, mech. Lüftung	n.a.	n.a.	11.77	100	42.55	100

Tabelle 12: Jährlicher Klimakältebedarf und Hilfsenergie der drei verschiedenen Bürogebäude je nach Kühlscenario (n.a. steht für die nicht untersuchten Fälle).

Es ist zu erkennen, dass die Kühlscenario S4-S7 im Altbau im Vergleich mit dem Referenzgebäude und Firmenhauptsitz den kleinsten Klimakältebedarf benötigen, um die Behaglichkeit in den Räumen zu gewährleisten. Darüber hinaus haben die Kühlscenario S1-S3 im Altbau die kleinste Anzahl an Überhitzungsstunden. Der Firmenhauptsitz hat den grössten Klimakältebedarf und die höchste Anzahl Überhitzungsstunden. Diese Aussagen korrelieren mit den Erkenntnissen des Kapitels 6.1.

Die Analyse der simulierten Überhitzungsstunden zeigt, dass die Kühlscenario ohne Kälteabgabesysteme die Behaglichkeitsanforderung nicht einhalten können. Nur für den Altbau sind die Kühlscenario S1 und S2 geeignet, da die Überhitzungsstunden unter 100 liegen. Insgesamt haben die Kühlscenario mit mechanischer Lüftungsanlage einen Vorteil im Vergleich zu den Kühlscenario mit natürlicher Fensterlüftung.

Der Vergleich zwischen Umluftkühlung, Kühldecke und Betonkernaktivierung zeigt, dass die Betonkernaktivierung den grössten Klimakältebedarfs aufweist. Der Grund liegt in der Nachtvorkühlung, welche die Raumtemperaturen auf ein tieferes Niveau sinkt als eigentlich nötig wäre.



6.3 Simulation der Klimavariabilität

Für die Untersuchung der Robustheit bezüglich der Klimavariabilität wurden die acht definierten Kühlszenarien für die drei Bürogebäude mit drei verschiedenen Klimaperioden („Referenzperiode“, „A1B lower“ und „A2 upper“) simuliert.

6.3.1 Altbau

Wie schon beim Dimensionierungsfall wurde die Betonkernaktivierung in diesem Kapitel für den Altbau nicht untersucht.

Der simulierte Klimakältebedarf ist in Abbildung 18 nach Kühlszenario und Klimaperiode dargestellt. Die Differenz zwischen den Klimaperioden „Referenzperiode“ und „A1B lower“ ist kleiner als die Differenz zwischen den Klimaperioden „A1B lower“ und „A2 upper“, weil der Unterschied zwischen den Mitteltemperaturen von Klimaperioden ebenfalls kleiner (0.5 K bzw. 1.2 K) ist.

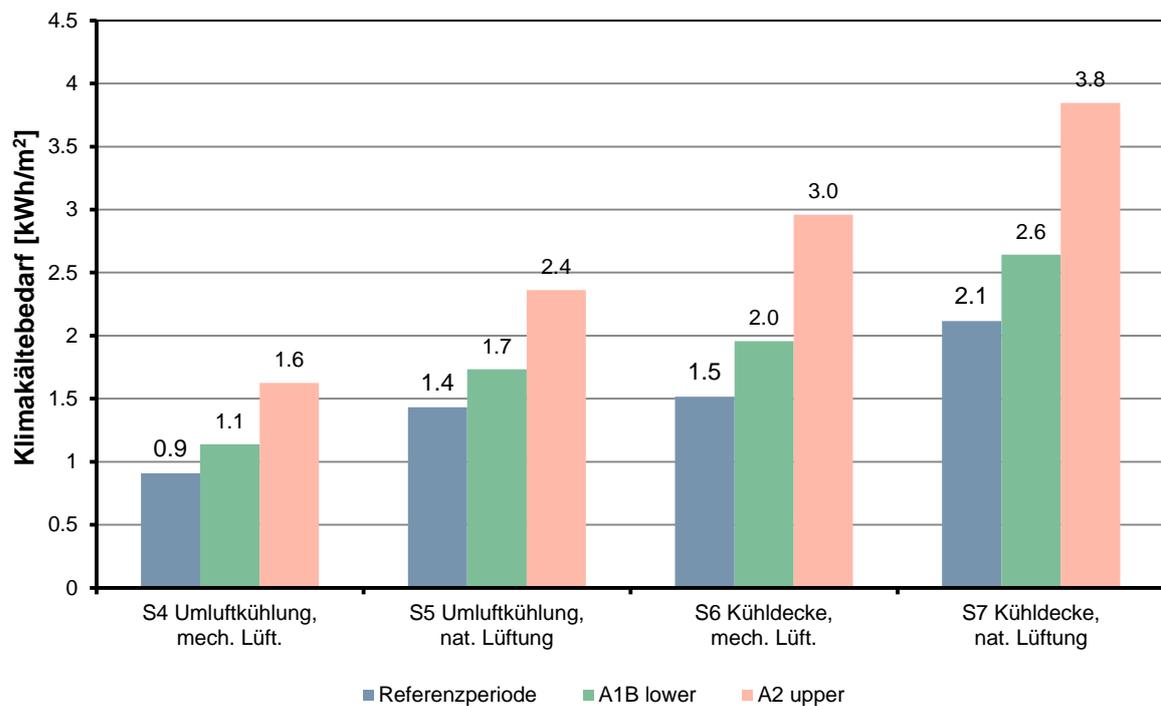


Abbildung 18: Klimakältebedarf des Altbaus abhängig von Kühlszenarien und Klimaperioden.

Die simulierten Überhitzungsstunden für den Altbau sind in der Abbildung 19 zusammengefasst.

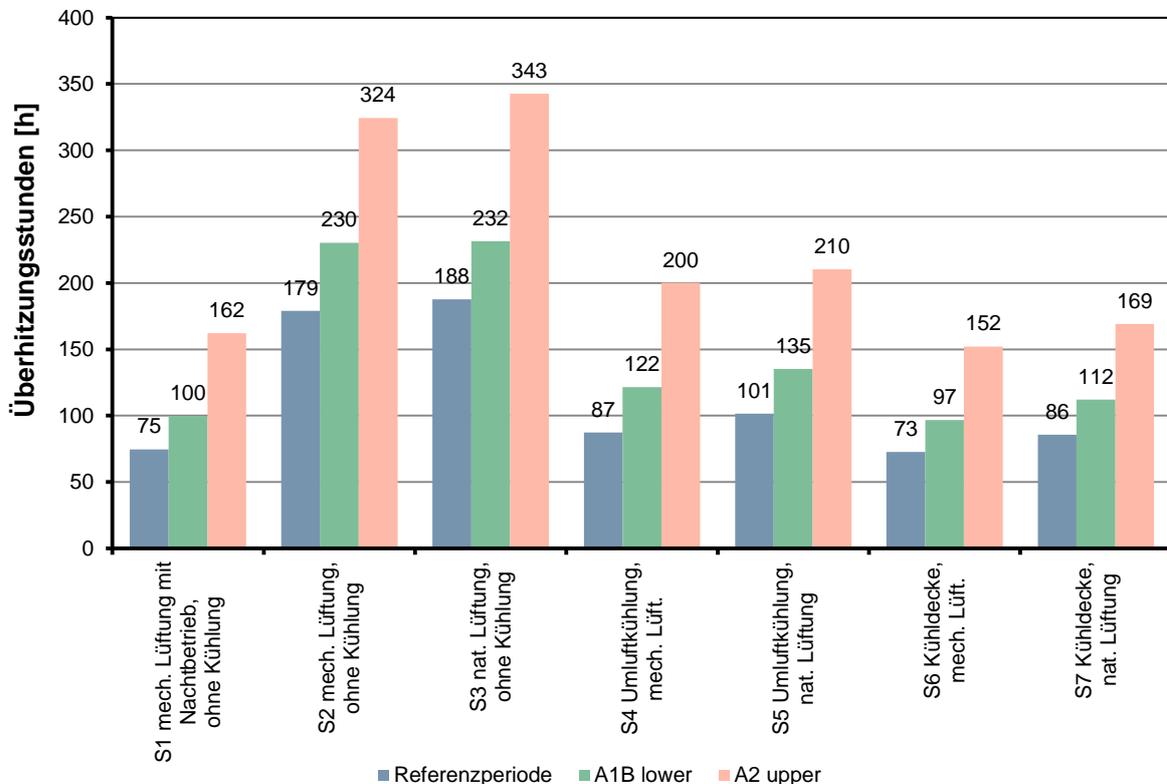


Abbildung 19: Überheizungsstunden des Altbaus abhängig von Kühlszenarien und Klimaperioden.

Die Überheizungsstunden in Abbildung 19 zeigen, dass die Behaglichkeitsanforderungen im Altbau bei allen Kühlszenarien und für jede zukünftige Klimaperiode nicht eingehalten werden können. Die Hilfsenergie der berücksichtigten Kühlszenarien ist in dem Kapitel 10.4.2 dargestellt. Die Hilfsenergie steigt für alle Kühlszenarien mit dem Klimawandel, weil die Betriebszeit des Kälteabgabesystems der allen Kühlszenarien steigt.

Die Beurteilung der Robustheitskriterien der genannten Kühlszenarien wird gemäss Kapitel 5.2.2 und Kapitel 5.4.6 durchgeführt. Die Aussagen über die Robustheit der Kühlszenarien wurden nur relativ und nicht absolut gemacht, weil keine absoluten Grenzwerte für die Robustheitsbeurteilung existieren.

Die Erhöhungen der Überheizungsstunden der Klimaperioden „A1B lower“ und „A2 upper“ gegenüber der „Referenzperiode“ sind in der Abbildung 20 dargestellt. Ebenfalls ist der Klimakältebedarf pro Kühlszenarien der gleichen Klimaperioden in der Abbildung 20 aufgezeigt.

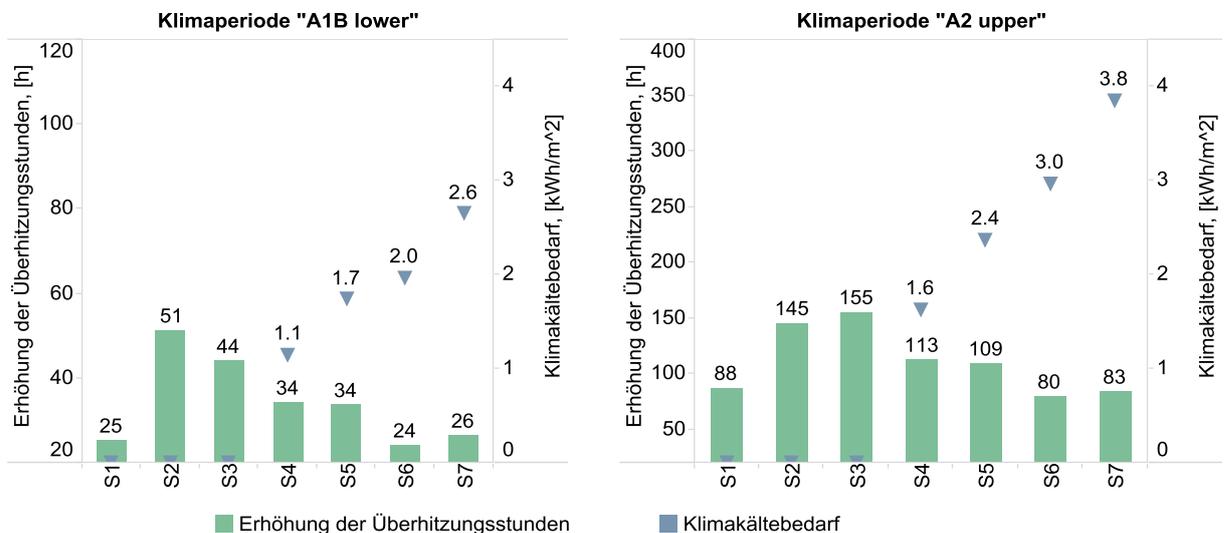


Abbildung 20: Robustheitskriterien für den Gebäudetyp Altbau

Der Vergleich der Robustheitskriterien zwischen einander zeigt die Reihenfolge der Robustheit der Kühlszenarien.

Das Kühlszenario S1 „mechanischer Lüftung mit Nachtbetrieb (ohne Kühlung)“ und beide Kühlszenarien mit Kühldecke und natürlicher oder mechanischer Lüftung (S6-S7) zeigen die kleinste Erhöhung der Überhitzungsstunden und den grössten Klimakältebedarf im Vergleich mit anderen Kühlszenarien (Abbildung 20). Jedoch hat das Kühlszenario S1 den kleinsten Klimakältebedarf im Vergleich mit den Kühlszenarien S6 und S7. Das Kühlszenario S6 hat einen geringeren Klimakältebedarf als das Kühlszenario S7. Deshalb kann das Kühlszenario S6 robuster als S7 bezeichnet werden. Das Kühlszenario S1 dürfte jedoch das robusteste im Vergleich mit alle anderen Kühlszenarien sein.

Die Kühlszenarien S2 und S3 „mechanische und natürliche Lüftung (ohne Kühlung und ohne Nachtbetrieb)“ zeigten sich am wenigsten robust gegenüber den anderen, weil die Erhöhung der Überhitzungsstunden grösser ist als bei den anderen Kühlszenarien (Abbildung 20). Der Grund ist, dass diese Kühlszenarien keine zusätzliche Kälteabgabesysteme oder eine nächtliche Vorkühlung aufweisen.

Die Umluftkühlung mit mechanischer Lüftung (S4) oder natürlicher Fensterlüftung (S5) hat die kleinste Erhöhung des Klimakältebedarfs und grössere Erhöhung der Überhitzungsstunden im Vergleich mit der Kühldecke (S6-S7), aber eine kleinere Erhöhung im Vergleich mit den Lüftungskonzepten ohne Nachtbetrieb (S2-S3). Das bedeutet, dass die Umluftkühlung robuster als Kühlszenarien S2 und S3 ist, jedoch weniger robust als alle andere Kühlszenarien ist.

Die erwähnten Aussagen gelten sowohl für die Klimaperiode „A1B lower“ als auch für die Klimaperiode „A2 upper“.

Die Bewertung der sieben Kühlszenarien bezüglich ihrer Robustheit gegenüber Klimaänderungen ist in der Tabelle 13 dargestellt.



Kühlszenarien	Klimaperiode	
	A1B lower	A2 upper
S1 Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	8	8
S2 Mech. Lüftung, ohne Kühlung	3	2
S3 Nat. Lüftung, ohne Kühlung	2	3
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	5	5
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	4	4
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	7	7
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	6	6

Tabelle 13: Bewertung der Robustheit der Kühlszenarien für den Altbau. Das robusteste Kühlszenario wurde mit einer Note von 8 bezeichnet, das am wenigsten robuste mit einer Note von 1.

6.3.2 Referenzgebäude

Der simulierte Klimakältebedarf für die acht definierten Kühlszenarien und die drei verschiedenen Klimaperioden ist in Abbildung 21 dargestellt.

In diesem Fall ist der Klimakältebedarf der Kühlszenarien mit Kühldecke (S6-S7) oder Umluftkühlung (S4-S5) fast gleich gross. Jedoch ist die Anzahl der Überhitzungsstunden bei der Kühldecke geringer als bei der Umluftkühlung (Abbildung 22).

Die Hilfsenergie der untersuchten Kühlszenarien für das Referenzgebäude ist im Kapitel 10.4.2 dargestellt. Die ansteigende Tendenz des Bedarfs der Hilfsenergie ist gleich wie beim Altbau.

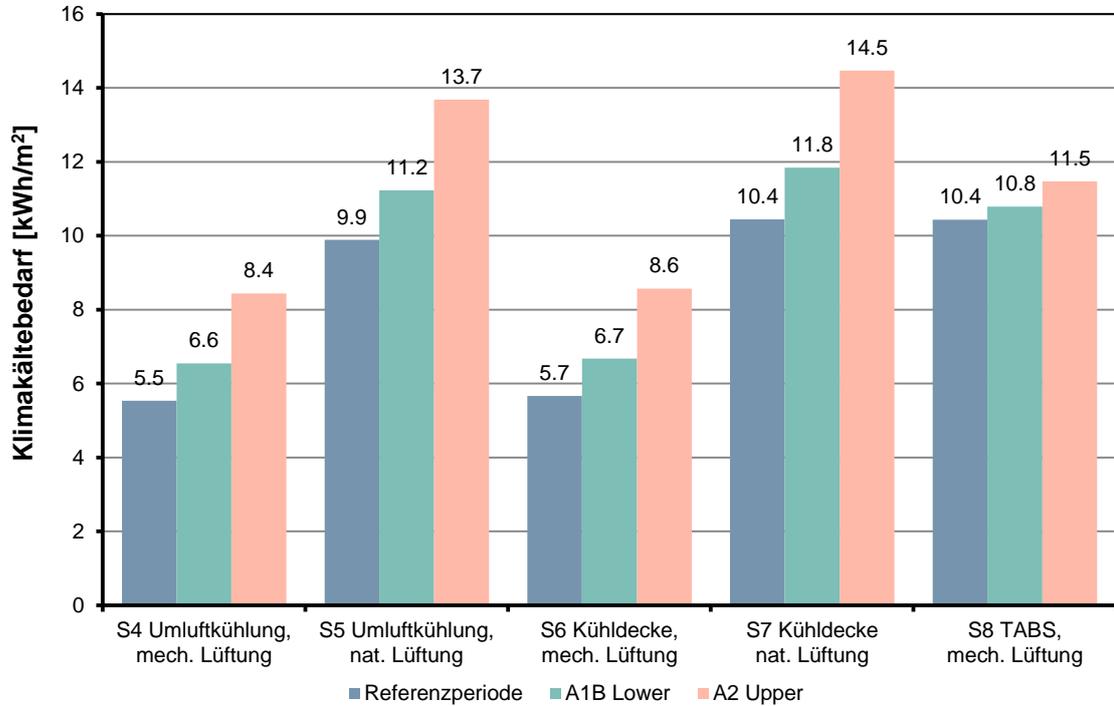


Abbildung 21: Klimakältebedarf des Referenzgebäudes abhängig von Kühlszenarien und Klimadaten.

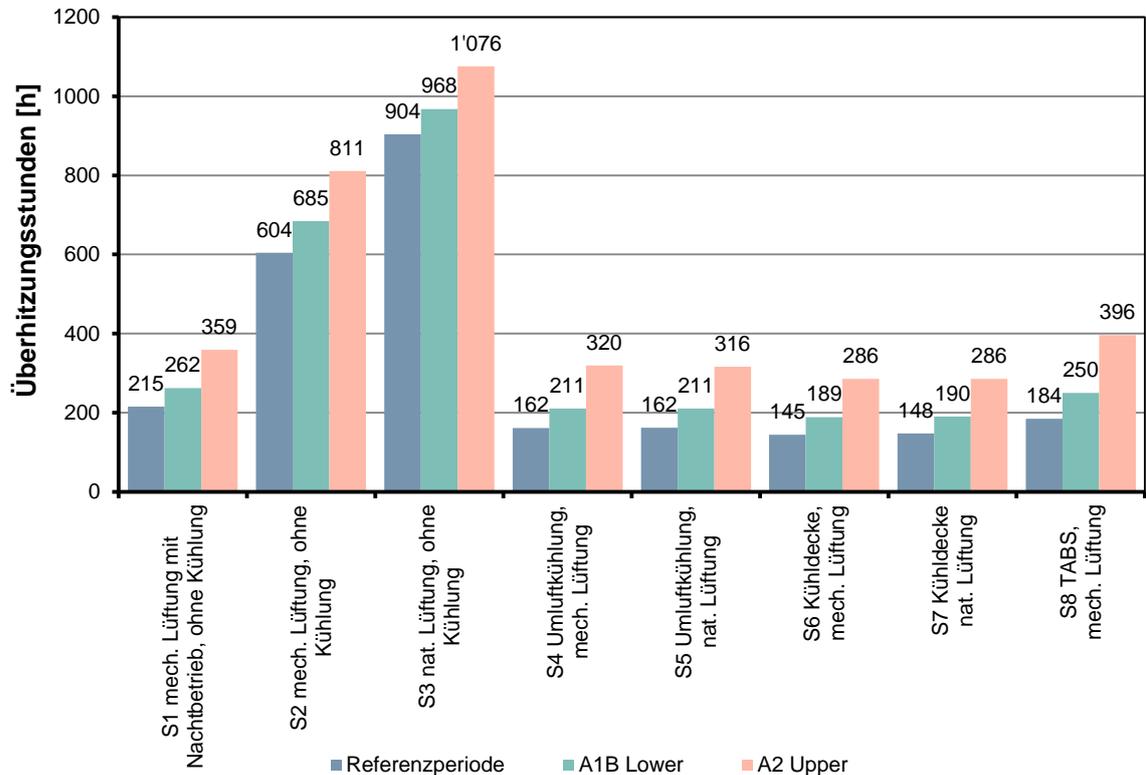


Abbildung 22: Überheizungsstunden des Referenzgebäudes abhängig von Kühlszenarien und Klimadaten.



Die Anpassungsfähigkeit der Betonkernaktivierung (S8) in diesem Gebäudetyp ist im Vergleich mit den anderen Kühlszenarien relativ begrenzt. Der Grund ist die konstante Betriebszeit der Betonkernaktivierung, welche für den Dimensionierungsfall festgelegt wurde. Das führt zur starken Erhöhung der Überhitzungsstunden, wobei der Klimakältebedarf sich zwischen den Klimaszenarien nur wenig verändert. Um das theoretische Potential der Betonkernaktivierung besser abschätzen zu können, wurde entschieden, das System zusätzlich mit der maximalen Betriebszeit zu simulieren: von 20:00 bis 9:00 Uhr. Die Resultate dieser Simulation sind in Tabelle 14 festgehalten.

	Klimakältebedarf, [kWh/m ²]		Überhitzungsstunden, [h]	
	A1B lower	A2 upper	A1B lower	A2 upper
TABS (angepasst), mech. Lüftung	12.9	13.7	208.5	340

Tabelle 14: Klimakältebedarf und Überhitzungsstunden der angepassten Betonkernaktivierung im Referenzgebäude

Die Erhöhungen der Überhitzungsstunden der Klimaperioden „A1B lower“ und „A2 upper“ gegenüber der „Referenzperiode“ sind in der Abbildung 23 dargestellt. Dort ist ebenfalls der Klimakältebedarf pro Kühlszenario aufgezeigt.

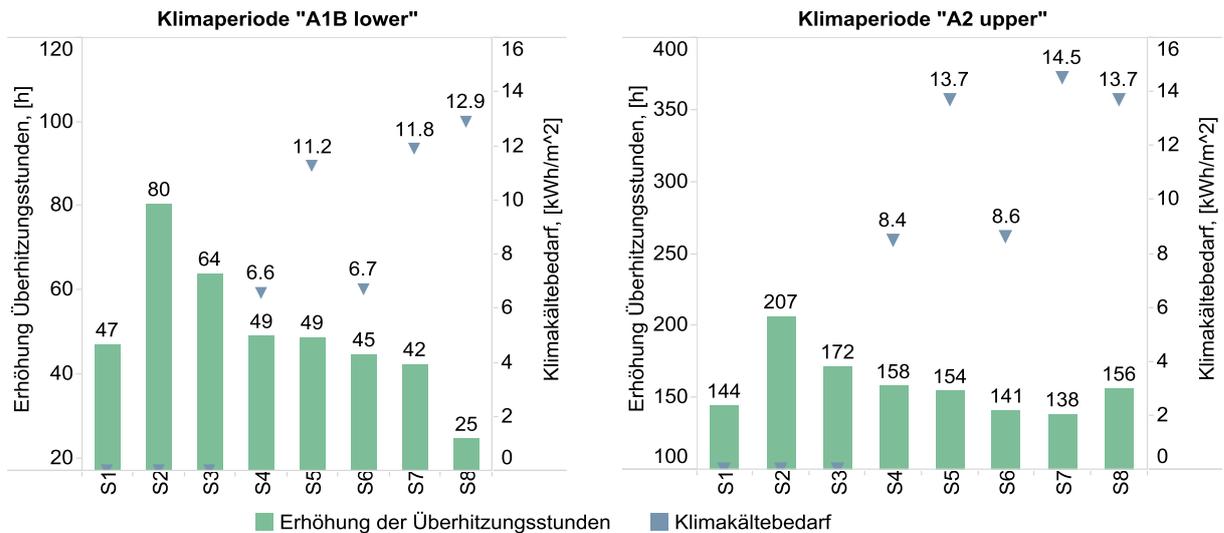


Abbildung 23: Robustheitskriterien im Fall von Referenzgebäude

Der Vergleich der Robustheitskriterien zwischen verschiedenen Kühlszenarien ergibt die Anordnung der Kühlszenarien nach Robustheit (Tabelle 15).



Kühlszenarien	Klimaperiode	
	A1B lower	A2 upper
S1 Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	5	6
S2 Mech. Lüftung, ohne Kühlung	1	1
S3 Nat. Lüftung, ohne Kühlung	2	2
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	4	5
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	3	4
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	7	8
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	6	7
S8 TABS, mech. Lüftung	8	3

Tabelle 15: Anordnung der Kühlszenarien nach Robustheit für das Referenzgebäude. Das robusteste Kühlszenario wurde mit einer Note von 8 bezeichnet, das am wenigsten robuste mit einer Note von 1.

Wie beim Altbau zeigen sich die Kühlszenarien S2 und S3 am wenigsten robust im Vergleich zu den anderen Gebäudetypen. Die Kühlszenarien S6 und S7 sind robuster als die anderen Kühlszenarien bezüglich der Überhitzungsstunden, jedoch hat das Kühlszenario S6 den kleineren Klimakältebedarf im Vergleich mit dem Kühlszenario S7. Nur für die Klimaperiode „A1B lower“ ist das Kühlszenario S8 „Betonkernaktivierung“ robuster als das Kühlszenario S6, weil die Betonkernaktivierung dank des nächtlichen Betriebs über eine grosse Anpassungsfähigkeit verfügt. Jedoch ist diese für die Klimaperiode „A2 upper“ nur robuster als die Kühlszenarien S2 und S3, da die Spitzenlasten für in dieser Klimaperiode zu gross sind und die Betonkernaktivierung über keine Leistungsreserven mehr verfügt.

Die Kühlszenarien S1, S4 und S5 sind relativ robust im Vergleich zu den anderen, weil die Änderung der Überhitzungsstunden (Abbildung 23) relativ klein sind.

6.3.3 Firmenhauptsitz

Der simulierte Klimakältebedarf und die Überhitzungsstunden für die acht definierten Kühlszenarien und die drei verschiedenen Klimaperioden sind in den Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt. Die jährliche Hilfsenergie der untersuchten Kühlszenarien für den Firmenhauptsitz ist im Kapitel 10.4.2 dargestellt. Im Fall des Firmenhauptsitzes benötigen die Kühlszenarien mehr Hilfsenergie als im Altbau und im Referenzgebäude.

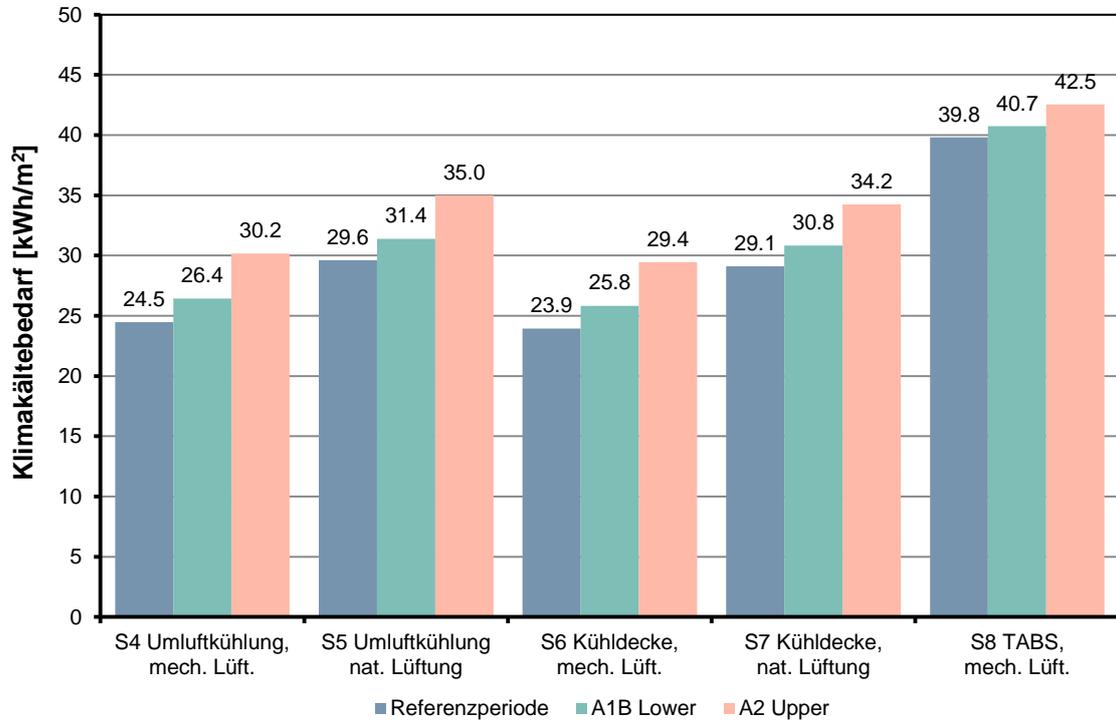


Abbildung 24: Kälteenergiebedarf des Firmenhauptsitzes abhängig von den Kühlszenarien und Klimadaten.

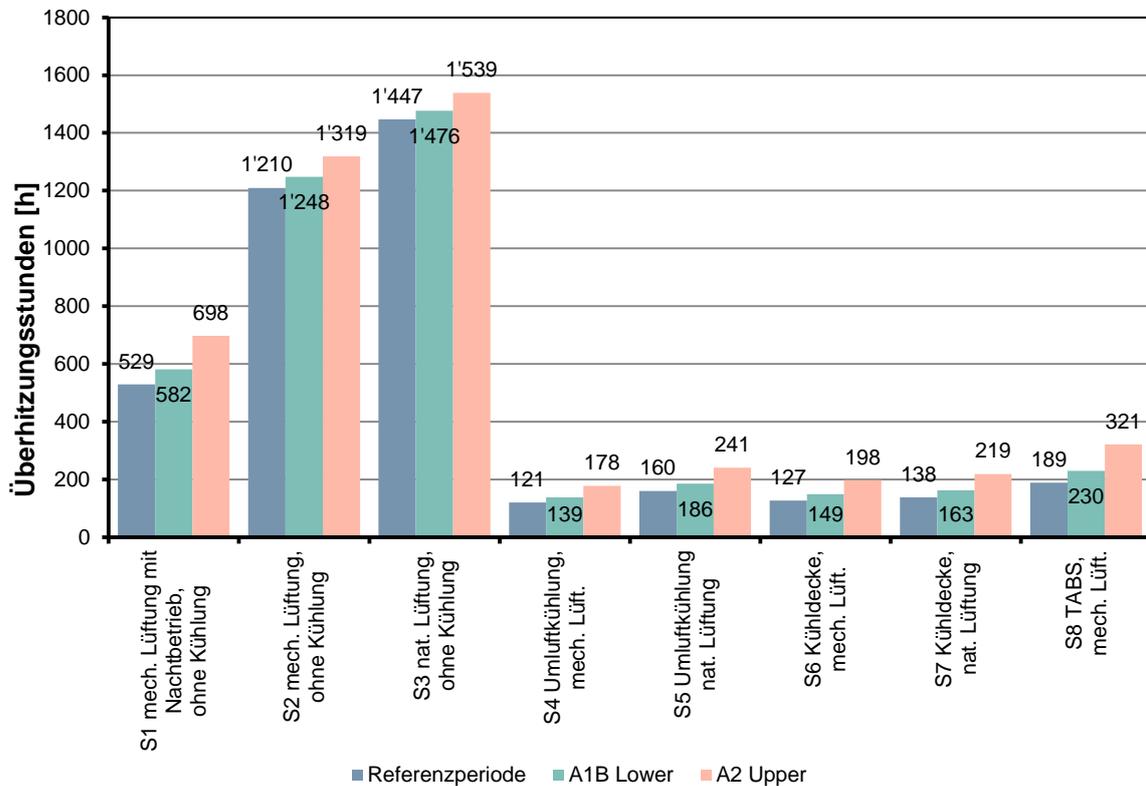


Abbildung 25: Überheizungsstunden des Firmenhauptsitzes abhängig von Kühlszenarien und Klimadaten.



Wie schon beim Referenzgebäude wird die Betonkernaktivierung zusätzlich noch mit der maximalen möglichen Betriebszeit simuliert. Die Resultate dieser Simulation sind untenstehend festgehalten (Tabelle 16).

	Klimakältebedarf, [kWh/m ²]		Überheizungsstunden, [h]	
	A1B lower	A2 upper	A1B lower	A2 upper
TABS (angepasst), mech. Lüftung	49.8	51.7	175	244

Tabelle 16: Klimakältebedarf und Überheizungsstunden der angepassten Betonkernaktivierung in dem Firmenhauptsitz.

Die Robustheitskriterien sind in Abbildung 26 dargestellt.

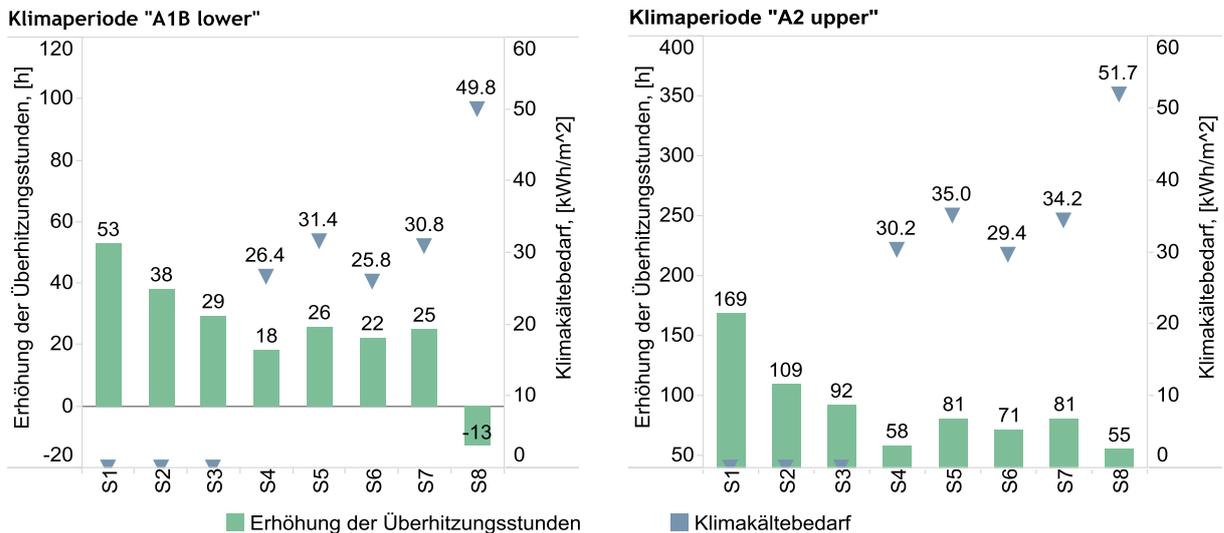


Abbildung 26: Robustheitskriterien im Fall von Firmenhauptsitz

Im Fall der Klimaperiode „A1B lower“ ist die Erhöhung der Überheizungsstunden für das Kühlszenario S8 negativ. Der Grund ist, dass die Anzahl Überheizungsstunden nach der Verlängerung der Nachtbetriebszeit für das Kühlszenario S8 im Fall der Klimaperiode „A1B Lower“ kleiner ist als im Fall der „Referenzperiode“. Das zeigt, dass die Verlängerung der Betriebszeit für diesen Fall zu gross gewählt wurde und lässt vermuten, dass die Räume temporär unterkühlt wurden.

Die Aussagen zur Robustheitsbeurteilung der Kühlszenarien für den Firmenhauptsitz sind in Tabelle 17 dargestellt.



Kühlszenarien	Klimaperiode	
	A1B lower	A2 upper
S1 Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	1	1
S2 Mech. Lüftung, ohne Kühlung	2	2
S3 Nat. Lüftung, ohne Kühlung	3	3
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	7	8
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	4	4
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	6	6
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	5	5
S8 TABS, mech. Lüftung	8	7

Tabelle 17: Anordnung der Kühlszenarien nach Robustheit für den Firmenhauptsitz. Das robusteste Szenario wurde mit einer Note von 8 bezeichnet, das am wenigsten robuste mit einer Note von 1.

Das Kühlszenario S1 ist für den Gebäudetyp Firmenhauptsitz am wenigsten robust im Vergleich zu den anderen Kühlszenarien, weil die Wärmebelastung während des Tags viel grösser ist als die akkumulierte Kühlenergie während der Nacht.

Wie beim Referenzgebäude sind die Kühlszenarien S2 und S3 weniger robust als die anderen.

6.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Simulationen der Klimavariabilität

In der Tabelle 18 ist die Zusammenfassung der Aussagen über die Robustheit der Kühlszenarien bei Änderung der Klimaperioden abgebildet.

Der Unterschied zwischen dem Referenzgebäude und dem Firmenhauptsitz ist, dass die Umluftkühlung insgesamt für den Firmenhauptsitz robuster ist im Vergleich zu anderen Kühlszenarien, weil die Änderungen der Überhitzungsstunden im Vergleich zu den anderen Kühlszenarien relativ klein sind.



	Altbau		Referenzgebäude		Firmenhauptsitz	
	A1B lower	A2 upper	A1B lower	A2 upper	A1B lower	A2 upper
S1: Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	8	8	5	6	1	1
S2: Mech. Lüftung, ohne Kühlung	3	2	1	1	2	2
S3: Nat. Lüftung, ohne Kühlung	2	3	2	2	3	3
S4: Umluftkühlung, mech. Lüftung	5	5	4	5	7	8
S5: Umluftkühlung, nat. Lüftung	4	4	3	4	4	4
S6: Kühldecke, mech. Lüftung	7	7	7	8	6	6
S7: Kühldecke, nat. Lüftung	6	6	6	7	5	5
S8: TABS, mech. Lüftung	n.a.	n.a.	8	3	8	7

Tabelle 18: Zusammenfassung der Robustheitsbeurteilung der untersuchten Kühlscenarien bei Änderung der Klimaperioden (n.a. steht für die nicht untersuchten Fälle).

6.4 Simulation der Nutzervervariabilität

Die Nutzervervariabilität wurde nur für das Referenzgebäude untersucht. In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse der Simulationen der untersuchten Kühlszenarien für ein unteres und oberes Nutzerprofil (definiert im Kapitel 5.4.4) beschrieben. In der Abbildung 27 ist der Klimakältebedarf der Kühlszenarien für die Differenz zwischen den unteren und oberen Nutzerprofilen bezüglich der Klimaänderungsszenarien aufgezeigt.

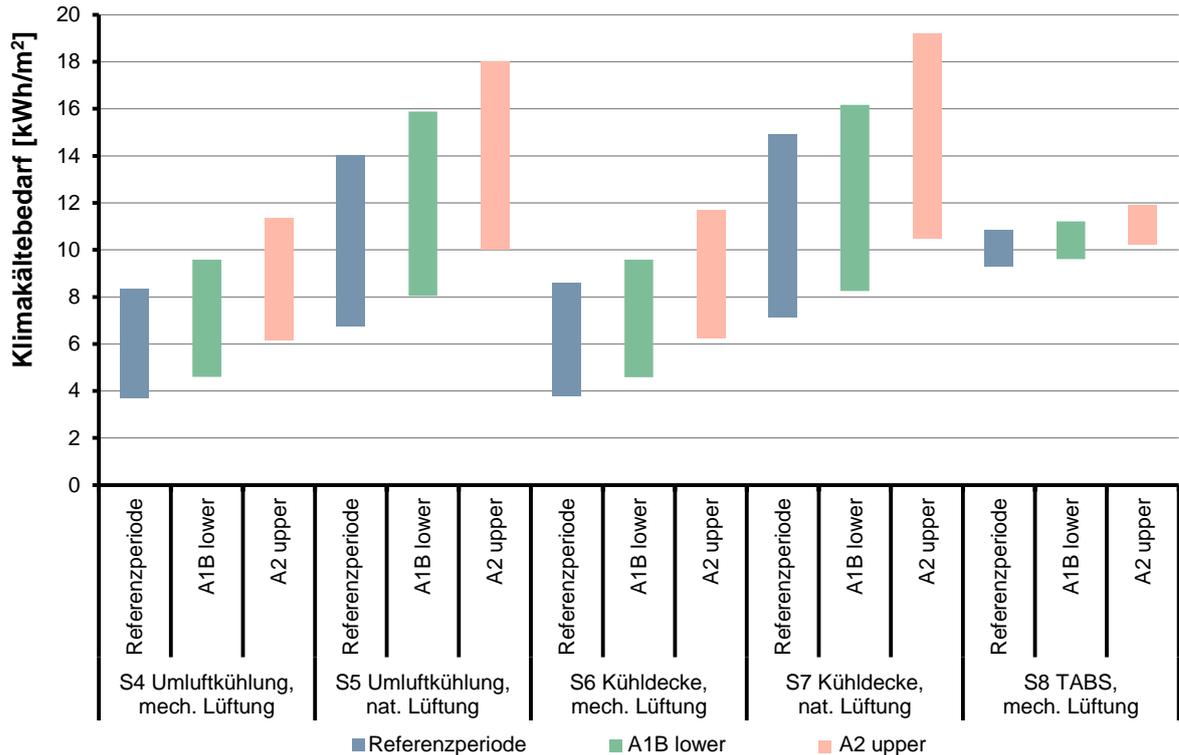


Abbildung 27: Simulierte Differenz des Klimakältebedarfs zwischen den unteren und oberen Nutzerprofilen bezüglich Klimaänderung und Nutzervervariabilität für die Kühlszenarien S4-S8.

Der Einfluss der Nutzervervariabilität auf den Klimakältebedarf ist beim Szenario S8 sehr gering, weil in dieser Untersuchung die Betriebszeit nicht variiert wurde (siehe Kap.5.3.2). Umgekehrt resultiert daraus ein grosser Einfluss auf die Behaglichkeit bei diesem Kühlszenario.

Der Einfluss des Nutzerverhaltens auf die Behaglichkeit ist in Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt. In diesen Abbildungen wurden die Überhitzungsstunden eine Differenz zwischen den oberen und unteren Nutzerprofilen (Kapitel 5.4.4) dargestellt.

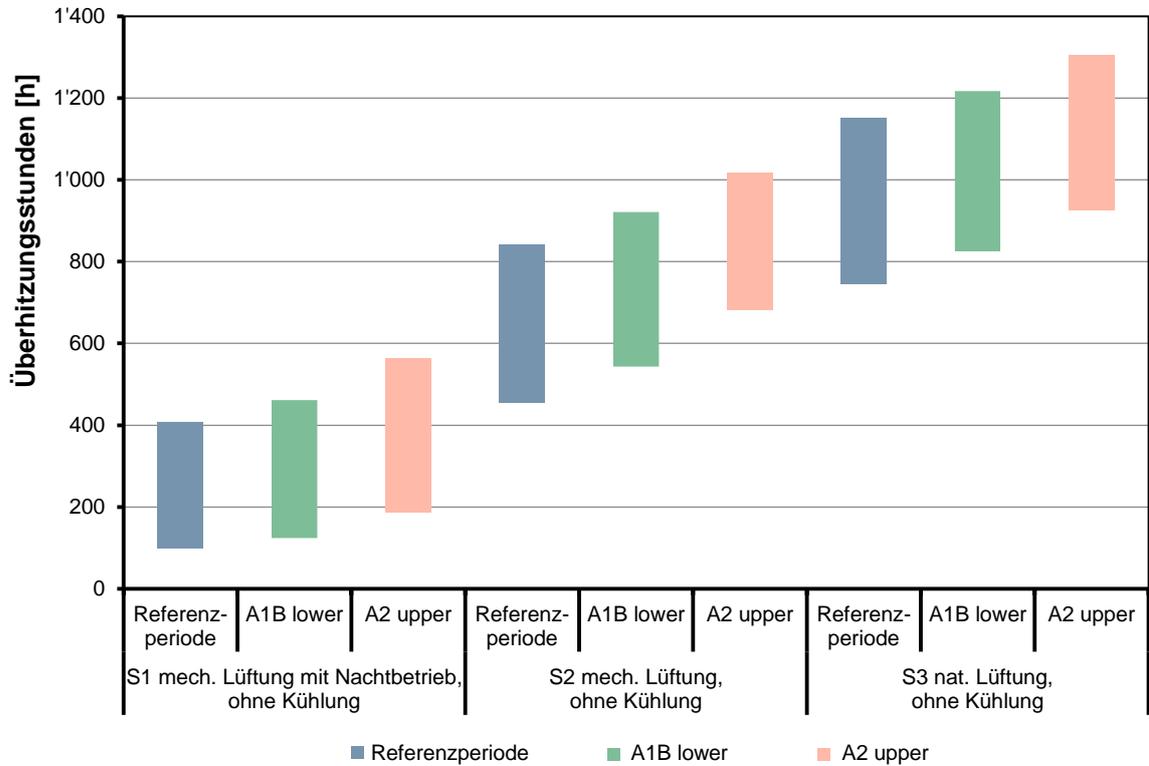


Abbildung 28: Simulierte Differenz der Überheizungsstunden zwischen den unteren und oberen Nutzerprofilen bezüglich Klimaänderung und Nutzervariabilität für die Kühlszenarien S1-S3.

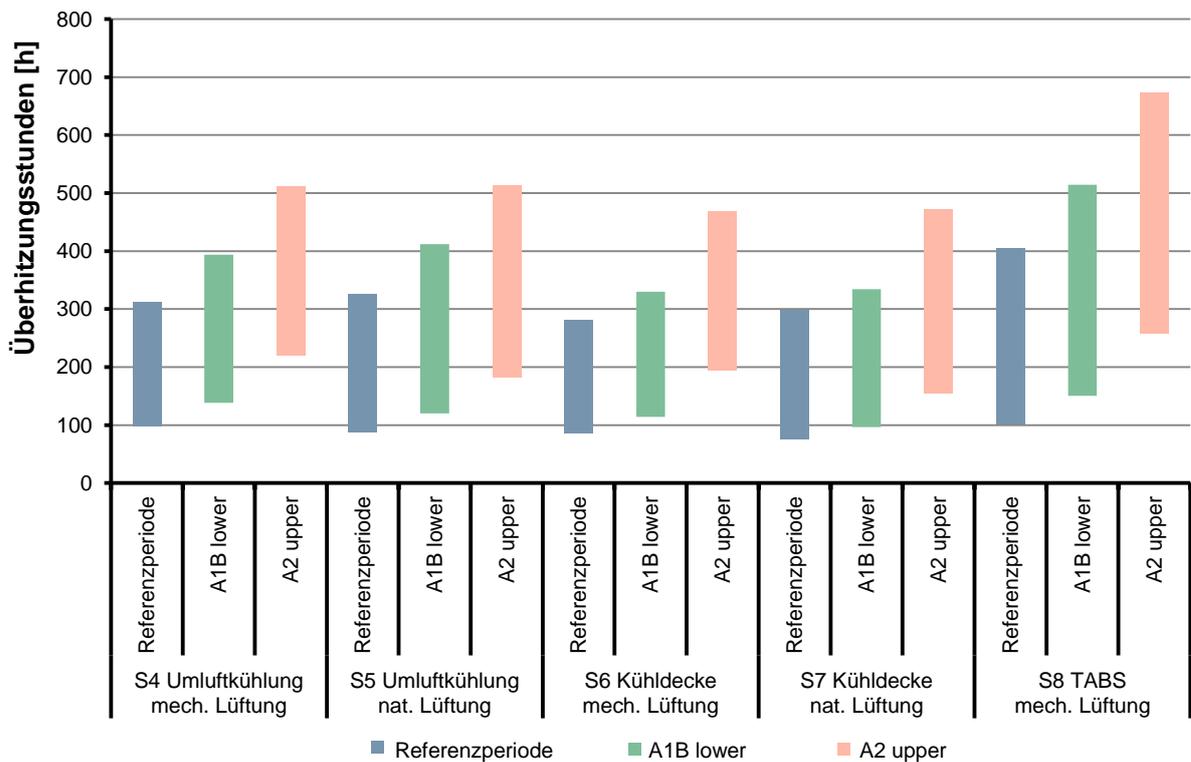


Abbildung 29: Simulierte Differenz der Überheizungsstunden zwischen den unteren und oberen Nutzerprofilen bezüglich Klimaänderung und Nutzervariabilität für die Kühlszenarien S4-S8.



Der Einfluss der Nutzervariabilität und Klimaänderung auf die Hilfsenergie der Kühlszenarien ist in dem Kapitel 10.4.3 dargestellt.

Für die Robustheitsbeurteilung der Kühlszenarien bezüglich der Nutzervariabilität wurden die absoluten Änderungen der Überhitzungsstunden (Differenz vom unteren zu den oberen Tagesprofilen) verglichen. Zusätzlich wurde der Klimakältebedarf für die untersuchten Kühlszenarien aus Kapitel 6.3.2 in diesem Kapitel als Robustheitskriterien ausgewertet. Die Robustheitskriterien für die „Referenzperiode“ sind in der Abbildung 30 aufgezeigt.

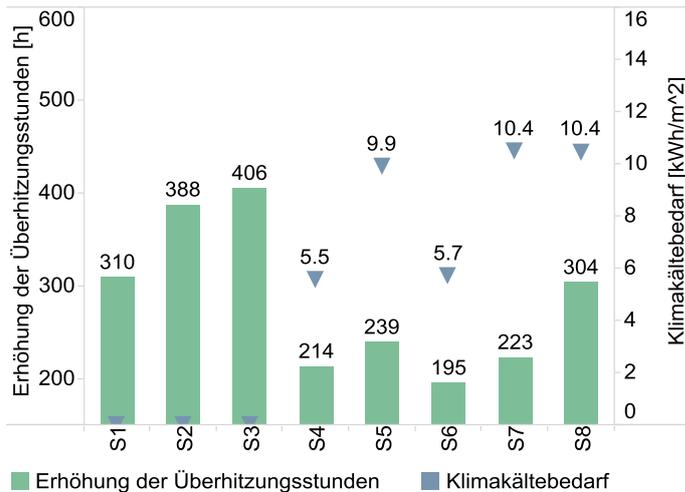


Abbildung 30: Robustheitsbeurteilung bezüglich der Nutzervariabilität für die „Referenzperiode“

Die Kühlszenarien S2 und S3 sind am wenigsten robust im Vergleich zu den anderen, weil die Änderung der Überhitzungsstunden mit der Variation der Nutzerbelastung am grössten ist. Das Kühlszenario S1 ist robuster als S8, weil das Kühlszenario S8 einen höheren Klimakältebedarf aufweist. Jedoch sind die Änderungen der Überhitzungsstunden für beide Kühlszenarien ähnlich. Die Kühlszenarien mit natürlichen Lüftung S5 und S7 sind nur im Vergleich mit den Kühlszenarien S4 und S5 weniger robust. Das robusteste Kühlszenario ist S6, weil die Änderung der Überhitzungsstunden am kleinsten im Vergleich mit den anderen ist.

Die Robustheitsbeurteilung für die Klimaperiode „A1B lower“ ist in der Abbildung 31 dargestellt.

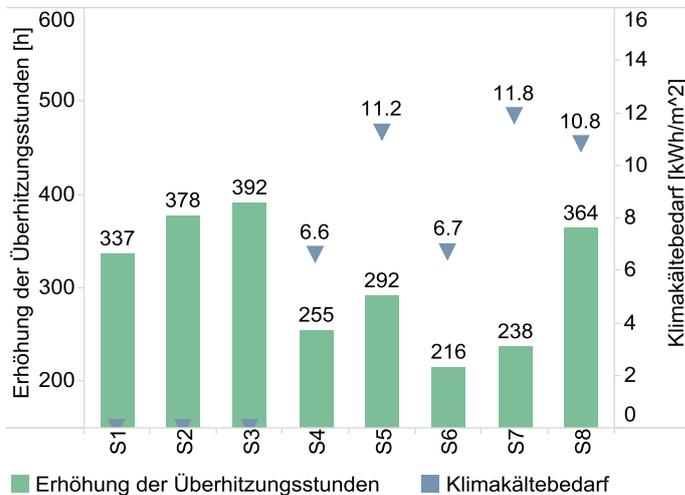


Abbildung 31: Robustheitsbeurteilung bezüglich der Nutzervariabilität für Klimaperiode "A1B lower"



Die Aussage bezüglich der Robustheit verändert sich grundsätzlich nicht. Nur das Kühlszenario S7 ist robuster als das Kühlszenario S4.

Die Auswertung der Robustheitskriterien bezüglich der Nutzervervariabilität für Klimaperiode „A2 upper“ ist in der Abbildung 32 dargestellt.

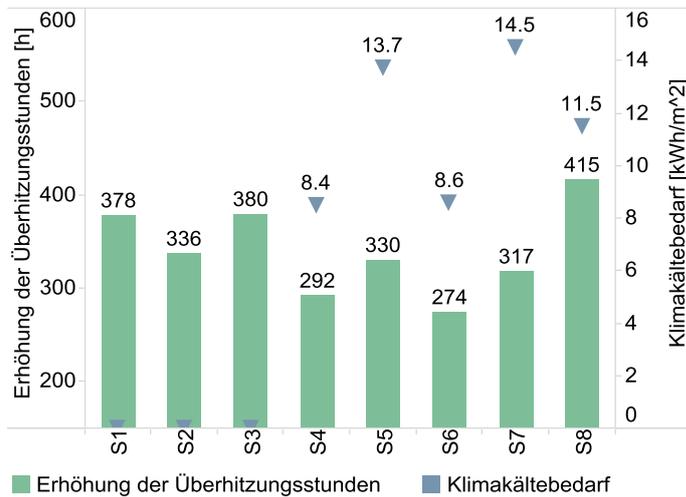


Abbildung 32: Robustheitsbeurteilung bezüglich der Nutzervervariabilität für Klimaperiode "A2 upper"

Für die Klimaperiode „A2 upper“ ist das Kühlszenario S8 am wenigsten robust im Vergleich zu den anderen. Das Kühlszenario S1 mit der Lüftung während der Nacht ist weniger robust als das Kühlszenario S2.

Die Anordnung der Kühlszenarien bezüglich der Nutzervervariabilität für die drei untersuchten Klimaperioden ist in der Tabelle 19 dargestellt.

	Referenzperiode	A1B lower	A2 upper
S1: Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	4	4	3
S2: Mech. Lüftung, ohne Kühlung	2	3	4
S3: Nat. Lüftung, ohne Kühlung	1	1	2
S4: Umluftkühlung, mech. Lüftung	7	6	7
S5: Umluftkühlung, nat. Lüftung	5	5	5
S6: Kühldecke, mech. Lüftung	8	8	8
S7: Kühldecke, nat. Lüftung	6	7	6
S8: TABS, mech. Lüftung	3	2	1

Tabelle 19: Zusammenfassung der Robustheitsbeurteilung bezüglich Nutzervervariabilität



6.5 Ergebnisse des T-Tests

Für den T-Test wurden zwei zu vergleichende Paare bestimmt: „Referenzperiode“ und „A1B lower“; „Referenzperiode“ und „A2 upper“. Für die Auswertung wurden die Ergebnisse aus den Abbildung 27, Abbildung 28, Abbildung 29 verwendet.

Die Zusammenfassung der Ähnlichkeiten der Nutzer- und Klimavariabilität in Bezug auf den Klimakältebedarf und die Überhitzungsstunden für diese zwei Paare sind in der Tabelle 20 dargestellt.

	Klimakältebedarf		Überhitzungsstunden	
	Referenzperiode - A1B lower	Referenzperiode - A2 upper	Referenzperiode - A1B lower	Referenzperiode - A2 upper
S1: Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	-	-	79%	51%
S2: Mech. Lüftung, ohne Kühlung	-	-	82%	61%
S3: Nat. Lüftung, ohne Kühlung	-	-	87%	67%
S4: Umluftkühlung, mech. Lüftung	78%	51%	86%	47%
S5: Umluftkühlung, nat. Lüftung	80%	57%	78%	56%
S6: Kühldecke, mech. Lüftung	82%	53%	81%	47%
S7: Kühldecke, nat. Lüftung	85%	58%	88%	58%
S8: TABS, mech. Lüftung	78%	48%	77%	50%

Tabelle 20: Zusammenfassung des T-Tests

Für das Klimaänderungsszenario „A1B lower“ beträgt die Ähnlichkeit zwischen Nutzer- und Klimavariabilität zwischen 77% und 88 % und für das Klimaänderungsszenario „A2 upper“ zwischen 47 % und 67 %. Das bedeutet, dass der Unterschied zwischen den Einflüssen der Klimaänderungsszenarien „A1B lower“ und „A2 upper“ und der Nutzervariabilität generell nicht signifikant ist.

Nur für die Kühlszenarien S4 und S6 im Fall der Klimaperiode „A2 upper“ ist der Unterschied zwischen den Nutzer- und Klimavariabilität signifikant.



6.6 Fazit

Die quantitativen Ergebnisse für den Dimensionierungsfall bezüglich des Klimakältebedarfs je Kühlszenarien S4 bis S8 und Gebäudetyp sind in der Tabelle 21 aufgezeigt.

Kühlszenarien	Klimakältebedarf, [kWh/m ²]		
	Altbau	Referenzgebäude	Firmenhauptsitz
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	1.1	5.4	23.8
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	1.6	8.1	28.8
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	1.9	5.7	23.2
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	2.7	8.5	28.3
S8 TABS, mech. Lüftung	n.a.	11.8	42.6

Tabelle 21: Klimakältebedarf je Kühlszenarien S4 bis S8 und Gebäudetyp für den Dimensionierungsfall.

Die prozentuelle Erhöhung des Klimakältebedarfs und der Überhitzungsstunden bei der Änderung der Klimaszenarien im Vergleich zur „Referenzperiode“ sind in der Tabelle 22 aufgezeigt.

Klimaperiode	Altbau		Referenzgebäude		Firmenhauptsitz	
	Erhöhung des Klimakältebedarfs, [%]	Erhöhung der Überhitzungsstunden, [%]	Erhöhung des Klimakältebedarfs, [%]	Erhöhung der Überhitzungsstunden, [%]	Erhöhung des Klimakältebedarfs, [%]	Erhöhung der Überhitzungsstunden, [%]
A1B lower	20 bis 30	20 bis 40	14 bis 18	7 bis 30	6 bis 8	2 bis 20
A2 upper	70 bis 100	80 bis 140	40 bis 50	7 bis 90	18 bis 23	6 bis 60

Tabelle 22: Prozentuale Änderung des Klimakältebedarfs und der Überhitzungsstunden bei der Änderung der Klimaszenarien im Vergleich zur „Referenzperiode“.

Die Änderungen des Klimakältebedarfs und der Überhitzungsstunden für die untersuchten Klimaperioden und Kühlszenarien bezüglich Nutzervervariabilität sind in Tabelle 23 dargestellt.



Kühlszenarien	Referenzperiode		A1B lower		A2 upper	
	Änderung des Klimakältebedarfs, [kWh/m ²]	Änderung der Überhitzungsstunden, [h]	Änderung des Klimakältebedarfs, [kWh/m ²]	Änderung der Überhitzungsstunden, [h]	Änderung des Klimakältebedarfs, [kWh/m ²]	Änderung der Überhitzungsstunden, [h]
S1: Mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	-	310	-	337	-	378
S2: Mech. Lüftung, ohne Kühlung	-	388	-	378	-	336
S3: Nat. Lüftung, ohne Kühlung	-	406	-	392	-	380
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	4.6	214	5.0	255	5.2	292
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	7.3	239	7.8	292	8.0	330
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	4.8	195	5.0	216	5.5	274
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	7.8	223	7.9	238	8.7	317
S8 TABS, mech. Lüftung	1.6	304	1.6	364	1.7	415

Tabelle 23: Änderung des Klimakältebedarfs und der Überhitzungsstunden beim Wechseln vom unteren zum oberen Nutzerprofil.



7. Schlussfolgerung

Es zeigte sich, dass bei allen Gebäudetypen in der Periode „2035“ der Heizwärmebedarf tiefer und Kühlenergiebedarf höher liegt als in der Periode „1995“ (Kapitel 6.1). Da sich diese Änderungen schon mit dem verwendeten moderaten CO₂-Emissionsszenario „A1B mittel“ deutlich zeigen, dürften extremere Emissionsszenarien noch grössere Auswirkungen auf die Energiekennwerte verursachen. Es wäre also angebracht, Überlegungen zur zukünftigen Änderung des Klimas bereits bei der Planung von Gebäuden anzustellen, da die Lebensdauer der Gebäudetechnik sich mit ungefähr 30 Jahren in derselben Grössenordnung bewegt wie die Definition des Klimas.

Es wurde gezeigt, dass unter den drei untersuchten Bürogebäuden der "Altbau" aufgrund seines geringen Wärmewiderstands und seiner hohen Wärmekapazität den geringsten Klimakältebedarf benötigt. Den höchsten Wert an Klimakältebedarf weist der Bürogebäude „Firmenhauptsitz“ infolge seines hohen Verglasungsanteils und der damit verbundenen hohen solaren Lasten auf.

Die Dimensionierung der Kühlszenarien zeigte, dass wegen der hohen thermischen Masse in alten Gebäuden Umluftkühlung kleineren Klimakältebedarf im Vergleich zur Kühldecke hat. Falls das Gebäude leichter ist, ist der Unterschied im Klimakältebedarf zwischen Kühldecke und Luftkühlsystem nicht mehr signifikant.

Die Anwendung der mechanischen Lüftungsanlage (mit dem Wärmerückgewinnungsgerät) anstatt der natürlichen Lüftung reduziert grundsätzlich den Klimakältebedarf der Gebäude infolge des möglichen Nachtbetriebs (eine Nachtauskühlung mit natürlicher Lüftung wäre auch möglich, wurde in diesem Projekt aber nicht untersucht).

Da es sich bei der Betonkernaktivierung um Massivendecken handelt, deckt sie den Klimakältebedarf nicht sofort. Um den gleichen Komfort zu erreichen (in Bezug auf Überhitzungsstunden) wie bei der Kühldecke und der Umluftkühlung, wird daher eine Nachtvorkühlung benötigt. Deshalb hat dieses Kühlszenario den grösseren Klimakältebedarf im Vergleich zu den anderen Kühlszenarien. Jedoch ist der Vorteil der Betonkernaktivierung in der Anpassungsfähigkeit der Nachtbetriebszeit. Die Vorteile bezüglich der Kälteerzeugung wurden hier nicht betrachtet, betrachtet wurde nur die Nutzenergie.

Die Simulation der prognostizierten Klimaszenarien zeigte, dass die Ergebnisse qualitativ dieselben sind wie für den Dimensionierungsfall, lediglich die Werte in Bezug auf die Häufigkeit liegen höher. Kühldecken haben mehr Einfluss auf die empfundene Temperatur und können den Komfort besser beibehalten, wenn der Klimakältebedarf steigt. Deshalb ist das Kühlszenario S6 „Kühldecke mit mechanischer Lüftung“ grundsätzlich für alle untersuchten Bürogebäude robuster als die anderen Kühlszenarien. Die Ausnahme sind die folgenden Kühlszenarien:

- S8 „Betonkernaktivierung“ für das Referenzgebäude und den Firmenhauptsitz, dank ihrer Anpassungsfähigkeit während des Nachtbetriebs. Jedoch reduziert sich die Robustheit dieses Kühlszenarios beim Emissionsszenario "A2 upper" infolge der zu geringen Leistungsreserve;
- S5 „Umluftkühlung mit mechanischer Lüftung“ für hoch verglaste Bürogebäude wie das untersuchte Bürogebäude „Firmenhauptsitz“;
- S1 „Mechanische Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung“ für bestehende Bürogebäude wie den „Altbau“.

Die Kühlszenarien S2 und S3 ohne Kälteabgabesysteme zeigen grundsätzlich die kleinste Robustheit im Vergleich mit anderen Kühlszenarien. Die Kühlszenarien mit mechanischer Lüftung zeigen eine grössere Robustheit im Vergleich zu den Kühlszenarien mit natürlicher Lüftung, was mit den Annahmen bezüglich des Nachtbetriebs zusammenhängt.

Die Robustheitsbeurteilung für die Nutzervariabilität zeigt allgemein die gleichen Aussagen wie für die Klimavariabilität. Jedoch ist die Betonkernaktivierung nur robuster als die Kühlszenarien ohne Kälteabgabesysteme und ohne Nachtkühlung. Im Fall von Klimaperiode „A2 upper“ ist die Betonkernaktivierung am wenigsten robust, wobei in diesem Fall die Betriebszeit konstant gehalten wurde.



8. Diskussion / Empfehlungen

Vor der Diskussion über die untersuchten Kälteabgabesysteme und die Kühlkonzepte gibt es einige allgemeine Punkte, welche Planern empfohlen werden könnten. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Anpassungsfähigkeit aller Kühlszenarien nicht genug gross ist, um die Komfortbedingungen während der prognostizierten Klimaperioden entsprechend den Planungszielwerten einzuhalten. Deshalb sollte die Leistung der untersuchten Kälteabgabesysteme während der Planung überdimensioniert werden. Der Überdimensionierungsfaktor sollte für jedes Kälteabgabesystem separat quantifiziert werden. Oder die klimatischen Grundlagen für die Dimensionierung der Kälteabgabesysteme sollten überdacht werden und die zukünftige Klimaentwicklung einbeziehen.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass nur reine Kälteabgabesysteme untersucht wurden (Nutzenergie), ohne die darauf passende Kälteerzeugung zu betrachten. Gerade beim Kühlszenario Betonkernaktivierung würde dies aber auf eine Änderung der Kernaussagen zu dessen Robustheit hinauslaufen: es geht darum, mit der zeitlichen Verschiebung der Lasten günstigere aussenklimate Randbedingungen für die Erzeugung zu schaffen und dabei z.B. Freecooling zu ermöglichen. Das wird aber mit der Klimaerwärmung tendenziell schlechter und könnte Nachrüstungen auf der Kälteerzeugerseite erfordern. Die Beschränkung auf die Kälteabgabesysteme rückt auch die Tatsache in den Vordergrund, dass in den hier verwendeten Klimadaten nur die Temperaturen variiert wurden, nicht aber andere Treiber der Kühllast wie z.B. die Solarstrahlung. Gerade deshalb müsste man sich auf Effekte konzentrieren, für welche die Aussentemperatur eine Rolle spielt (Teile davon sind abgedeckt, z.B. die Nachtlüftung), vieles aber nicht wie z.B. die Rückkühlung bzw. eben die "Freecooling"-Möglichkeiten, die für die unterschiedlichen Kälteabgabesysteme unterschiedlich sind. Ausserdem kann die Robustheit der Betonkernaktivierung gegenüber der Nutzervariabilität tatsächlich höher sein als hier ermittelt, wenn prädiktive Regelungen eingesetzt werden, welche die Nutzerpräsenz im Voraus einbeziehen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass es kein generelles Kühlkonzept gibt, welches für alle Bürogebäudetypen am robustesten funktionieren wird. Für jedes Bürogebäude sollte eine Robustheitsbeurteilung der Kühlkonzepte gemacht werden. Kombinationen weiterer Kühlmöglichkeiten, z.B. Nachtlüftung mit TABS, wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Ausserdem gibt es je nach Auslegungsbedingungen auch bei anderen Kühlszenarien die Möglichkeit, mit betrieblichen Anpassungen auf die Klimaänderung zu reagieren (z.B. Nachstellen von Betriebstemperaturen und Betriebszeiten). Eine genauere Untersuchung der möglichen Betriebsoptimierungen für jedes Kühlszenario könnte durchgeführt werden, um die verschiedenen Lösungen bezüglich derer Flexibilität auszuwerten.

Dennoch können tendenziell folgende Aussagen gemacht werden:

- Kühldeckensysteme sind generell robuster gegenüber der Klimavariabilität und insbesondere gegenüber der Nutzervariabilität;
- Die Robustheit von TABS ist beschränkt bis zum Klimaentwicklungsszenario 2035, danach fehlt die Leistungsreserve.

Eine Nachfolgestudie müsste die betrieblichen Aspekte und die Kälteerzeugung miteinbeziehen und auf Seite der Klimadaten weitere Grössen wie z.B. die Solarstrahlung berücksichtigen (das wird aktuell im BFE-Projekt KlimaBau untersucht).



9. Literaturverzeichnis

- [1] Sia, SIA 382/1, 2014. Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, SIA Zürich. p. 82.
- [2] Sia, SIA 382/2, 2011. Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf. SIA Zürich. p. 40.
- [3] Frank, T., Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. 2005, Energy and Buildings, Vol. 37, Issue 11, pp. 1175–1185
- [4] Voss, K. and E. Musall, Nullenergiegebäude - Internationale Projekte zum klimaneutralen Wohnen und Arbeiten. 1 ed. 2011, München: Detail Green Books. 191.
- [5] Struck, C., et al. „Performance-Gap“ in der Schweiz – Brisanz, Ursachen und Einflüsse auf die Differenz von geplante Energiebedarf und gemessenen Energieverbrauch in Gebäuden. in 18. Status-Seminar, Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt. 2014. ETH Zürich: BRENET.
- [6] UVEK and BFE, Energiestrategie 2050 – Erstes Massnahmenpaket, 2012, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Energie (BFE). p. 228.
- [7] Commission, E., Energy-Efficient Buildings: Multi-annual road map for contractual PPP under Horizon 2020, 2013, Publications Office of the European Union: Luxembourg.
- [8] Bring, A., P. Sahlin, and M. Vuolle, Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation, in A Report of Task 22, Building Energy Analysis Tools1999, International Energy Agency (IEA). p. 110.
- [9] Chalupnik, M.J., D.C. Wynn, and P.J. Clarkson, Comparison of utilities for protection against uncertainty in system design. Journal of Engineering Design, 2013. 24(12): p. 814-829.
- [10] Wieland, A. and C.M. Wallenburg, Dealing with supply chain risks. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2012. 42(10): p. 887-905.
- [11] Sia, Merkblatt 2024 - Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik. 2015.
- [12] Artmann N., 2008. Cooling of the building structure by night-time ventilation. PhD Arbeit. Aalborg University. S. 183.
- [13] Sia, SIA 180, 2014. Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. SIA Zürich. p. 72.
- [14] SIA Merkblatt 2040 Effizienzpfad Energie, 2011.
- [15] Schramek E., et. al., 2007. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Industrieverlag, p. 2181.
- [16] Rimann, J., et al., Klimaanlage und Raumkonzepte in Bürogebäuden im Kanton Zürich, 2006, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL): Zürich. p. 49.
- [17] Gwerder, M., et al., Final Report: Use of Weather And Occupancy Forecasts For Optimal Building Climate Control – Part II: Demonstration (OptiControl-II), 2013. p. 166.
- [18] Baschnagel, P. and V. Wouters, Anaxo Building - Verbrauchsdaten, D. Hangartner and C. Struck, Editors. 2014, unveröffentlicht: Horw.



- [19] Odermatt, A., B. Frei, and M. Sulzer, Prüfstellen Bürogebäude EuropTec AG, Hochschule Luzern: Horw. p. 92.
- [20] Sia, SIA Merkblatt 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik, 2010, SIA Zürich. p. 80.
- [21] CH2011, Swiss Climate Change Scenarios CH2011, 2011, C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland: Zürich, Switzerland. p. 88.
- [22] HEV Schweiz, „Statistik: Sonnenscheindauer & Heizgradtage,“ 2014. [Online]. Available: www.hev-schweiz.ch. [Zugriff am 16 12 2014].
- [23] Westfall, P., Henning, K., Understanding Advanced Statistical Methods. 2013. p. 569.
- [24] Gemeindebüro Baar, Energiestadt Baar - Energiebewusst handeln: Massnahmenplan 2014, 2013: Baar. p. 6.
- [25] Aardeplan AG, MFH Kirchrainweg: für eine nachhaltig gebaute und kulturell wertvolle Umwelt, in Pressemappe 2013: Baar. p. 8.
- [26] Glanzmann, J. and O. Humm, Haus 2050 - Wohnkomfort mit 2000W. 1 ed. Nachhaltigkeit 2013, Zürich: faktor Verlag. 103.
- [27] Burckhardt+Partner Neubau ABR Bau 5, Administrationengebäude Roche. Ausgewählte Projekte (online), 2014. 6.
- [28] Immobilien Stadt Bern Stöckacker Süd. Aktuelle Wohnbauprojekte, 2014. 1.
- [29] Schmid, P., et al., Fassaden in Metall / Glas - Ergebnisse der Marktanalyse 2013, 2013 Zürich.
- [30] Bernhard, M., et al., Immobilienmarkt 2013 - Strukturen und Perspektiven, in Swiss Issues Immobilien 2013, Credit Suisse. p. 123.
- [31] Franke, P.J. Je größer der Büroraum, umso größer die Probleme? . Inside Real estate, 2012.
- [32] Struck, C., et al., Machbarkeitsbeurteilung eines Gebäudeautomations-Moduls zur nutzerspezifischen Kommunikation von Anlagenbetriebs- und Raumzustandsdaten, 2014, Hochschule Luzern, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik: Horw. p. 38.
- [33] Schramek E., et. al., 2007. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Industrieverlag, p. 2181.
- [34] Sia, SIA 180, 2014. Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. Zürich, p. 72.
- [35] Macdonald I., 2009. Comparison of Sampling Techniques on the Performance of Monte-Carlo Based Sensitivity Analysis, 2009.
- [36] Stein M., 1987. Large sample properties of simulations using latin hypercube sampling, Technometrics Vol. 29, No.2, pp. 143-151, 1987.
- [37] S. Burhenne und S. Herkel, „Methodik zur Unsicherheitsbewertung und Sensitivitätsanalyse für thermische Gebäudesimulationen,“ in Tagungsband BauSim 2012, Berlin, 2012.
- [38] Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren: Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2014, Herausgeber: Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern, 2015
- [39] Gadola, R., et al., Gesamtenergieeffizienz von Büro-Bauten, Optimierung des Heizwärmebedarfs vs. Optimierung der Gesamtenergieeffizienz, 2010, Bundesamt für Energie BFE: Zürich. p. 102.



- [40] Struck, C., et al., Towards assessing the robustness of building systems with positive energy balance – a case study in CISBAT 2011, Cleantech for sustainable buildings 2011, Solar Energy and Building Physics Lab (LESO-PB): Lausanne, Switzerland. p. 6.
- [41] Frank, T., Herausforderungen des Klimawandels, in EMPA AKADEMIE2008, Empa: Empa, Zürich. p. 17.
- [42] Deecke H., et. al., 2003. Die Betonkernaktivierung. Gk Druck Gerth & Klaas GmbH, Hamburg, p. 102.
- [43] Tödtli J., et. al., 2009. TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen. Zürich, Faktor Verlag, p. 190.



10. Anhang

10.1 Interviews

10.1.1 Kernfragen

Die Interviews wurden halbstrukturiert auf Basis von vier vorab kommunizierten Kernfragen durchgeführt. Es wurden fünf Interviews mit zwei Architekten, zwei Gebäudetechnikern und einem Gebäudebetreiber durchgeführt, siehe Tabelle 24. Die diskutierten Kernfragen lauteten wie folgt:

- a. Welche Bedeutung hat aus Ihrer Perspektive die Erreichung des geplanten Energiebedarfs in der Gebäudenutzungsphase für die Erreichung der 2000W-Gesellschaft?
- b. Wie bewerten Sie die Fähigkeit aktuell gebauter Gebäude, den geplanten Energiebedarf zu erzielen und über den Lebenszyklus Ihrer Anlagentechnik zu gewährleisten.
- c. Wie schätzen Sie Ihren Einfluss als Planer ein, den thermischen Komfort sicherzustellen und die gewünschte Energiebilanz zu erreichen? Wo sehen Sie mögliche Stellschrauben?
- d. Benötigen Sie als Experte zusätzliche Werkzeuge oder Informationen um sicherzustellen, dass die gewünschte Energiebilanz über den Lebenszyklus eines Gebäudes gewährleistet werden kann? Wen wünschen Sie sich dafür als Ansprechpartner?

Pos.	Name	Disziplin	Organisation	Funktion	Interviewdatum
1.	Hell, Andreas	Architektur	Burckhardt Partner AG	Projektleiter	3. April 2014
2.	Huber, Manfred	Architektur	Aardeplan AG	Geschäftsführer	10. April 2014
3.	Wüthrich, Marc	Gebäudetechnik	Roschi Gruner AG	Geschäftsleiter	24. April 2014
4.	Burkhardt, David	Gebäudetechnik	Aicher, De Martin, Zweng AG	Projektleiter	01. Mai 2014
5.	Kuster Marcel	Facility Management	Schweizerische Rückversicherungs-Gesellschaft AG	Direktor, Corporate Real Estate & Logistics	22. Mai 2014

Tabelle 24: Übersicht der Interviewpartner.

10.1.2 Ergebnisse der Interviews

- a. Welche Bedeutung hat aus Ihrer Perspektive die Erreichung des geplanten Energiebedarfs in der Gebäudenutzungsphase für die Erreichung der 2000W Gesellschaft?
- Die 2000 Watt-Gesellschaft spielt in der Praxis bei privaten Bauherrn/ Unternehmen eine untergeordnete Rolle (ausser z.B. bei grossen Unternehmen als Marketing-Instrument, bei Pilot- oder Demonstrationsprojekten oder bei der öffentlichen Hand) und ist nur über Verordnungen und Gesetze zu erreichen.



- Die öffentliche Hand nutzt die Energiebuchhaltung (Monitoring) als Planungsinstrument zur Erreichung energetischer Zielsetzungen (z.B. SIA Effizienzpfad 2040 [14] am Beispiel Stadt Baar [24]). Abbildung 33 zeigt einen Ausschnitt des Massnahmenplans 2014 der Energiestadt Baar. Das Energiemanagement beinhaltet die Bestandsaufnahme und Betriebsoptimierung aller gemeindeeigenen Gebäude.



Massnahmenplan
2014

2	KOMMUNALE GEBÄUDE, ANLAGEN		
2.1	Energie- und Wassermanagement		
2.1.1	Bestandsaufnahme, Analyse		
	Die Energiebuchhaltung wird in der bewährten Form weitergeführt.	L/S S. Speri / Hauswarte	Wie bisher
2.1.2	Controlling, Betriebsoptimierung		
	- Zusammenstellung und Auswertung der Energiebuchhaltung aller wesentlichen gemeindeeigenen Bauten erstellen. - Zusätzlich werden fehlende Energiekennzahlen von Gebäuden erfasst und Vergleiche innerhalb von Gebäudegruppen (z.B. Schulhäuser) erstellt und ausgewertet.	L/S S. Speri	Wie bisher

Abbildung 33: Energiestadt Baar Ausschnitt aus Massnahmenplan 2014 [24].

- b. Wie bewerten Sie die Fähigkeit aktuell gebauter Gebäude, den geplanten Energiebedarf zu erzielen und über den Lebenszyklus Ihrer Anlagentechnik zu gewährleisten?
- Aus technischer Sicht ist die Erreichung des geplanten Energiebedarfs kein Problem, aber in der Praxis, teilweise aufgrund des Nutzerverhaltens, nicht gewährleistet.
 - Eine bessere Planbarkeit des Energiebedarfs und der Optimierung der Betriebsenergie ist durch flächendeckendes Monitoring anzustreben.
 - Die betrieblichen Anforderungen müssen im Planungsprozess Gehör finden (z.B. Zugänglichkeit für Kontrollen und Reparatur von RWA, Brandschutzklappen...).
 - Ist der Eigentümer auch gleichzeitig der Betreiber, können betriebliche Anforderungen einfacher im Planungsprozess implementiert und während der Betriebsphase kontrolliert werden.
- c. Wie schätzen Sie Ihren Einfluss als Planer ein, den thermischen Komfort sicherzustellen und die gewünschte Energiebilanz zu erreichen? Wo sehen Sie mögliche Stellschrauben?
- Nur durch eine optimierte, interdisziplinäre Zusammenarbeit (Planer, Ersteller und Betreiber) kann die gewünschte Energiebilanz erreicht werden. Durch eine Nutzervereinbarung, die z.B. Raum- oder Zonenweise definiert ist, können Zielkonflikte minimiert werden (Standard- oder Erfahrungswerte bzw. Bandbreiten von Kennwerten zu kommunizieren ist zielführender als absolute Zahlen mit zwei Kommastellen.).
 - Durch den Einsatz von modularen, standardisierten Bauteilen (Beispiel Sanierung Deutsche Bank Frankfurt/D) ist die Austauschbarkeit von Bauteilen über den Lebenszyklus von Gebäuden gewährleistet.
 - Durch die Trennung von Trag- und Installationsstruktur, siehe z.B. Abbildung 34, MFH Kirchrainweg, Kriens [25], [26], bleibt deren Anpassungsfähigkeit während der Nutzungsphase gewährleistet.
 - Die räumliche Flexibilität im Betrieb ist ein wichtiges Planungskriterium. Dabei geht es nicht um eine vollumfängliche Nutzungsflexibilität. Diese wäre nur mit grossem finanziellen Aufwand zu erreichen. Vielmehr geht es um die Definition einer den betrieblichen Anforderungen gerechten und dem Gebäudetyp angemessenen Flexibilität.



Abbildung 34: Mehrfamilienhaus Kirchrainweg, Kriens/CH [25], [26].

- d. Benötigen Sie als Experte zusätzliche Werkzeuge oder Informationen um sicherzustellen, dass die gewünschte Energiebilanz über den Lebenszyklus eines Gebäudes gewährleistet werden kann? Wen wünschen Sie sich dafür als Ansprechpartner?
- Es sind keine zusätzlichen technischen Werkzeuge erforderlich. Fundiertes Grundlagenwissen, Erfahrung und thermische Simulationen reichen aus um die Energiebilanz zu gewährleisten.
 - Nutzerakzeptanz ist relevant, z.B. durch die Möglichkeit der Einflussnahme (Steuerung), durch partizipative Verfahren und räumliche Qualitäten, siehe Abbildung 35 (links) - Beispiel Roche Tower Rotkreuz [27], ist der Nutzer viel eher bereit, gebäudetechnische Schwächen zu akzeptieren.
 - Die Integration von betrieblichen Anforderungen in den Planungsprozess, siehe Abbildung 35 (rechts) - Beispiel Stöckacker Bern [28], muss in den Fokus der Planung gerückt werden.
 - Die Abbildung der gegenwärtigen Energiebilanz, z.B. ein Dashboard als eine Art Live-Monitoring, wäre ein wünschenswertes Werkzeug, um einerseits Interesse zu wecken und andererseits, um mögliche Mängel wie z.B. hohen Energieverbrauch, schlechte Luftqualität etc. aufzudecken.



Abbildung 35: Links - Administrationsgebäude Roche Tower Rotkreuz [27], Rechts - Wohnsiedlung Stöckacker Bern [28].



10.2 Einführung von Bürotypen

Die Definition repräsentativer Gebäudekonzepte bildet die Grundlage für die Robustheitsbewertung. Die Konzeptentwicklung beinhaltet eine Literaturrecherche zur Evaluation statistisch relevanter Daten.

10.2.1 Büroflächen im Bestand

Büro- und Geschäftsflächen (Bürogebäude, Handels- und Warenhäuser sowie Hotels und Gaststätten) haben einen Anteil von 7% am Gesamtvolumen des Gebäudebestands der Schweiz [29], siehe Abbildung 36. Das entspricht einer Bruttogeschossfläche von ca. 52'137'600 m², bei einer Leerstandsquote von 1.5% - 3.3% in den Schweizer Grossstädten [29], siehe Abbildung 37.

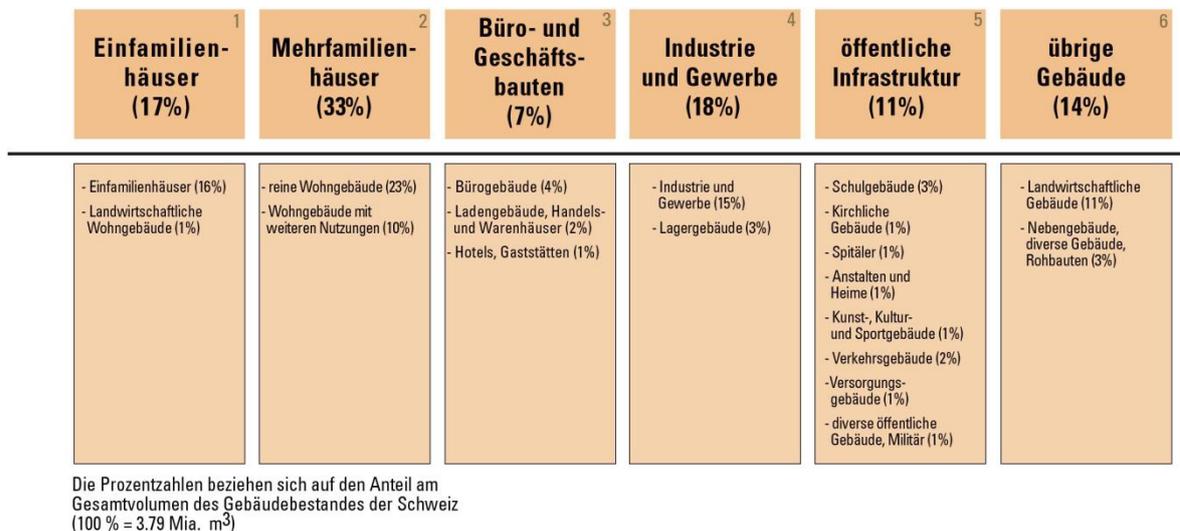


Abbildung 36: Gebäudenutzungen in der Schweiz nach [29].

	Bestand (m ² BGF, 2011)	Baugesuche (Mio. CHF, 3. Q. 2013)	Leerstandsquote (2013)	Angebotsziffer (3. Q. 2013)	Angebotsmiete (Median, 3. Q. 2013)	Spitzenmiete (3. Q. 2013)	Spitzenrendite (3. Q. 2013)
Zürich	9'205'800 ↗	94.9 ↘	2.7% ↗	6.4% →	340 ↗	950 →	2.7% ↘
Bern	2'070'300 ↗	262.0 ↗	1.5% ↗	2.9% ↘	230 →	400 ↘	3.3% ↘
Basel	4'322'300 ↗	66.9 ↘	2.2% ↘	2.2% →	240 →	380 ↘	3.6% ↘
Lausanne	2'100'200 →	17.3 ↘	2.0% ↗	3.5% ↘	290 →	480 ↘	3.4% ↘
Genf	3'389'600 ↗	15.4 ↘	3.3% ↗	14.1% ↗	500 ↘	950 ↘	3.0% ↘
Schweiz	52'137'600 ↗	1'925.5 ↘	—	6.5% →	200 →	—	—

Pfeile: Veränderung zur Vorjahresperiode.

Abbildung 37: Büroflächen im Bestand nach [29].

10.2.2 Büroraumkonzepte

Bürokonzepte gliedern sich nach der Form der Zusammenarbeit. Dabei hat Gebäudetiefe einen massgeblichen Einfluss, siehe Abbildung 38. Bürogebäude mit einem zentralen Korridor und Zellenbüros weisen typischerweise eine Gebäudetiefe von ca. 12m - 13m auf.

Dabei kann zwischen standardisierten und traditionellen Zellenbüros unterschieden werden. Bürogebäude mit einem zentralen Korridor, der als multifunktionale Mittelzone genutzt wird, weisen typischerweise eine Gebäudetiefe von ca. 14 m - 15 m auf und beinhalten Kombibüros, die mit transparenten Wänden zur multifunktionalen Mittelzonen ausgestattet sind. Ähnliche Gebäudetiefen weisen Bürogebäude mit einem zentralen Korridor auf, der als Business Center Lounge (Kombination von Einzel- und Teamarbeitsplätzen mit Verzicht auf feste Arbeitsplätze) genutzt wird.

Bürogebäude mit einer zentralen Erschliessung, einer Mindestgrösse von 400 m² und mehr als 25 Arbeitsplätzen pro Geschoss, können als Grossraumbüros bezeichnet werden. Gruppenbüros beinhalten Kleingruppen- und/ oder Grossgruppenbüros mit 5-25 Arbeitsplätzen.

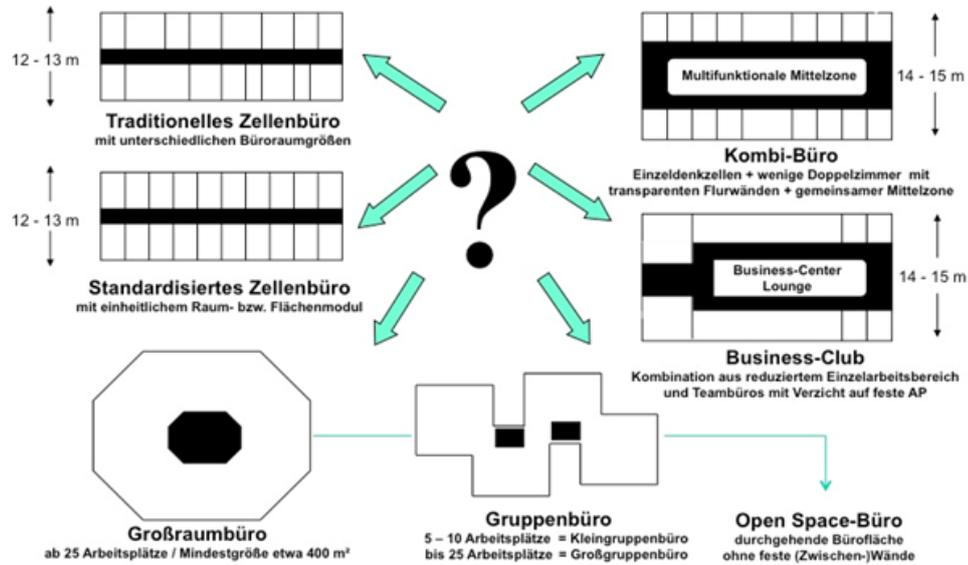


Abbildung 38: Darstellung von Bürokonzepten mit unterschiedlichen Formen der Zusammenarbeit nach [31].

Die Grösse und Belegungsdichte von Büroräumen richtet sich nach der Raumkonzept. 62% der in [32] untersuchten Objekte sind mit Grossraumbüros (>6 AP) ausgestattet, während in 20% Einzelbüros zu finden sind, siehe Abbildung 39, links. 95 % der Büros weisen eine Belegungsdichte von 10-25 m² pro Person auf, siehe Abbildung 39, rechts.

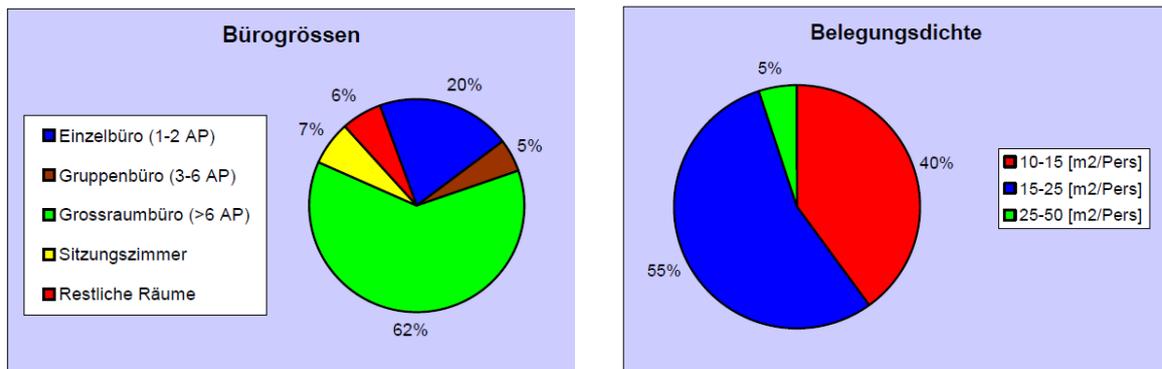


Abbildung 39: Bürogrössen und Belegungsdichten in Bürogebäuden (20 untersuchte Objekte und Anlagen in Zürich) nach [32].

10.2.3 Bauteiltypen

Die nachfolgende Kategorisierung der vorkommenden Zuordnung von Fassaden, Böden und Decken basiert auf qualitativen Daten aus der Literatur und Expertenwissen. Ziel ist die Ableitung von verschiedenen charakteristischen Gebäudekonzepten. Dabei lag der Fokus sowohl auf der thermischen Speicherfähigkeit als auch auf dem Fensterflächenanteil. Tabelle 25 zeigt eine Zuordnung der identifizierten Fassaden, Böden und Decken zu Gebäudetypen 1 bis 3.1.



Typ	Fassadenbeschrieb	Verglasungsanteil	Bodentyp	Deckentyp
1	Lochfassade	ca. 30%-50%	Beton roh/ gestrichen	Beton roh/ gestrichen
2	Bandfassade (Beton-Fertigteil Fassade oder Elementfassade)	ca. 40%-60%	Beton mit Unterlagsboden (z.B. mit Fussbodenheizung)	Beton mit abgehängter Decke (vollflächig am Rand abgeschlossen z.B. Gipskarton-platten, Metallpaneele)
3	Skelettfassade (Pfosten-Riegel Fassade oder mehrschalige Fassade)	ca. 60%-90%	Beton mit aufgeständertem Doppelboden	Beton mit abgehängter Decke (teilflächig am Rand offen z.B. Akustikpaneele)
3.1	Ganzglasfassade	ca. 90%-100%	s.o.	s.o.

Tabelle 25: Zuordnung von Bauteiltypen zu Gebäudetypen.

Auf der Basis von Tabelle 25 wurde die Bürogebäude für die weitere Untersuchung der Kühlszenarien ausgewählt.

10.3 Zusätzliche Beschreibung der Kühlszenarien

10.3.1 Umlufkühlung

Im Dimensionierungsfall ist der maximale Wert des Luftvolumenstroms für jeden Raum eingestellt. Dieser Wert wird nach einem iterativen Simulationsverfahren bestimmt. Für die Dimensionierung wird so vorgegangen, dass alle Räume mit einem aktiven Kälteabgabesystem im Referenzfall (DRY Wetterdatensatz, siehe Absatz 5.4.2) jeweils 100 Überhitzungsstunden pro Jahr aufweisen. Das iterative Verfahren ist in der Abbildung 40 dargestellt.

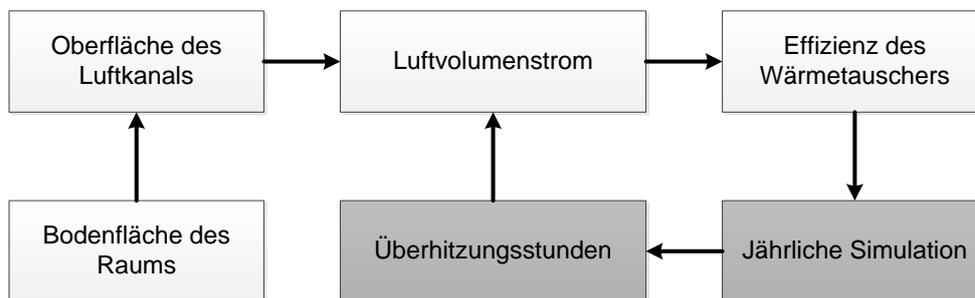


Abbildung 40: Schema der Dimensionierung der Lüftungsanlage mit Kühlung.

Die Leistung des Wärmetauschers von der Umlufkühlung berechnet sich mit folgender Gleichung:

$$Q_{W-T} = \rho \cdot u_L \cdot c \cdot F_K \cdot (t_e - t_a) \quad (4)$$

u_L – Luftgeschwindigkeit m/s

t_e – Lufteintrittstemperatur °C

t_a – Luftaustrittstemperatur °C

ρ – Dichte der Luft kg/m³

F_K – Querschnittsfläche des Luftkanals m²

c_L – spezifische Wärmekapazität der Luft J/(kg·K).

Die Wassergeschwindigkeit wird in allen Fällen konstant gehalten. Für die Dimensionierung wird das Produkt aus Luftgeschwindigkeit und Querschnittsfläche variiert (Variationsparameter).

Für den trockenen Luftkühler empfiehlt sich die Einführung der Betriebscharakteristik Φ (auch Abkühlzahl genannt) für eine konstante Wassergeschwindigkeit:

$$\Phi = \frac{t_e - t_a}{t_e - t_w} = f(u_L, F_T) \quad (5)$$

F_T – Oberfläche des Wärmetauschers

Für jede Luftkühlerbauart (Rippenart) lässt sich daraus ein Diagramm wie in **Abbildung 41** gezeigt erstellen.

Für diese Studie wurde ein Wärmetauscher mit sechs Rohrreihen gewählt. Als Gleichung, die die Funktion $\Phi = f(u_L)$ beschreibt, ergibt sich:

$$\Phi = 0.0003 \cdot u_L^3 + 0.0041 \cdot u_L^2 - 0.1099 \cdot u_L + 1.0002, R^2 = 0.9999. \quad (6)$$

Aus Gleichung (5) lässt sich ableiten:

$$t_e - t_a = \Phi \cdot (t_e - t_w) \tag{7}$$

Das Zusammenfassen der Gleichungen (4) und (7) ergibt folgenden Ausdruck:

$$Q = \rho \cdot u_L \cdot c \cdot F_K \cdot (t_e - t_a) = \rho \cdot u_L \cdot c \cdot F_K \cdot \Phi \cdot (t_e - t_w) \tag{8}$$

In Abbildung 41 erkennt man zwei Dimensionen über die Oberfläche des Wärmetauschers. Die dritte Dimension ist abhängig von der Querschnittsfläche des Luftkanals. Hierfür ist es sinnvoll die Oberfläche des Luftkanals in Abhängigkeit von der Bodenfläche des Raums zu verwenden.

Für die Gesamtenergiebilanz ist es wichtig, die Hilfsenergie der Ventilatoren und der Umwälzpumpen ebenfalls zu betrachten. Die aktive Luftkühlung besteht aus einem Ventilator auf der Primärseite des Wärmetauschers und einer Wasserpumpe auf der Sekundärseite. Die Druckverluste wurden nach Abbildung 41 definiert.

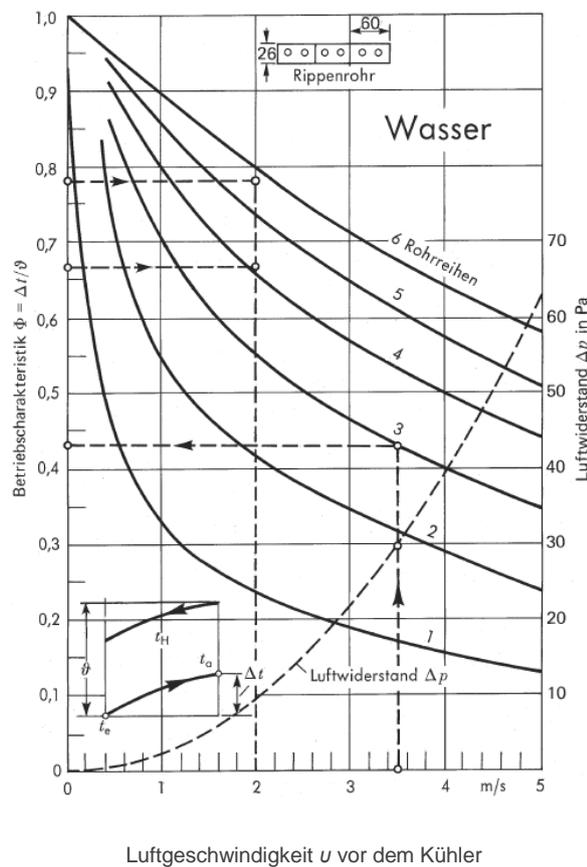


Abbildung 41: Diagramm eines Luftkühlers bei Kühlwasserbetrieb (Kreuzstrom) [15].

10.3.2 Kühldecke

Konstruktionsbeispiele von geschlossener und offener Kühldecke sind in der Abbildung 43 und Abbildung 44 angezeigt. Der maximale Wert des Wassermassenstroms wurde mittels iterativen Simulationen bestimmt (Abbildung 42).

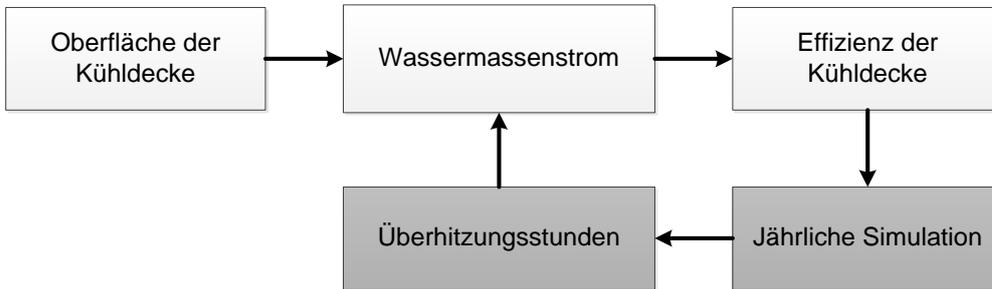
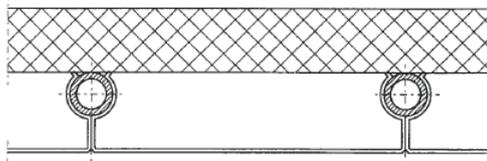
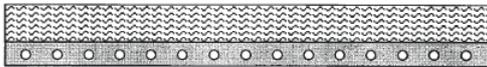


Abbildung 42: Schema der Dimensionierung der Kühldecke.

Kassetten bzw. Langfeldplatten mit Stahlrohren (Klemmverbindung) [Form A]



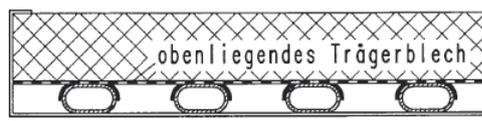
Kunststoff-Kapillarrohrmatten im Kunststoffputz auf einem Putzträger [Form B]



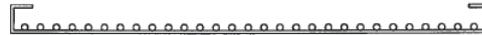
Strangpreßprofile mit angeformten Kanälen und eingepreßten Kupferrohren [Form D]



Kassetten mit Kupferrohrmäandern lose eingelegt bzw. auf einem oben- oder untenliegenden Trägerblech arretiert



Kassetten bzw. Langfeldplatten mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten [Form C]



Kassetten mit Alu-Wärmeleitprofilen und eingepreßten Kupferrohren (Profile teilweise mit eigenem Tragsystem)

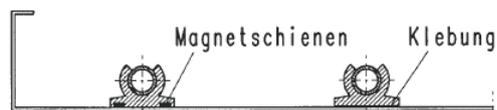
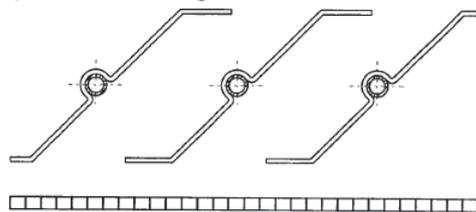


Abbildung 43: Konstruktionsformen der geschlossenen Kühldecke [15].

Schräglamellen an Kupferrohren (Klemmverbindung) und Rasterdecke



Perforiertes, gefaltetes Aluminiumblech evtl. als freihängendes Kühlsegel [Form F] mit Kunststoff-Kapillarrohrmatten



Strangpreßprofile mit angeformten Kanälen und eingepreßten Kupferrohren [Form E]



Kassetten bzw. Langfeldplatten mit freien Luftdurchtritten, z. B. zwischenliegende Schlitze Kühlsystem in den Kassetten siehe Bild 3.2.3-7, rechte Bildhälfte

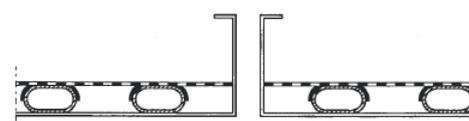


Abbildung 44: Konstruktionsformen der offenen Kühldecke [15].

Die Leistungskurven der Kühldecke in Abhängigkeit von den Konstruktionsformen sind in der dargestellt.

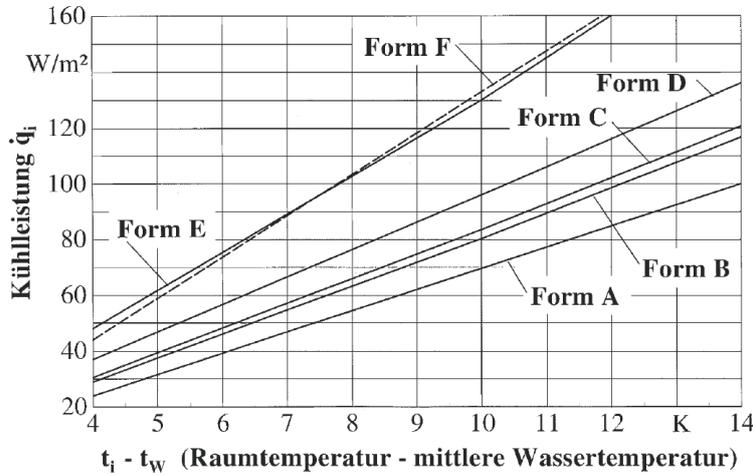


Abbildung 45: Leistungsdiagramm für ausgewählte geschlossene und offene Kühldecken [15].

10.3.3 Betonkernaktivierung (TABS)

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten die Dimensionierung von TABS-Systemen vorzunehmen:

- die Dimensionierung der Systemleistung
- die Dimensionierung mittels der Regelung

Die Leistung (die Wärmeflüsse aus beiden Seiten des Boden respektive der Decke) der Betonkernaktivierung wird nach [42] berechnet (Teppichboden 0.015 m, 0.1 m²·K/W, Abbildung 46).

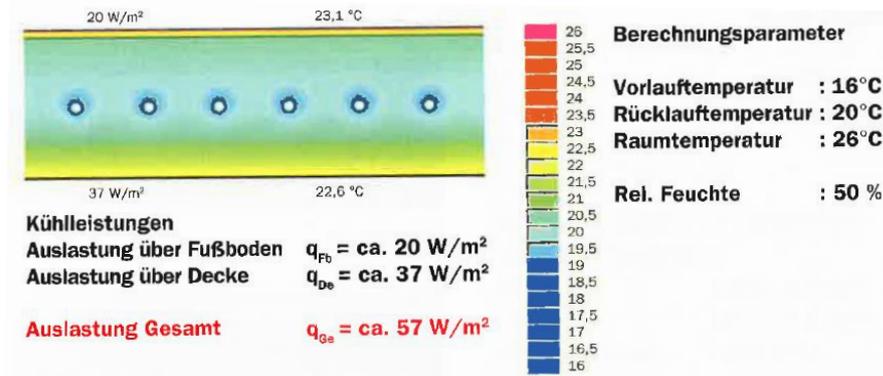


Abbildung 46: Berechnung der Kühlleistung für Betonkernaktivierung [42]

Gemäss [43] wird das TABS über die Einschaltdauer geregelt, so dass es im Maximalfall höchstens von 22:00 bis 8:00 eingeschaltet ist. Für die Dimensionierung wird diese Zeitdauer variiert (Abbildung 47).

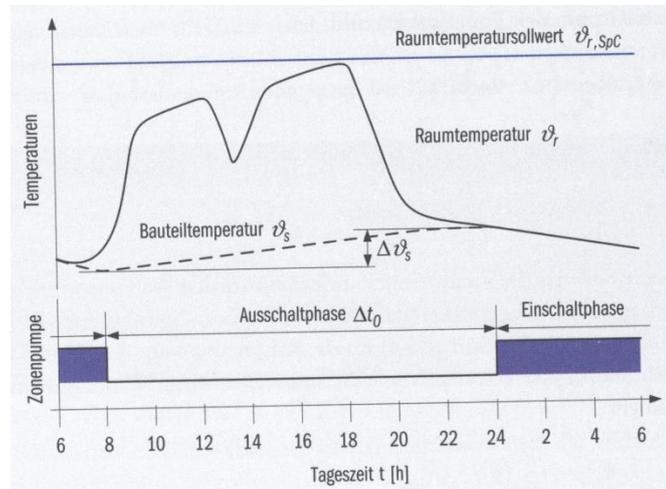


Abbildung 47: Regelung der Betonkernaktivierung nach [43].

Die Druckverluste in den Rohrleitungen der Kühldecke und der Betonkernaktivierung wurden als ca. 100 Pa/m^2 bestimmt. Dieser Wert entspricht den Ergebnissen der Studie [42] (Abbildung 48), wo die Länge des Rohrs pro m^2 der Bodenoberfläche für die einfache Berechnung gleich 4 m/m^2 angegeben wird.

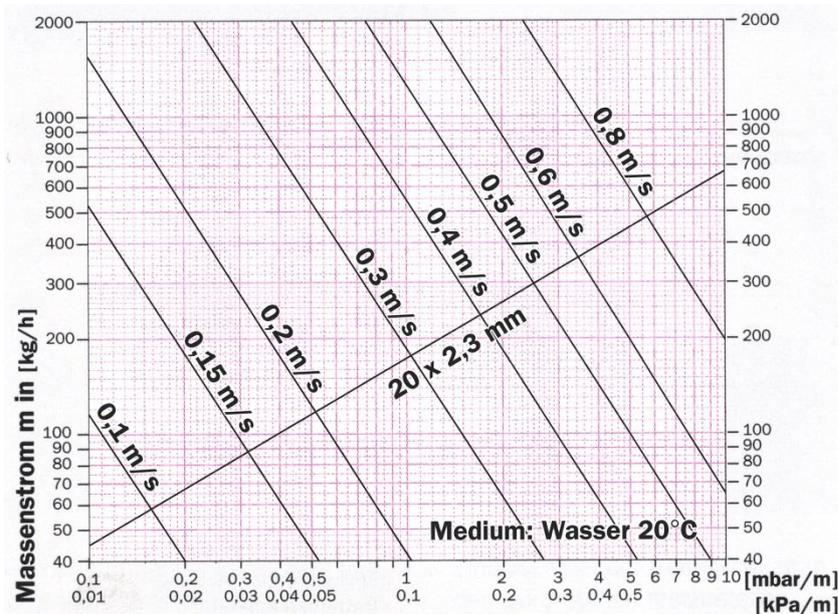


Abbildung 48: Druckverlust in den Rohren des Bodenregisters [42].

Der Wassermassenstrom wird rückwärts aus der abgegebenen Leistung berechnet. Die Einschaltdauer des Systems (Betriebszeit während Nacht) wird nach einem iterativen Verfahren bestimmt (Abbildung 49) und danach konstant bleibt. Keine zusätzliche Regelung (abhängig von Aussentemperatur) wurde definiert.

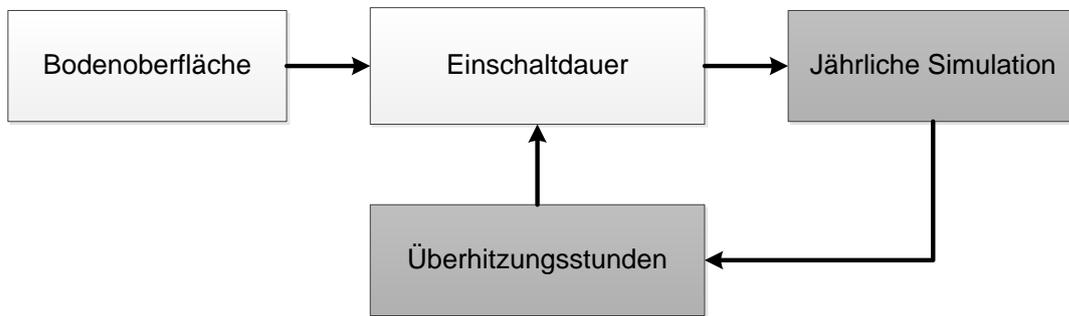


Abbildung 49: Schema der Dimensionierung der Betonkernaktivierung.



10.4 Simulationsergebnisse - Hilfsenergie

10.4.1 Dimensionierungsfall

(1) Altbau

Kühlszenarien	Pumpen Kälteanlage [Wh/m ²]	Ventilatoren Lüftungsanlage [Wh/m ²]	Ventilatoren Kälteanlage [Wh/m ²]	Total [Wh/m ²]
S1 mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	-	400	-	400
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	1.6	-	30	31.6
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	2.5	-	40	42.5
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	5.5	-	-	5.5
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	11.2	-	-	11.2

Tabelle 26: Jährliche Hilfsenergie für den Altbau je nach Kühlszenario



(2) Referenzgebäude

Kühlszenarien	Pumpen Kälteanlage [Wh/m ²]	Ventilatoren Lüftungsanlage [Wh/m ²]	Ventilatoren Kälteanlage [Wh/m ²]	Total [Wh/m ²]
S1 mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	-	550	-	550
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	2	-	140	142
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	3.3	-	200	203
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	15.5	-	-	16
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	22	-	-	22
S8 TABS, mech. Lüftung	42.7	-	-	43

Tabelle 27: Jährliche Hilfsenergie für das Referenzgebäude je nach Kühlszenario.



(3) Firmenhauptsitz

Kühlszenarien	Pumpen Kälteanlage [Wh/m ²]	Ventilatoren Lüftungsanlage [Wh/m ²]	Ventilatoren Kälteanlage [Wh/m ²]	Total [Wh/m ²]
S1 mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	-	610	-	610
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	5.7	-	450	456
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	6.9	-	600	607
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	35.8	-	-	36
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	88.4	-	-	88
S8 TABS, mech. Lüftung	133	-	-	133

Tabelle 28: Jährliche Hilfsenergie für den Firmenhauptsitz je nach Kühlszenario.



10.4.2 Klimaänderungsszenarien

(1) *Altbau*

	Hilfsenergie, [Wh/m ²]		
	Referenzperiode	A1B lower	A2 upper
S1 mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	300	370	530
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	34	43	61
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	41	53	70
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	7	10	15
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	10	14	19

Tabelle 29: Jährliche Hilfsenergie der Kühlszenarien des Altbaus.

(2) *Referenzgebäude*

	Hilfsenergie, [Wh/m ²]		
	Referenzperiode	A1B lower	A2 upper
S1 mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	210	230	390
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	174	205	256
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	236	277	339
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	30	35	43
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	43	50	58
S8 TABS, mech. Lüftung	70	70	70

Tabelle 30: Die Hilfsenergie der Kühlszenarien des Referenzgebäudes.



(3) Firmen Hauptsitz

	Hilfsenergie, [Wh/m ²]		
	Referenzperiode	A1B lower	A2 upper
S1 mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	580	620	690
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	541	602	703
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	474	515	606
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	67	74	86
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	81	86	98
S8 TABS, mech. Lüftung	172	172	172

Tabelle 31: Hilfsenergie des Firmen Hauptsitzes.



10.4.3 Nutzervervariabilität

	Referenzperiode		A1B lower		A2 upper	
	Unteres Nutzerprofil [Wh/m ²]	Differenz zwischen Profilen [Wh/m ²]	Unteres Nutzerprofil [Wh/m ²]	Differenz zwischen Profilen [Wh/m ²]	Unteres Nutzerprofil [Wh/m ²]	Differenz zwischen Profilen [Wh/m ²]
S1 mech. Lüftung mit Nachtbetrieb, ohne Kühlung	192	40	214	40	266	40
S4 Umluftkühlung, mech. Lüftung	97	117	119	123	156	124
S5 Umluftkühlung, nat. Lüftung	182	193	214	203	261	203
S6 Kühldecke, mech. Lüftung	18	24	21	24	29	26
S7 Kühldecke, nat. Lüftung	33	39	38	40	48	44
S8 TABS, mech. Lüftung	70	-	70	-	70	-

Tabelle 32: Hilfsenergie der Kühlszenarien bezüglich Nutzer- und Klimavariabilität für das Referenzgebäude.