



# Nachtauskühlung über Lüftungsöffnungen in der Fassade – Wirksamkeitsanalyse

Schlussbericht

## **IMPRESSUM**

### **Auftraggeberin:**

Stadt Zürich  
Amt für Hochbauten  
Fachstelle Nachhaltiges Bauen  
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21  
8021 Zürich

### **Auftragnehmer:**

Hochschule Luzern – Technik & Architektur  
Institut für Gebäudetechnik und Energie  
Technikumstrasse 21  
6048 Horw

### **Projektleitung:**

Gianrico Settembrini  
Hochschule Luzern – Technik & Architektur

### **Projektteam:**

Andrii Zakovorotnyi (Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw)  
Markus Koschenz (Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw)

### **Verteiler:**

Thomas Kessler, Amt für Hochbauten AHB

### **Version/Datum:**

Version 1, Datum 15.12.2020

### **SAP-Nr.**

1122341-00

### **Dateiname:**

d\_20210315\_schlussbericht\_wirksamkeit\_nachtauskühlung\_ahb\_rev.docx

Download als pdf von  
[www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen](http://www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen)

Zürich, Januar 2021

# Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung .....	5
2	Ausgangslage und Zielsetzung .....	6
2.1	Ausgangslage .....	6
2.2	Zielsetzung .....	6
3	Literaturrecherche .....	7
4	Simulationsgrundlagen .....	11
4.1	Untersuchte Raumtypen .....	11
4.2	Untersuchte Lüftungsöffnungen .....	11
4.3	Untersuchte Strategien der Bedienung der Lüftungsöffnungen .....	12
4.4	Klimadaten .....	13
4.5	Simulationsperiode .....	13
4.6	Gebäudehülle, Baukonstruktionen und Wärmespeicherfähigkeit .....	13
4.6.1	Aussenwand opak (ohne Lüftungsöffnungen) .....	14
4.6.2	Zwischendecke (Boden) .....	14
4.6.3	Innenwände .....	15
4.6.4	Fenster .....	15
4.6.5	Wärmebrücken .....	15
4.6.6	Sonnenschutz und Verschattung .....	16
4.7	Systeme und Nutzungen .....	16
4.7.1	Heizung .....	16
4.7.2	Kühlung .....	16
4.7.3	Lüftungsanlage .....	16
4.7.4	Personen .....	16
4.8	Geräte .....	17
4.9	Beleuchtung .....	17
4.10	Natürliche Lüftung .....	17
4.11	Natürliche Infiltration .....	17
5	Volumenstrom durch Lüftungsöffnungen .....	18
6	Ergebnisse der thermischen Simulationen .....	21
6.1	Simulationsmodelle und Simulationssoftware .....	21
6.2	Auswertung der Simulationsergebnisse .....	21
6.3	Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Schulzimmer» .....	22
6.4	Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Gruppenbüro» .....	22
6.5	Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Sitzungszimmer» .....	23
6.6	Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Mehrzwecksaal» .....	24
6.7	Sensitivität zur Bedienungsstrategie .....	25
7	Erkenntnisse .....	30
8	Empfehlungen .....	32
9	Literaturverzeichnis .....	33
10	Anhang .....	34
10.1	Architektonische Skizzen der Lüftungsöffnungen mit dem Hinweis auf die «Belüftungskategorie» .....	34
10.1.1	Raumtyp «Schulzimmer» .....	34
10.1.2	Raumtyp «Gruppenbüro» .....	35
10.1.3	Raumtyp «Sitzungszimmer» .....	36
10.1.4	Raumtyp «Mehrzwecksaal» .....	37
10.2	Auswertung nach SIA 180:2014 .....	38
10.2.1	Raumtyp «Schulzimmer» .....	38
10.2.2	Raumtyp «Gruppenbüro» .....	41

10.2.3	Raumtyp «Sitzungszimmer» .....	44
10.2.4	Raumtyp «Mehrzwecksaal» .....	47
10.3	Täglichen Schwankung der Aussentemperatur und Schwankung der Raumtemperatur ..... während der Belegungszeit .....	50
10.3.1	Raumtyp «Schulzimmer» .....	50
10.3.2	Raumtyp «Gruppenbüro» .....	53
10.3.3	Raumtyp «Sitzungszimmer» .....	56
10.3.4	Raumtyp «Mehrzwecksaal» .....	59

# 1 Zusammenfassung

Natürliche Nachtauskühlung ist eines der wirksamsten Mittel, um den sommerlichen Wärmeschutz in Gebäuden zu gewährleisten. Am einfachsten geschieht dies durch manuelles Öffnen der Fenster. In Wohnbauten ist das in der Regel möglich. Bei Gebäuden, die nachts unbeaufsichtigt sind, können normale Fenster meist nicht gefahrlos über Nacht offenstehen. Um trotzdem eine natürliche Nachtauskühlung zu ermöglichen, ist entweder eine aufwändige Automatisierung der Fenster erforderlich oder es werden separate Lüftungsöffnungen eingesetzt.

Mit dem Projekt wurde die natürliche Nachtauskühlung über Lüftungsöffnungen in der Fassade vertieft untersucht und ihre Wirksamkeit anhand von Simulationen typischer Konfigurationen überprüft. Ziel ist, solche Lüftungsöffnungen als einfache Bauelemente (vergleichbar mit Fenstern) einzusetzen, um den sommerlichen Wärmeschutz in einem Grossteil der Fälle, trotz wärmer werdendem Klima, ohne aktive Kühlung zu gewährleisten.

Im Projekt wurden Räume mit typischen Abmessungen für die Nutzungen «**Schulzimmer**», «**Gruppenbüro**», «**Sitzungszimmer**» und «**Mehrzwecksaal**» untersucht, welche nur über eine Fassade und ohne Überströmung in andere Räume ausgekühlt werden.

Zusätzlich wurden verschiedene **Anordnungen und Dimensionen der Lüftungsöffnungen** (klein, mittel und gross), manuelle und automatisierte **Betätigungen der Lüftungsöffnungen** sowie diverse Klimadaten untersucht – **Designreferenzjahr für den Standort Zürich** und **projizierte Wetterdaten für den Standort Basel** gemäss den Klimaszenarien CH2011 für die Periode von 2045 bis 2074.

Für die Bestimmung der Wirksamkeit der Nachtauskühlung wurden mehrere thermische Gebäudesimulationen für das Sommerhalbjahr (Zeitraum zwischen dem 16. April und dem 15. Oktober) durchgeführt und ausgewertet. Die thermische Behaglichkeit im Raum wurde anhand der Figur 3 der SIA 180:2014 bewertet.

Die Beurteilung der empfundenen Raumtemperatur hat gezeigt, dass die thermische Behaglichkeit mit dem heutigen Klima (Designreferenzjahr) für alle untersuchten Raumtypen auch mit kleinen Lüftungsöffnungen erreicht werden kann. Die Simulationen für die Zukunftsperiode (2045-2074) haben hingegen gezeigt, dass die Raumtypen «**Schulzimmer**», «**Gruppenbüro**», «**Sitzungszimmer**» nur mit grossen und mittleren Lüftungsöffnungen in der Nacht im Sommer genügend abgekühlt werden können. Die Behaglichkeit im «**Mehrzwecksaal**» kann im Fall eines zukünftigen Extremjahres auch mit grossen Lüftungsöffnungen mit Nachtauskühlung nicht mehr gewährleistet werden.

## 2 Ausgangslage und Zielsetzung

### 2.1 Ausgangslage

Die natürliche Nachtauskühlung ist eines der wirksamsten Mittel, um den sommerlichen Wärmeschutz in Gebäuden zu gewährleisten. Am einfachsten geschieht dies durch manuelles Öffnen der Fenster. In Wohnbauten ist das in der Regel möglich. Bei Gebäuden, die während der Nacht unbeaufsichtigt sind, können normale Fenster meist nicht gefahrlos offenstehen. Das Amt für Hochbauten, Stadt Zürich, interessiert sich für neue architektonische Konzepte, welche die natürliche Nachtauskühlung trotzdem ermöglichen.

### 2.2 Zielsetzung

Mit dem Projekt soll die natürliche Nachtauskühlung über Lüftungsöffnungen in der Fassade vertieft untersucht und ihre Wirksamkeit anhand von Simulationen typischer Konfigurationen überprüft werden. Ziel ist, solche Lüftungsöffnungen als einfache Bauelemente (vergleichbar mit Fenster) einzusetzen, um den sommerlichen Wärmeschutz in einem Grossteil der Fälle – trotz wärmer werdendem Klima – ohne aktive Kühlung zu gewährleisten. Die Lüftungsöffnungen sollen nicht nur die ausreichende Nachtauskühlung im Sommer gewährleisten, sondern auch folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Witterungsschutz (Regen, Hagel, Sturm)
- Insektenschutz
- Einbruch- und Vandalensicherheit
- Absturzsicherung

### 3 Literaturrecherche

Bei der Nachtauskühlung (in Österreich auch Nachtspülung) wird in den Sommermonaten der Baukörper durch die kühle Nachtluft abgekühlt, um am Folgetag ein angenehmes, erträgliches Raumklima zu erreichen. Ziel dabei ist, in der Nacht den täglichen Wärmeeintrag in das Gebäude wieder zu kompensieren.

Es wird zwischen aktiver und passiver Nachtauskühlung unterschieden [1]. Bei der aktiven Nachtauskühlung erfolgt der Kältetransport mit mechanischer Unterstützung (z.B. durch den Einsatz von Lüftungsanlagen mit Ventilatoren), bei der passiven Nachtauskühlung durch eine freie Strömung beziehungsweise Lüftung.

Bei der freien Lüftung erfolgt die Förderung der Luft ausschliesslich durch natürliche Druckunterschiede infolge von Temperaturdifferenzen und/oder von Wind [2]. Grundsätzlich entstehen folgende Fälle der freien Lüftung:

- *Querlüftung* infolge von *Winddruck* auf den verschiedenen Gebäudeausserflächen. In diesem Fall befinden sich die effektiven Zuluft- und Abluftöffnungen auf gegenüberliegenden Gebäudeausserflächen
- *Kamineffekt*. In der Regel ist der statische Druck in einem Gebäudeabluftkanal im Vergleich zum Umgebungsdruck tiefer, was zur Einströmung der Aussenluft in den Raum führt
- *Fensterlüftung* infolge der *Temperaturdifferenz* zwischen einem Raum und der Umgebung.

In diesem Projekt wird die freie Lüftung infolge der Temperaturdifferenz zwischen einem Raum und der Umgebung untersucht. Deshalb werden die diesbezüglichen beeinflussenden Faktoren genauer angeschaut.

Je grösser der Luftvolumenstrom durch die Lüftungsöffnung ist, desto effizienter ist die Nachtauskühlung. Der bidirektionale Luftvolumenstrom  $Q$  durch die offenen Fenster kann gemäss der folgenden empirischen Gleichung bestimmt werden [3]:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot C_d \cdot a \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad (1)$$

In der Gleichung (1) ist  $g$  die Erdbeschleunigung,  $a$  – die Öffnungsfläche [m<sup>2</sup>],  $h$  – die Höhe der Öffnung [m],  $T_i$  – Innenlufttemperatur [°C],  $T_o$  – Aussenlufttemperatur [°C],  $C_d$  – Durchflusskoeffizient [].

In der Studie [4] wurden die physikalischen Grundlagen zur Fensterlüftung anhand von Strömungssimulationen sowie Messexperimenten detailliert erarbeitet. Dabei wurden die Durchflusskoeffizienten für verschiedene Fenstertypologien ermittelt. Anhand der Ergebnisse ist der effektive Luftvolumenstrom bei der gegebenen Temperaturdifferenz zwischen einem Raum und der Umgebung von folgenden Parametern der Lüftungsöffnung abhängig:

- *Vertikale Position* der Lüftungsöffnung in der Gebäudeausserfläche. Wegen der Temperaturschichtung im Raum wird die Nachtauskühlung effizienter sein, wenn die Lüftungsöffnung oben angeordnet ist
- *Gesamtfläche* der Lüftungsöffnung. Mit grossen Öffnungsflächen wird ein grosser Luftvolumenstrom erreicht
- *Verhältnis* zwischen den vertikalen und horizontalen Abmessungen der Lüftungsöffnung. Wegen der Temperaturschichtung im Raum hat die vertikale Ausprägung der Öffnung einen grösseren Effekt als die horizontale Ausprägung auf den Luftvolumenstrom.

Falls die Gebäudeausserfläche mehrere Lüftungsöffnungen aufweist, sind folgende Aspekte von Bedeutung:

- *Anordnung* und *Abmessung* der Lüftungsöffnungen auf der Aussenwandfläche
- *Form* und *Tiefe* der Lüftungsöffnungen. Schmale und tiefe Lüftungsöffnungen weisen einen erhöhten Druckwiderstand auf, der den Luftvolumenstrom und damit die Effizienz der Nachtauskühlung reduziert.

In der Praxis werden in der Fassade integrierte Lüftungsöffnungen bei Gebäuden oft im tropischen Klima eingesetzt (Abbildung 1, Abbildung 2). Durch die ganzjährig hohen Temperaturen unterscheiden sich die Anforderungen an den U-Wert der Gebäudefassaden im Vergleich zur Schweiz.



Abbildung 1: Fassadeintegrierte Lüftungsöffnungen im Wohngebäude des Masdar Institutes, Vereinigte Arabische Emirate [5]

Gemäss [5] wurde das Wohngebäude des Masdar Institutes so konzipiert, dass die luftdurchlässigen Elemente in der Balkonfassade (Abbildung 1) ein optimales Verhältnis zwischen Verschattung und der Belichtung des Raumes gewährleisten. Das Beispiel zeigt eine Möglichkeit, wie Lüftungsöffnungen als vorgefertigte Elemente in einer Fassade integriert werden können. Die Elemente können dabei verschiedene architektonische Formen aufweisen.

Weitere Beispiele sind ein Wohngebäude in Vietnam [6] (Abbildung 2, links) und ein Schulhaus in Ruanda [7] (Abbildung 2, rechts), wo die Lüftungsöffnungen mit den Dimensionen von 4 x 4 cm bis 10 x 10 cm in der Ziegelmauer noch in der Planungsphase vorgesehen wurden. Die Lüftungsöffnungen bleiben ganzjährig offen.

In der Literatur sind wenige Studien vorhanden, welche konzeptionelle Ansätze für Lüftungsöffnungen in der Gebäudefassade in Europa untersuchen. Eine Studie zeigt die Konzepte eines Kindergartens in Portugal sowie einer Schule in Deutschland auf [8] (Abbildung 3). In diesen Gebäuden wurden Lüftungsgitter unter den Fenstern in die Gebäudefassaden eingebaut. Im Winter strömt die Aussenluft durch das Lüftungsgitter und wird durch den Heizkörper erwärmt. Im Sommer dient das Lüftungsgitter zur Versorgung des Innenraums mit frischer Aussenluft. Weil beide Lüftungskonzepte den Kamineffekt für die Verstärkung der Belüftung nutzen, bleiben die manuell bediente Lüftungsgitter klein.

Einige Konzepte sehen hinterlüftete Fassaden mit Phasenübergangsmaterial (Phase Change Material PCM) vor [9,10]. Solche Fassaden weisen jedoch viel grössere Druckwiderstände auf, was eine mechanische Unterstützung mittels Ventilatoren notwendig macht.

Bewusst verzichtet wurde auf eine Lüftungsanlage im landwirtschaftlichen Zentrum St. Gallen in Salez [11]. Zum Vorbild wurde das Lüftungsprinzip alter Ställe. Für die Querlüftung des Erdgeschosses wurden Lüftungsschächte eingesetzt; die Klassenzimmer haben jeweils zwei Schächte. Bei einer großzügigen Raumhöhe von 4,40 Metern soll auch auf längere Zeit frische Luft in den Räumen erhalten bleiben.

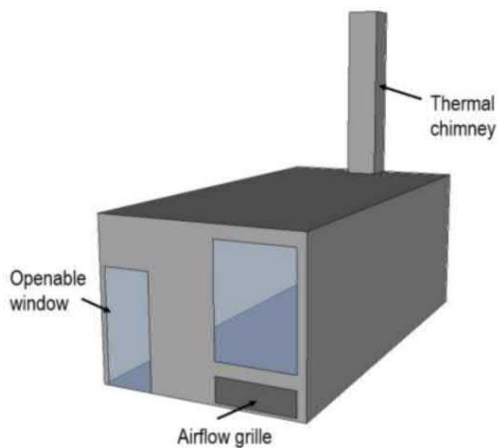




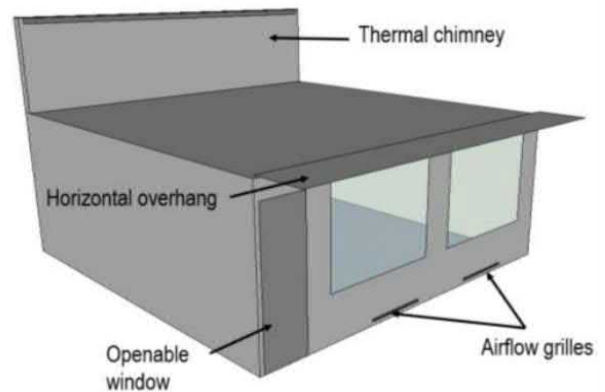
Wohngebäude, Vietnam [6]

Umbuno Primarschule, Ruanda [7]

**Abbildung 2: Verschiedene Beispiele von konstanten Lüftungsöffnungen in der Gebäudefassade**



Kindergarten in Portugal [8]



Schulzimmer in Deutschland [8]

**Abbildung 3: Konzepte für die Nachtauskühlung über Lüftungsöffnungen auf der Gebäudeaussenfläche [8]**

Anhand der Literaturrecherche können folgende Aussagen gemacht werden:

- Fassadenintegrierte Lüftungsöffnungen sind im tropischen Klima vorhanden bzw. üblich. In europäischen Ländern sind sie weniger verbreitet
- Im tropischen Klima sollte die gesamte luftdurchlässige Fläche verhältnismässig gross sein, um einen effizienten Luftaustausch zwischen Innen- und Aussenraum zu gewährleisten. In der Schweiz sollte es möglich sein, die luftdurchlässige Fläche wegen den grösseren täglichen Temperaturschwankungen kleiner zu halten. Dieser Aspekt gilt es, im Projekt genauer zu untersuchen

- Die Dimensionen der einzelnen fassadenintegrierten Lüftungsöffnungen der Beispiele im tropischen Klima variieren zwischen 4x4 cm bis 10x10 cm
- Statt einer Reihe einzelner Lüftungsöffnungen ist es möglich, Lüftungsöffnungen zu konzentrieren. In den recherchierten Beispielen sind häufig Lüftungsgitter unter- und oberhalb der Fenster anzutreffen. Die konzentrierte Anordnung erlaubt eine einfachere Öffnung und Schliessung der Fassadenperforierung, beispielsweise durch einen inneren Lüftungsfügel.
- Die fassadenintegrierten Lüftungsöffnungen können diverse geometrische Formen oder Materialien aufweisen, die einen wesentliche Beitrag zum Ausdruck der Fassade leisten können und in direktem Zusammenhang mit der Architektur des Gebäudes stehen.

## 4 Simulationsgrundlagen

Um eine umfassende Wirksamkeitsanalyse der Nachtauskühlung durchzuführen, wird die Parameterstudie in vier Dimensionen durchgeführt:

- Unterschiedliche Raumtypen
- Unterschiedliche Lüftungsöffnungen
- Unterschiedliche Strategien für die Bedienung der Lüftungsöffnungen
- Unterschiedliche Klimadaten

### 4.1 Untersuchte Raumtypen

Zur Untersuchung der Effizienz der fassadenintegrierten Lüftungsöffnungen werden vier Simulationsmodelle für die folgenden Raumtypen aufgebaut:

- Schulzimmer
- Gruppenbüro
- Sitzungszimmer
- Mehrzwecksaal

Die geometrischen Abmessungen der Simulationsmodelle sind in der Tabelle 1 dargestellt.

	Schulzimmer	Gruppenbüro	Sitzungszimmer	Mehrzwecksaal
Abmessungen	10.0 m (Fassade) x 7.2 m (Tiefe) x 3.0 m (Raumhöhe)	6.0 m (Fassade) x 6.0 m (Tiefe) x 2.8 m (Raumhöhe)	4.0 m (Fassade) x 6.0 m (Tiefe) x 2.8 m (Raumhöhe)	24.0 m (Fassade) x 12.0 m (Tiefe) x 6.0 m (Raumhöhe)
Fensterfläche	50% der Fassadenfläche (ohne Lüftungsöffnungen)			
	15 m <sup>2</sup>	8.4 m <sup>2</sup>	5.6 m <sup>2</sup>	72 m <sup>2</sup>
Ausrichtung	Süd-West			
Positionierung im Gebäude	Mittelgeschoss			

Tabelle 1: Geometrische Eigenschaften der untersuchten Räume

### 4.2 Untersuchte Lüftungsöffnungen

In den vorgeschlagenen Raumtypen soll der Einfluss der unterschiedlichen Öffnungsflächen auf die Wirksamkeit der Nachtauskühlung abgeschätzt werden:

- **Raumhohe Fassadenöffnungen:** gleichmässig über die Raumbreite verteilte Lüftungsöffnungen, deren freier Querschnitt (unter Berücksichtigung des Witterungsschutzes usw.) in der Summe 5% der Raumgrundfläche beträgt
- **Lüftungsöffnungen im Fensterband:** die Lüftungsöffnungen werden in ein durchgehendes Fensterband eingepasst (mit Brüstung, ohne Sturz). Der freie Querschnitt beträgt in der Summe ca. 3% der Raumgrundfläche
- **Lüftungsöffnungen in Lochfassade:** Lochfassade mit seitlich der Fenster angeordneten Lüftungsöffnungen. Der freie Querschnitt beträgt in der Summe ca. 3% der Raumgrundfläche

Es wird angenommen, dass die von aussen ersichtlichen Lüftungsöffnungen der Aussenwand die gleiche Dimension aufweisen. Die einzelnen Öffnungen sind rechteckig (jeweils 8.5 cm x 6.5 cm) und in einer 10 cm dicken Ziegelmauer integriert. Die Simulationsergebnisse sind jedoch für andere einfache Formen der Öffnungen auch gültig.

Es wird davon ausgegangen, dass die Lüftungsöffnungen vom Innenraum aus mit einem verdunkelten Lüftungsflügel mit einem U-Wert von 0.8 W/(m<sup>2</sup>·K) und g-Wert von 0.04 bedient werden können (Die Annahmen entsprechen im Grundsatz dem Titelbild dieses Berichts). Im Bereich der Lüftungsöffnungen wird keine Aussenwärmedämmung angebracht.

Der Querschnitt der Wandkonstruktion mit den Lüftungsöffnungen ist in der Abbildung 4 dargestellt.

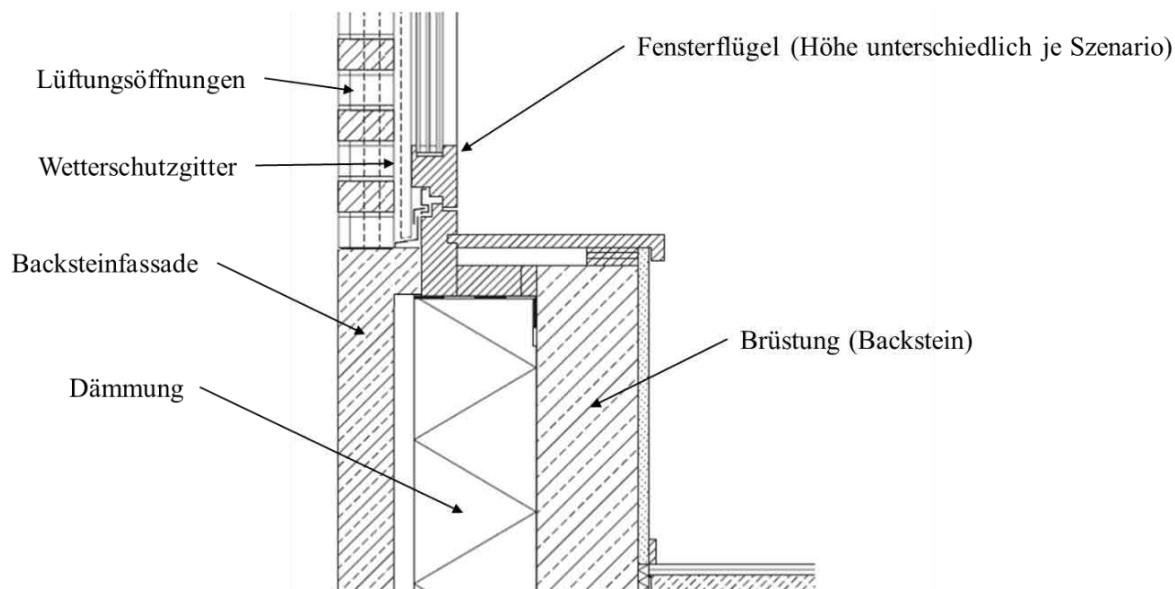


Abbildung 4: Schemaschnitt durch die Wandkonstruktion mit den Lüftungsöffnungen

### 4.3 Untersuchte Strategien der Bedienung der Lüftungsöffnungen

Im Projekt wird der Einfluss von unterschiedlichen Strategien der Bedienung der Lüftungsöffnungen auf die Wirksamkeit der Nachtauskühlung untersucht:

- Manuelles Öffnen und Schliessen durch die Benutzer am Ende bzw. am Anfang der Nutzungszeiten, einschliesslich Wochenenden/Ferien. Die Öffnungen werden während der Nacht nur dann offen gelassen, wenn die Aussenlufttemperatur am nächsten Tag 26 °C überschreiten wird.
- Manuelles Öffnen und Schliessen durch die Benutzer am Ende bzw. am Anfang der Nutzungszeiten, ausser während Wochenenden/Ferien. Die Öffnungen werden während der Nacht nur dann offen gelassen, wenn die Aussenlufttemperatur am nächsten Tag 26 °C überschreiten wird.
- Temperaturabhängiger automatischer Betrieb. Die Lüftungsöffnungen werden anhand von empfundener Raumtemperatur und Aussenlufttemperatur bedient. Die Lüftungsöffnungen werden geöffnet, falls die empfundene Raumtemperatur grösser als Aussenlufttemperatur ist und 21 °C überschreitet, sonst geschlossen. Für eine glatte Bedienung wird ein Thermostat mit der Bandbreite von 1 K umgesetzt.

Im Arbeitspaket 1 dieser Studie wurde der Raumtyp «Schulzimmer» untersucht. Die Simulationsergebnisse haben dabei gezeigt, dass der Einfluss der Bedienung im Vergleich zu den anderen Faktoren (Klimabedingungen und Anordnung der Lüftungsöffnungen) klein ist. Deshalb wurde der Einfluss von unterschiedlichen Strategien der Bedienung der Lüftungsöffnungen für andere Räume nicht untersucht.

#### 4.4 Klimadaten

Im Projekt wurden unterschiedliche Klimadaten für Simulationen verwendet:

- Designreferenzjahr DRY für die Klimastation Zürich SMA
- Zukunftsgerichtete Klimadaten, Zeithorizont ca. 2050

Die zukünftigen Wetterdaten gemäss den Klimaszenarien CH2018 sind in der Erarbeitungsphase.

Für die Simulationen wurden deshalb die Klimaszenarien CH2011 für den Standort Basel gemäss dem BFE/BAFU-Projekt «ClimaBau–Planen angesichts des Klimawandels» [12] berücksichtigt. In dieser Studie wurden die nachfolgenden zwei Jahre für die Simulationen verwendet:

- «Basel Medianjahr 2063» – Jahr 2063 gemäss dem Klimaszenario KNMI ECHAM5: das Medianjahr für die zukünftige Periode 2045-2074
- «Basel wärmstes Jahr 2068» – Jahr 2068 gemäss dem Klimaszenario MPI ECHAM5: das wärmste Jahr für die zukünftige Periode 2045-2074

Der Vergleich der für die Simulationen verwendeten Wetterdaten ist auf der Abbildung 5 dargestellt. Für den Vergleich der Wetterdaten werden nur Tagen mit dem Tagesmaximum grösser als 26 °C gezeigt.

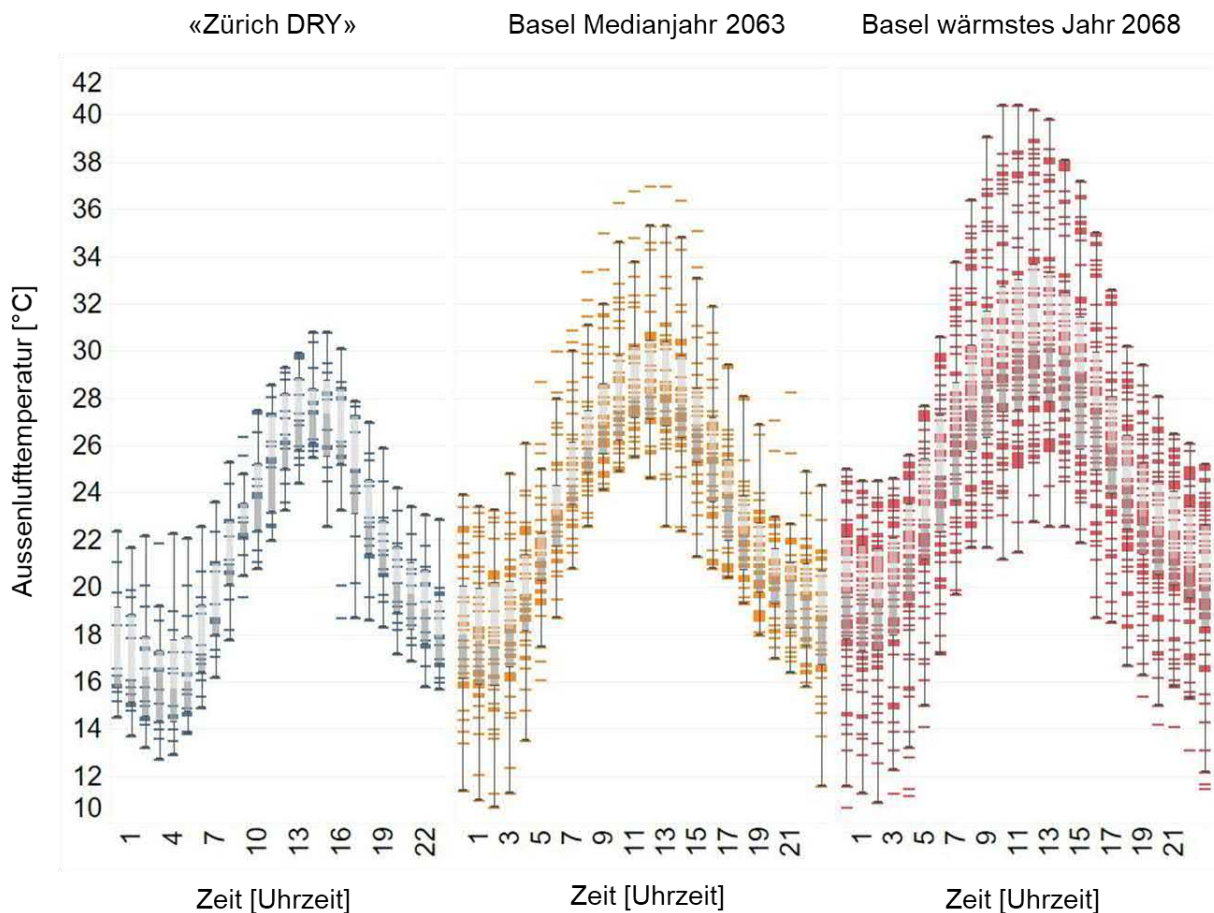


Abbildung 5: Vergleich der für die Simulationen verwendeten Wetterdaten

#### 4.5 Simulationsperiode

Die Simulationen wurden jeweils für das Sommerhalbjahr (vom 16.4. bis 15.10.) durchgeführt.

#### 4.6 Gebäudehülle, Baukonstruktionen und Wärmespeicherfähigkeit

Für alle betrachteten Raumtypen wurde von einem massiven, zweischaligen Wandaufbau ausgegangen. Die Simulationsergebnisse sind aber auch auf Kompaktfassaden übertragbar.

Wegen der unterschiedlichen Dimensionen und Lüftungsöffnungsflächen variiert die Wärmespeicherfähigkeit pro Nettogeschossfläche der untersuchten Raumtypen. In der Tabelle 2 sind die Werte zur Wärmespeicherfähigkeit der jeweiligen Räume, berechnet gemäss ISO EN 13786, zusammengefasst.

	Schulzimmer	Gruppenbüro	Sitzungszimmer	Mehrzwecksaal
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit ( $C_R/A_{NGF}$ ) [Wh/(m <sup>2</sup> ·K)]	48.0	51.5	54.8	49.2

**Tabelle 2: Wärmespeicherfähigkeit der untersuchten Raumtypen**

In den folgenden Unterkapiteln werden die angenommenen Baukonstruktionen erläutert.

#### 4.6.1 Aussenwand opak (ohne Lüftungsöffnungen)

Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen.

Bezeichnung	$\lambda$	Dichte	$c_p$	Dicke
	W/(m·K)	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg·K)	m
Innenputz	0.7	1400	1000	0.005
Modulbackstein	0.44	1100	1000	0.18
Dämmung (Mineralwolle)	0.038	40	1030	0.20
Luftschicht	0.11	1.2	1006	0.02
Modulbackstein	0.44	1100	1000	0.10
<b>Summe</b>				<b>0.505</b>
<b>U-Wert</b>	<b>W/(m<sup>2</sup>·K)</b>			<b>0.17</b>

#### 4.6.2 Zwischendecke (Boden)

Der Aufbau erfolgt von oben nach unten.

Bezeichnung	$\lambda$	Dichte	$c_p$	Dicke
	W/(m·K)	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg·K)	m
Parkett	0.1	700	1500	0.02
Unterlagsboden (Zement)	1.0	1800	1000	0.08
Trittschalldämmung (EPS)	0.039	13	1450	0.04
Beton armiert	2.5	2400	1000	0.30
Innenputz	0.7	1400	1000	0.005
<b>Summe</b>				<b>0.445</b>
<b>U-Wert</b>	<b>W/(m<sup>2</sup>·K)</b>			<b>0.62</b>

50 % der Deckenfläche wird mit direkt aufgeklebten, akustischen Elementen wie folgt belegt.

Bezeichnung	$\lambda$	Dichte	$c_p$	Dicke
	W/(m·K)	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg·K)	m
...				

Akustik EP1	0.032	70	1030	0.03
<b>Summe</b>				<b>0.475</b>
<b>U-Wert</b>	<b>W/(m<sup>2</sup>·K)</b>			<b>0.4</b>

#### 4.6.3 Innenwände

Der Wandaufbau zwischen dem untersuchten und den angrenzenden Räumen wurde wie folgt angenommen. Bei der Wand zum Gangbereich (gegenüber der Fassade) liegt der massive Backstein auf der untersuchten Raumseite. Bei den anderen Trennwänden liegt jeweils einmal der massive Teil und einmal der leichte Aufbau auf der untersuchten Raumseite.

<b>Bezeichnung</b>	$\lambda$	<b>Dichte</b>	$c_p$	<b>Dicke</b>
	W/(m·K)	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg·K)	m
Gipskarton	0.25	900	1000	0.025
Luftschicht	0.11	1.2	1006	0.02
Dämmung (Mineralwolle)	0.038	40	1030	0.02
Luftschicht	0.11	1.2	1006	0.02
Modulbackstein	0.44	1100	1000	0.18
Innenputz	0.7	1400	1000	0.005
<b>Summe</b>				<b>0.27</b>
<b>U-Wert</b>	<b>W/(m<sup>2</sup>·K)</b>			<b>0.63</b>




#### 4.6.4 Fenster

Es wird von folgender Verglasung ausgegangen.

<b>Bezeichnung</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
U-Wert Glas (Dreifachverglasung)	0.7	W/(m <sup>2</sup> ·K)
U-Wert Rahmen (inkl. allen Wärmebrücken)	1.2	W/(m <sup>2</sup> ·K)
U-Fenster	1.0	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Rahmenanteil	25	%
<i>g</i> -Wert	0.5	-
<i>t</i> -solar	0.41	-

#### 4.6.5 Wärmebrücken

Die Wärmebrücken werden wie folgt berücksichtigt:

<b>Wärmebrücke</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bild</b>
Außenwand / Innenwand	0.028	W/(m·K)	
Einfassung Außenfenster	0.12	W/(m·K)	
Außenwand / Zwischendecke	0.077	W/(m·K)	

#### 4.6.6. Sonnenschutz und Verschattung

Aussenliegender Sonnenschutz bei jedem Fenster als Rafflamellenstoren:

Total  $g$ -Wert: 0.1

Für alle Simulationsszenarien wird eine automatisierte externe Verschattung berücksichtigt, die ab einer externen Globalstrahlung von  $150 \text{ W/m}^2$  geschlossen wird. Der Neigungswinkel der Rafflamellenstoren wird gemäss dem Sonnenstand adaptiert. Der maximale Neigungswinkel beträgt  $55^\circ$  ( $0^\circ$  - horizontale Ausrichtung,  $90^\circ$  - vertikale Ausrichtung).

Die Verschattung durch die nebenstehenden Gebäude und dem Horizont wird vernachlässigt.

#### 4.7 Systeme und Nutzungen

##### 4.7.1 Heizung

Es wird ein ideales Heizgerät mit einer genügenden Heizleistung angenommen.

##### 4.7.2 Kühlung

Die untersuchten Räume werden ohne aktive Kühlung simuliert.

##### 4.7.3 Lüftungsanlage

Auf eine mechanische Lüftung wurde verzichtet. Der Luftaustausch erfolgt natürlich über Fenster- und Lüftungsöffnungen.

##### 4.7.4 Personen

Die Annahmen zur Personenbelegung in den untersuchten Räumen sind in der Tabelle 3 zusammengefasst. Die Gesamtnutzungszeit (Tage und Stunden) zeigt, wie oft die untersuchten Raumtypen in der Zeitperiode zwischen 16.04 bis 15.10 belegt sind.

	Schulzimmer	Gruppenbüro	Sitzungszimmer	Mehrzwecksaal
Personenbelegung	3 m <sup>2</sup> /Person	6 m <sup>2</sup> /Person	3 m <sup>2</sup> /Person	3 m <sup>2</sup> /Person
Belegungsprofil	nach SIA Merkblatt 2024:2015			
Nutzungszeit pro Arbeitstag [h]	11	11	6	16
Volllaststunden pro Arbeitstag [h]	7.6	7.2	4	10.4
Gesamtnutzungszeit [Tage]	85	131	131	157
Gesamtnutzungszeit [Stunden]	935	1441	786	2512
Aktivität	1.2 met			
Bekleidung	0.5 clo (Sommer)			

Tabelle 3: Personenbelegung pro Raumtyp

In den Simulationen wurden folgende Zeitperioden für den Raumtyp «Schulzimmer» als Schulferien (Abwesenheitstage) berücksichtigt:

Frühlingsferien Mo 13.04.2020 – Fr 24.04.2020

Tag der Arbeit Fr 01.05.2020



Auffahrt / Brücke	Do 21.05.2020 – Fr 22.05.2020
Pfingstmontag	Mo 01.06.2020
Sommerferien	Mo 13.07.2020 – Fr 14.08.2020
Knabenschiessen	Mo 14.09.2020
Herbstferien	Mo 05.10.2020 – Fr 16.10.2020

Für die anderen Raumtypen wurden keine Ferientage berücksichtigt.

Für die Raumtypen «Schulzimmer», «Gruppenbüro» und «Sitzungszimmer» wurden Wochenende als Abwesenheitstage betrachtet.

Für den Raumtyp «Mehrzwecksaal» wurden nur Sonntage als Abwesenheitstage betrachtet.

#### 4.8 Geräte

Die Eingaben zu Geräten in den untersuchten Räumen sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

	Schulzimmer	Gruppenbüro	Sitzungszimmer	Mehrzwecksaal
Lastprofil	nach SIA Merkblatt 2024:2015			
Lasten [W/m <sup>2</sup> ]	2	3	1	2
Volllaststunden pro Arbeitstag [h]	8.7	8.3	5.8	11.2

Tabelle 4: Interne Lasten der Geräte in den untersuchten Räumen

#### 4.9 Beleuchtung

Die Eingaben zur Beleuchtung in den untersuchten Räumen sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

	Schulzimmer	Gruppenbüro	Sitzungszimmer	Mehrzwecksaal
Regelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kann nur während der Nutzungszeit eingeschaltet werden               <ul style="list-style-type: none"> <li>• proportionale Regelung anhand der natürlichen Beleuchtungsstärke zwischen 50-100 Lux</li> <li>• Bei 50 Lux maximale künstliche Beleuchtung</li> </ul> </li> </ul>			
Lasten [W/m <sup>2</sup> ]	10.3	11.6	11.6	7.5

Tabelle 5: Annahmen zur Beleuchtung in untersuchten Räumen

#### 4.10 Natürliche Lüftung

Tageslüftung: 1. Priorität - CO<sub>2</sub>-Konzentration (zwischen 800 und 1200 ppm)  
 2. Priorität - falls T<sub>Raum</sub> > 24 °C, T<sub>Aussen</sub> < T<sub>Raum</sub>

Nachtlüftung: gemäss definierten Simulationsszenarien

#### 4.11 Natürliche Infiltration

Aussenluft-Volumenstrom per Fassadenfläche: 0.15 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)

## 5 Volumenstrom durch Lüftungsöffnungen

Für die Berechnung des Volumenstroms von fassadenintegrierten Lüftungsöffnungen, in Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Aussen, dient die angepasste empirische Gleichung der einseitigen Fensterlüftung [3]:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot C_d^* \cdot a \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad (2)$$

In Gleichung (2) ist  $Q$  – Volumenstrom durch die Lüftungsöffnungen [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $g$  – die Erdbeschleunigung [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  $a$  – die Öffnungsfläche [ $\text{m}^2$ ],  $h$  – die Höhe der Öffnung [ $\text{m}$ ],  $T_i$  – die Innenlufttemperatur [ $^\circ\text{C}$ ],  $T_o$  – die Aussenlufttemperatur und  $C_d^*$  – der Durchflusskoeffizient für fassadenintegrierte Öffnungen []. Dieser Koeffizient kann wie folgt definiert werden:

$$C_d^* = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_d^2} + \sum \zeta}} \quad (3)$$

In Gleichung (3) ist  $C_d$  – der Durchflusskoeffizient bei einer einseitigen Fensterlüftung [],  $\sum \zeta$  – die Summe der Druckwiderstände aus der Lüftungsöffnung und dem Wetterschutzgitter [].

Die resultierenden  $C_d^*$  –Werte für die drei untersuchten Lüftungsöffnungen sind in der Tabelle 6 dargestellt. Für die Berechnung des Druckwiderstands des Wetterschutzgitters wird ein Wetterschutzgitter (Lamellenstruktur) mit dem Insektenschutz angenommen [14].

	Einseitige Fensterlüftung	Lüftungsöffnungen
Ohne Wetterschutzgitter	0.65	0.44
Mit Wetterschutzgitter	0.24	

Tabelle 6: Durchflusskoeffizient  $C_d$  in Abhängigkeit von der Anordnung der Lüftungsöffnungen und des Wetterschutzgitters

Die in der Tabelle 6 dargestellten Werte wurden mit einer zweidimensionalen Strömungssimulationen überprüft (siehe Abbildung 6).

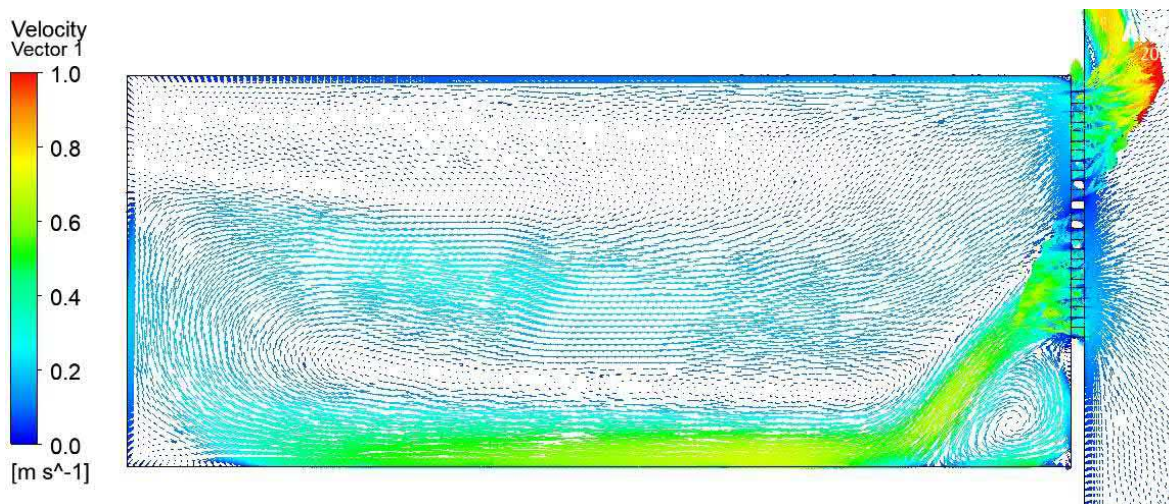


Abbildung 6: Beispiel der ausgeführten Strömungssimulationen für die Lüftungsöffnungen

Wie im Kapitel 4.2 beschrieben, wurden drei Typen von Lüftungsöffnungen untersucht. Der freie Querschnitt der raumhohen Lüftungsöffnungen beträgt 5 %, der Querschnitt der anderen Öffnungen beträgt 3 %.

Der Luftwechsel (Volumen der beim Lüften ausgetauschten Luft, im Verhältnis zum Volumen des belüfteten Raumes) im Raum kann anhand der Gleichung (2) wie folgt beschrieben werden:

$$\text{Luftwechsel} = \frac{\frac{1}{3} C_d^* a \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}}}{V} = \frac{\frac{1}{3} C_d^* K \cdot A \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}}}{A \cdot H} = \frac{1}{3} \cdot C_d^* \cdot \frac{K}{H} \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad (4)$$

In Gleichung (4) ist  $V$  – das Raumvolumen [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $A$  – die Bodenfläche des Raums [ $\text{m}$ ],  $H$  – die Raumhöhe [ $\text{m}$ ],  $K$  – der Proportionalwert zwischen Fläche der Lüftungsöffnungen und der Raumfläche [].

Für die Raumtypen «Schulzimmer», «Gruppenbüro» und «Sitzungszimmer» sind die Koeffizienten in Gleichung (4) identisch. Die Raumhöhe variiert nur unerheblich zwischen 2.8 und 3 m. Deshalb ist der Luftwechsel für diesen Raumtypen, mit vergleichbaren Konstruktionen der Lüftungsöffnungen, ähnlich.

Der Luftwechsel variiert jedoch mit der Querschnittsfläche und Höhe der Lüftungsöffnungen sowie dem  $C_d^*$ -Wert. Um die möglichen Fälle zusammenzufassen, werden drei «Belüftungskategorien» definiert (Abbildung 7):

- «Starke Belüftung»: entspricht einer einseitigen Fensterlüftung bzw. einer einseitigen Lüftung durch *raumhohe Lüftungsöffnungen ohne* Wetterschutzgitter
- «Mittlere Belüftung»: entspricht einer einseitigen Fensterlüftung bzw. einer einseitigen Lüftung durch raumhohe Lüftungsöffnungen *mit* Wetterschutzgitter. Zu dieser Kategorie gehört auch die Variante *Lüftungsöffnungen im Fensterband oder in einer Lochfassade ohne* Wetterschutzgitter
- «Geringere Belüftung»: entspricht der Variante *Lüftungsöffnungen im Fensterband bzw. in einer Lochfassade mit* Wetterschutzgitter

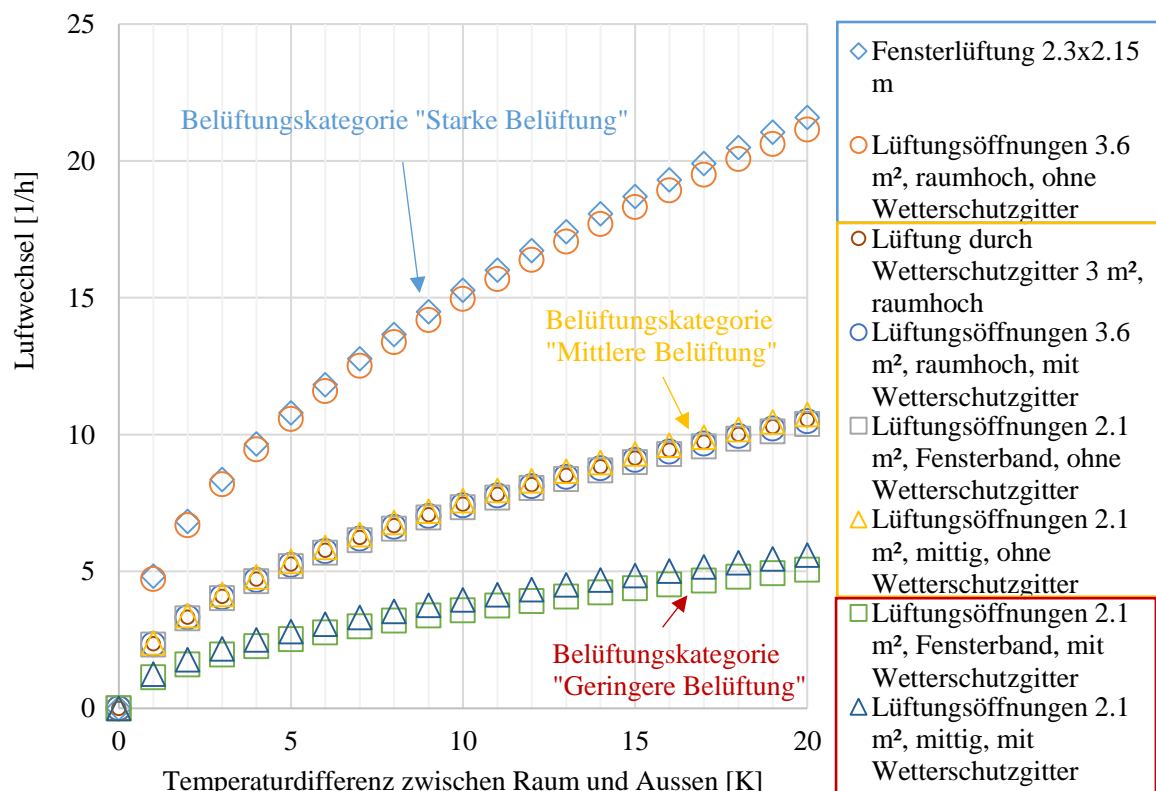


Abbildung 7: Luftwechsel im Schulzimmer – Unterteilung des Luftwechsels in Belüftungskategorien (die gegebenen Flächen sind als freie Querschnittsflächen zu verstehen)

Die Abhängigkeit des Luftaustauschs von der Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Aussen ist in Abbildung 8 für die drei erwähnten Raumtypen («Schulzimmer», «Gruppenbüro» und «Sitzungszimmer») und den beschriebenen drei «Belüftungskategorien» dargestellt.

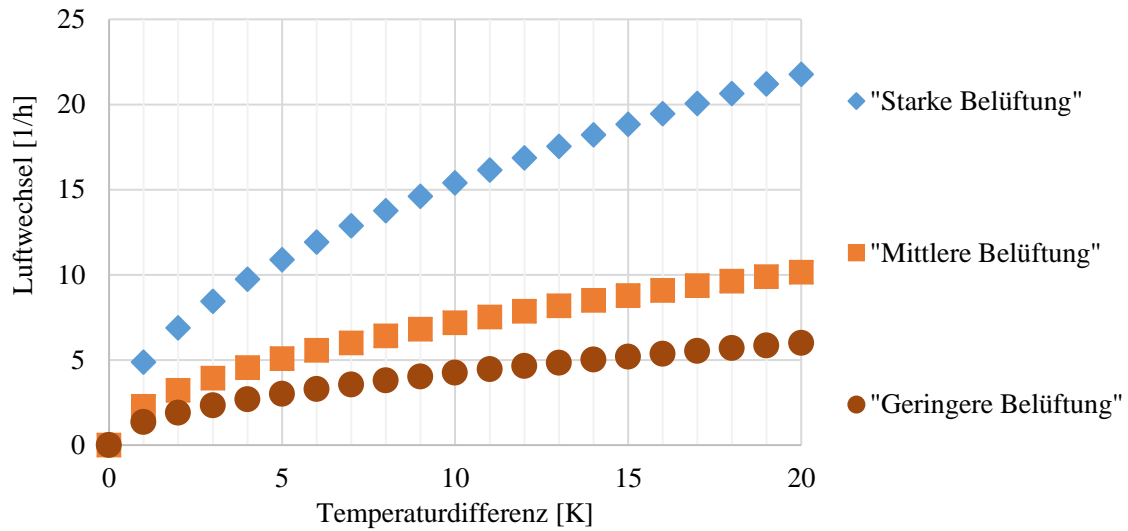


Abbildung 8: Luftwechsel in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Raum und Aussen für die Raumtypen "Schulzimmer", "Gruppenbüro" und "Sitzungszimmer"

Aus Gleichung (4) ist ersichtlich, dass sich der Luftwechsel mit zunehmender Raumhöhe reduziert. Deshalb ist der Luftwechsel für den Mehrzwecksaal, mit 6 m Raumhöhe, im Vergleich zu weniger hohen Raumtypen (siehe Abbildung 9) geringer.

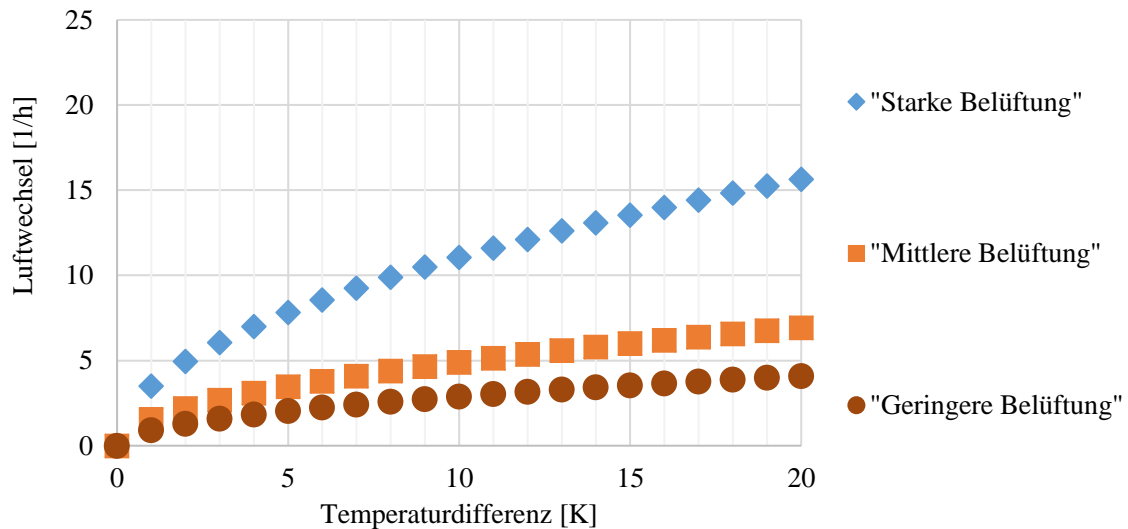


Abbildung 9: Luftwechsel in Abhängigkeit von Temperaturdifferenz zwischen Raum und Aussen für den Raumtyp "Mehrzwecksaal"

Die in der Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellten Luftwechsel wurden in den thermischen Simulationen für die ausgewählten Raumtypen verwendet.

Für die grafische Erklärung der «Belüftungskategorien» wurden einige architektonische Skizzen erstellt. Diese befinden sich im Kapitel 10.1.

# 6 Ergebnisse der thermischen Simulationen

## 6.1 Simulationsmodelle und Simulationssoftware

Anhand der Simulationsgrundlagen sowie der berechneten Volumenströme wurden vier Simulationsmodelle für jeden Raumtyp mit der Software «IDA-ICE» erstellt, welche in der Abbildung 10 dargestellt sind.

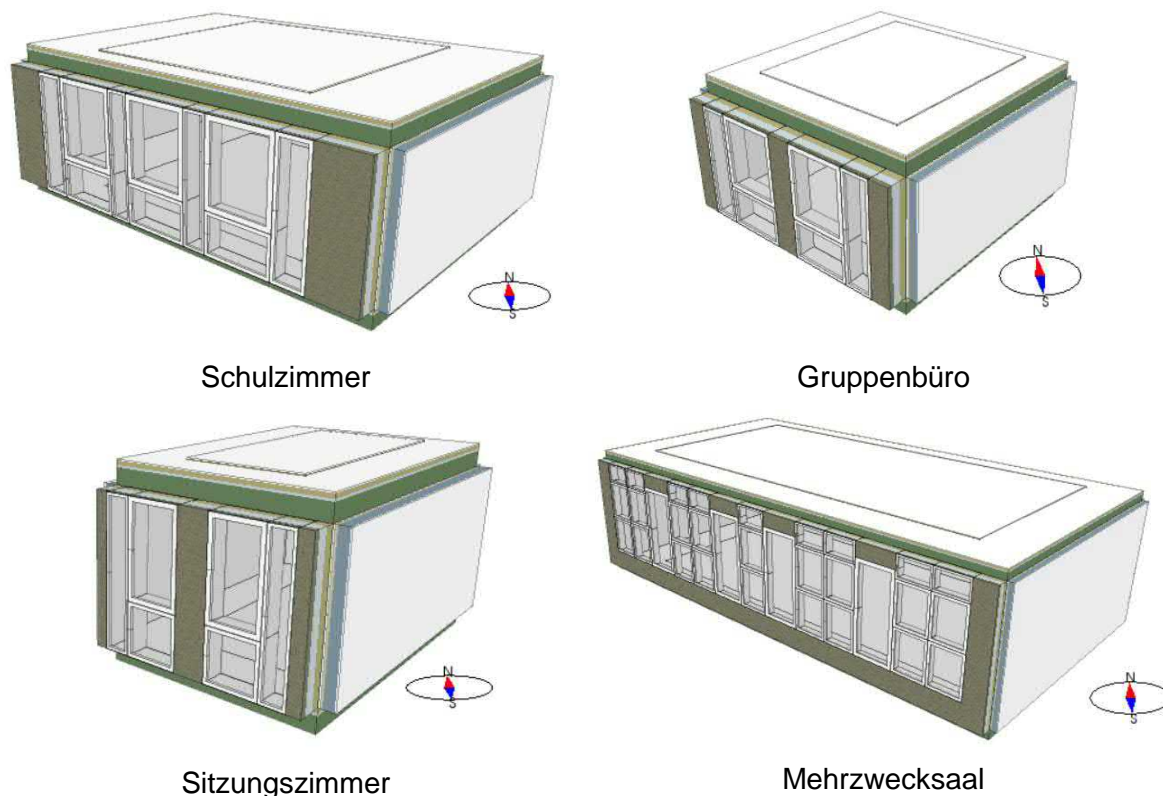


Abbildung 10: Simulationsmodelle in der Software «IDA-ICE»

## 6.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse werden folgendermassen dargestellt:

- Vergleich der simulierten Szenarien je Raumtyp anhand von Summenhäufigkeitsdiagrammen. Dabei wird die Anzahl der Belegungsstunden zwischen dem 16.04.-15.10. auf der Basis der empfundenen Temperatur aufgeteilt. Diese Diagramme sind in den Kapiteln 6.3 Raumtyp «Schulzimmer», 6.4 Raumtyp «Gruppenbüro», 6.5 Raumtyp «Sitzungszimmer», 6.6 Raumtyp «Mehrzwecksaal» und 6.7 Sensitivitätsanalyse bezüglich der Bedienungsstrategie dargestellt.
- Auswertung der empfundenen Raumtemperatur gemäss SIA 180 (Figur 3). Diese Ergebnisse sind im Anhang im Kapitel 10.2 zu finden.
- Darstellung der täglichen Schwankung der Aussentemperatur und Schwankung der Raumtemperatur während der Belegungszeit. Dabei sind die Tage ohne Belegung nicht dargestellt. Diese Ergebnisse sind im Anhang im Kapitel 10.3 zu finden.

Erwartungsgemäss erreicht die Variante «Starke Belüftung» die tiefsten und die Variante «Geringere Belüftung» die höchsten empfundenen Raumtemperaturen.

Die Raumtemperaturen steigen mit den für die Zukunft prognostizierten Aussenbedingungen bedeutend an.

### 6.3 Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Schulzimmer»

In Abbildung 11 sind die Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Schulzimmer» dargestellt.

Mit den Klimadaten «Zürich Designreferenzjahr» ergeben sich 5 («Starke Belüftung») bis 14 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (bis 2 % der Nutzungszeit) mit einer empfundenen Raumtemperatur von mehr als 27 °C.

Mit den Klimadaten «Basel Medianjahr 2063» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 50 («Starke Belüftung») bis 104 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (5 % bis 11 % der Nutzungszeit) überschritten.

Mit den Klimadaten «Basel wärmstes Jahr 2068» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 239 («Starke Belüftung») bis 343 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (26 % bis 37 % der Nutzungszeit) überschritten. Die empfundene Raumtemperatur von 30 °C wird in diesem Fall während 27 («Starke Belüftung») bis 115 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (3 % bis 12 % der Nutzungszeit) überschritten.

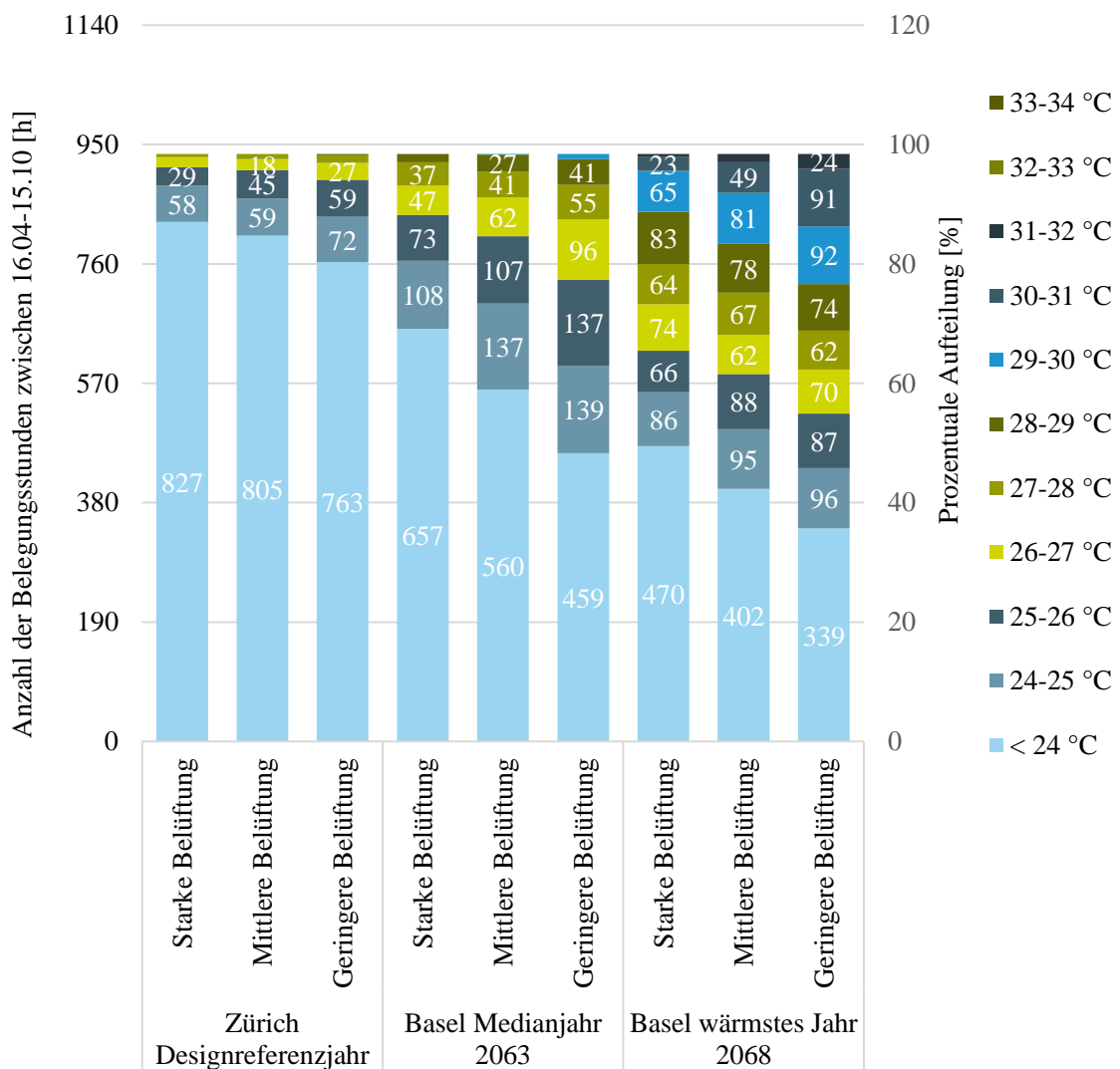


Abbildung 11: Simulationsergebnisse für den Raumtyp "Schulzimmer", bei automatisierter Bedienung

### 6.4 Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Gruppenbüro»

In der Abbildung 12 sind die Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Gruppenbüro» dargestellt.

Mit den Klimadaten «Zürich Designreferenzjahr» wird die empfundene Raumtemperatur von mehr als 27 °C während den Belegungsstunden nicht überschritten.

Mit den Klimadaten «Basel Medianjahr 2063» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 52 («Starke Belüftung») bis 121 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (4 % bis 8 % der Nutzungszeit) überschritten.

Mit den Klimadaten «Basel wärmstes Jahr 2068» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 311 («Starke Belüftung») bis 496 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (22 % bis 34 % der Nutzungszeit) überschritten. Die empfundene Raumtemperatur von 30 °C wird während 42 («Starke Belüftung») bis 116 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (3 % bis 8 % der Nutzungszeit) überschritten.

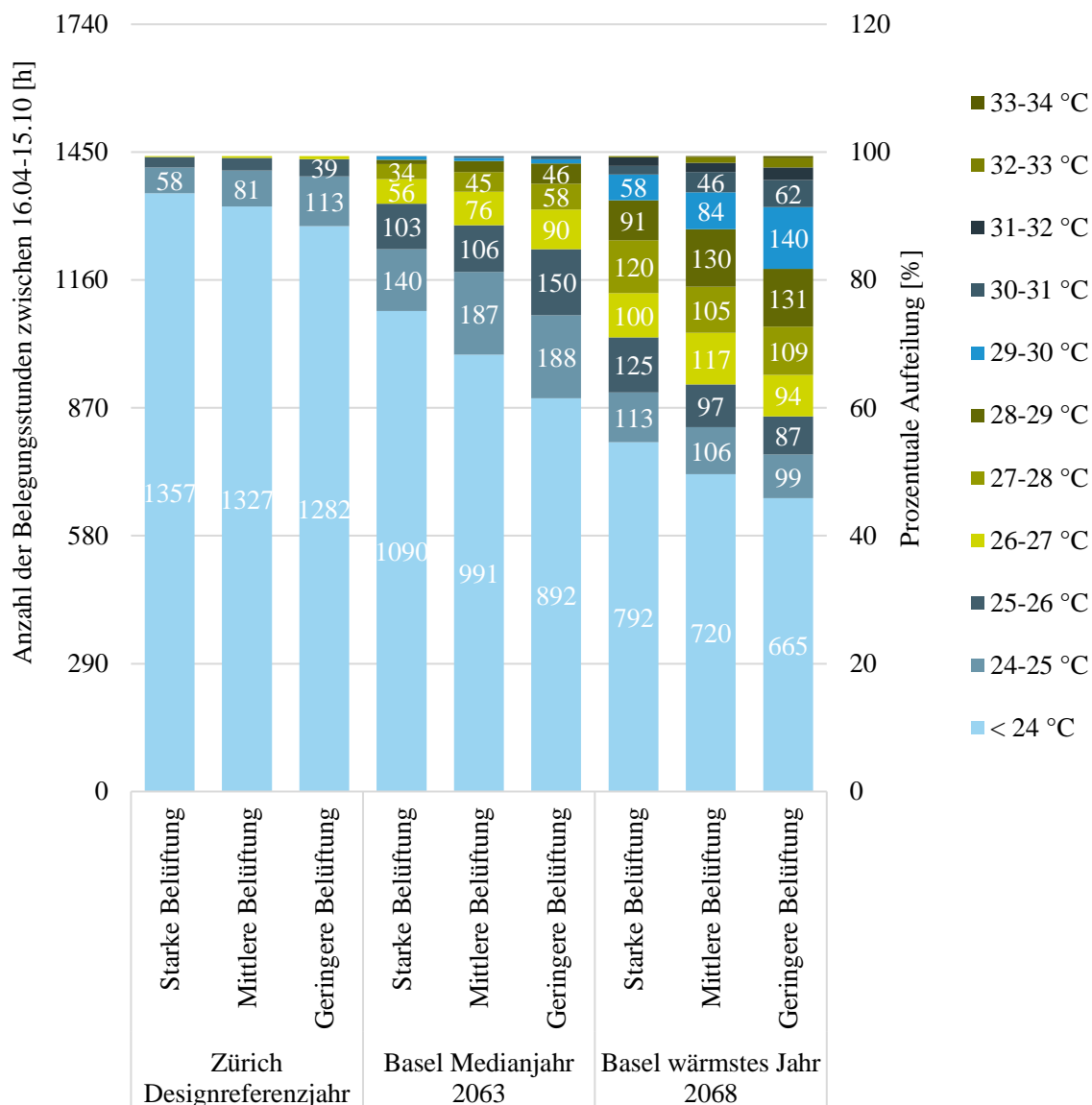


Abbildung 12: Simulationsergebnisse für den Raumtyp "Gruppenbüro", bei automatisierter Bedienung

### 6.5 Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Sitzungszimmer»

In der Abbildung 13 sind die Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Sitzungszimmer» dargestellt.

Mit den Klimadaten «Zürich Designreferenzjahr» wird die empfundene Raumtemperatur von mehr als 27 °C während den Belegungsstunden nicht überschritten.

Mit den Klimadaten «Basel Medianjahr 2063» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 29 («Starke Belüftung») bis 80 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (4 % bis 10 % der Nutzungszeit) überschritten.

Mit den Klimadaten «Basel wärmstes Jahr 2068» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 179 («Starke Belüftung») bis 300 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (23 % bis 38 % der Nutzungszeit) überschritten. Die empfundene Raumtemperatur von 30 °C wird während 23 («Starke Belüftung») bis 75 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (3 % bis 10 % der Nutzungszeit) überschritten.

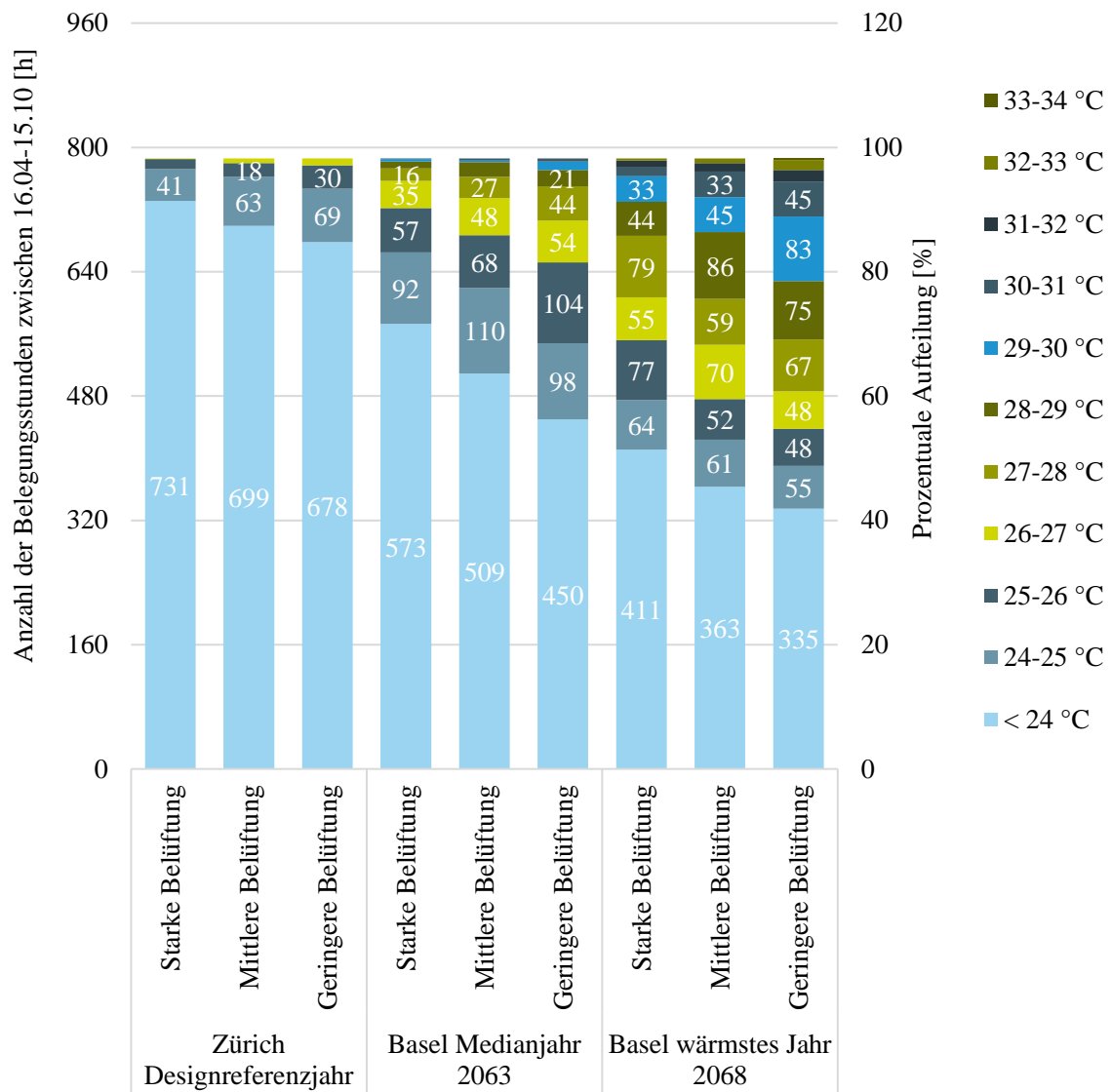


Abbildung 13: Simulationsergebnisse für den Raumtyp "Sitzungszimmer", bei automatisierter Bedienung

## 6.6 Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Mehrzwecksaal»

In der Abbildung 14 sind die Simulationsergebnisse für den Raumtyp «Mehrzwecksaal» dargestellt.

Mit den Klimadaten «Zürich Designreferenzjahr» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 48 («Starke Belüftung») bis 99 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (2 % bis 4 % der Nutzungszeit) überschritten.

Mit den Klimadaten «Basel Medianjahr 2063» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 305 («Starke Belüftung») bis 582 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (12 % bis 23 % der Nutzungszeit) überschritten. Die empfundene Raumtemperatur von 30 °C wird während 25 («Starke Belüftung») bis 99 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (1 % bis 4 % der Nutzungszeit) überschritten.

Mit den Klimadaten «Basel wärmstes Jahr 2068» wird die empfundene Raumtemperatur von 27 °C während 812 («Starke Belüftung») bis 1117 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (32 % bis 45 % der Nutzungszeit) überschritten. Die empfundene Raumtemperatur von 30 °C wird während 232 («Starke Belüftung») bis 527 («Geringere Belüftung») Belegungsstunden (9 % bis 21 % der Nutzungszeit) überschritten.



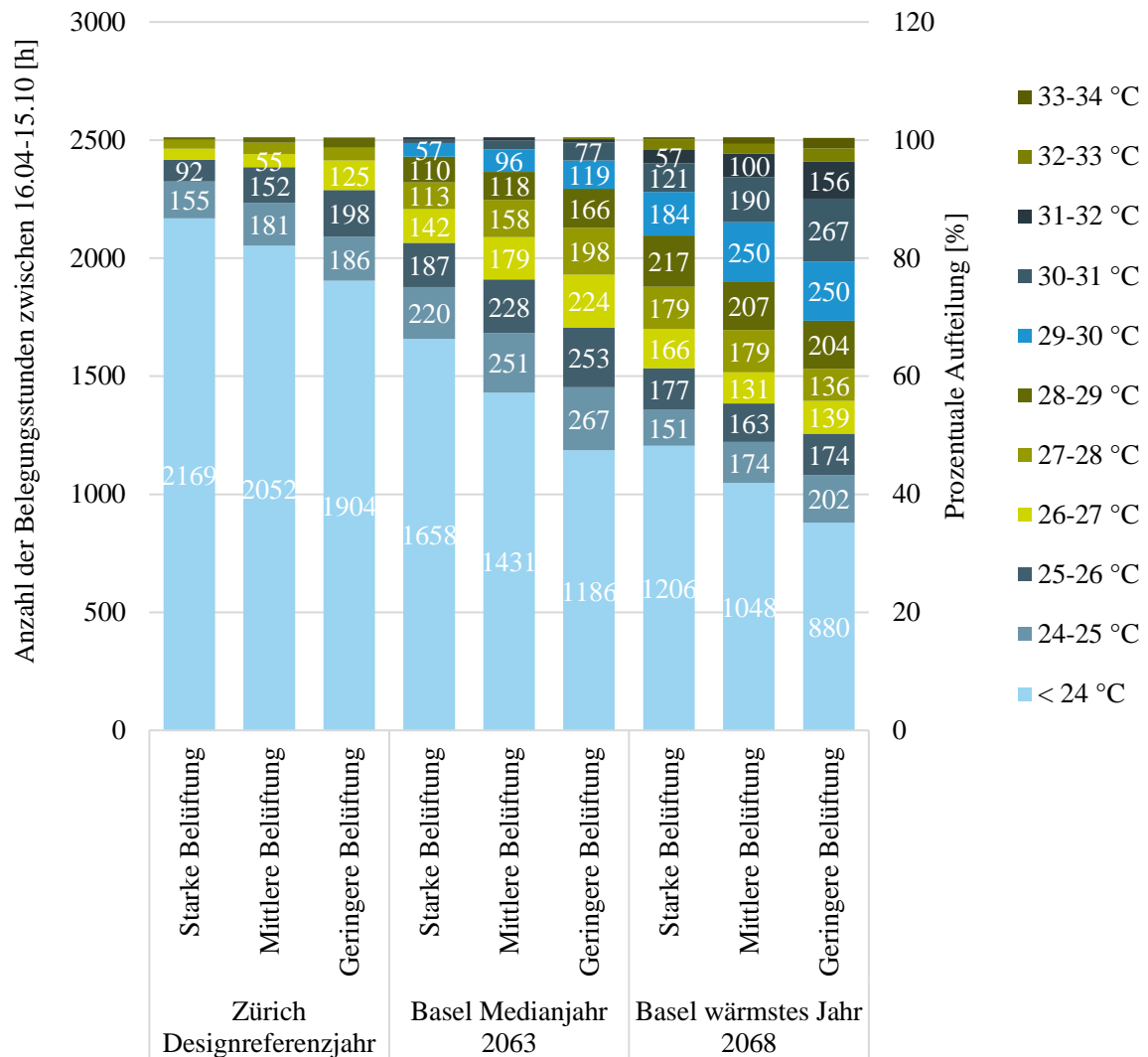


Abbildung 14: Simulationsergebnisse für den Raumtyp "Mehrzwecksaal", automatisierte Bedienung

### 6.7 Sensitivität zur Bedienungsstrategie

Gemäss den Simulationsgrundlagen wurden für das «Schulzimmer» drei unterschiedlichen Bedienungen der Lüftungsöffnungen untersucht (siehe Kapitel 4.3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Ergebnisse der Untersuchung sind für die genannten drei Klimadaten – «Zürich Designreferenzjahr», «Basel Medianjahr 2063», «Basel wärmstes Jahr 2068» vorhanden (Abbildung 15, Abbildung 16, Abbildung 17).

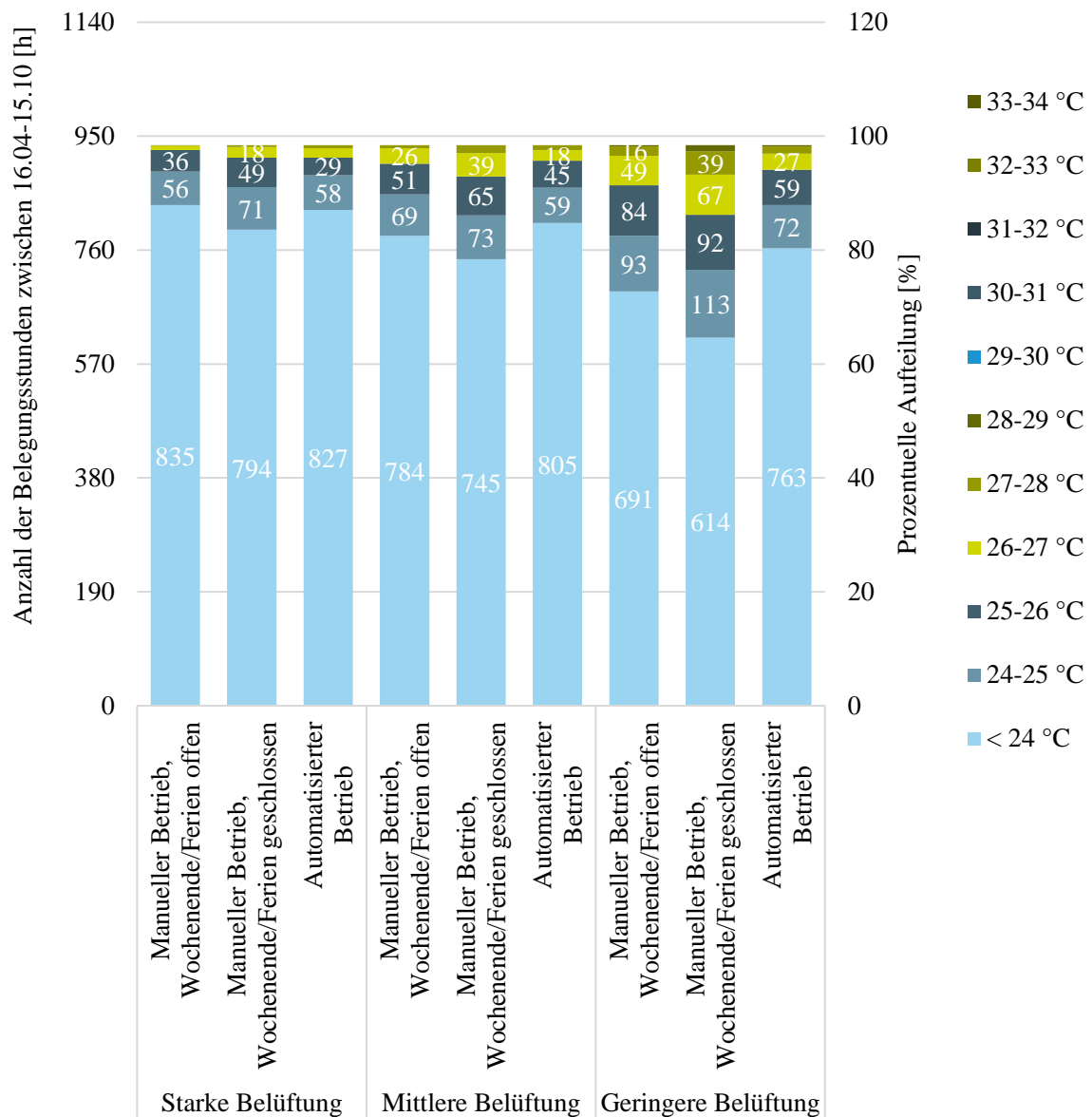


Abbildung 15: Sensitivität der empfundenen Raumtemperatur in Bezug auf die Bedienungsstrategie der Lüftungsöffnungen, bei Klimadaten des "Zürich Designreferenzjahr", Raumtyp «Schulzimmer»

Die Ergebnisse zeigen Folgendes auf:

- Erwartungsgemäss werden mit der Variante «Automatisierter Betrieb» im Vergleich zu den Strategien «Manueller Betrieb, Wochenende/Ferien offen» und «Manueller Betrieb, Wochenende/Ferien geschlossen» kühlere Raumtemperaturen erreicht.
- Der Effekt der Nachtauskühlung ist grösser, falls die Lüftungsöffnungen auch während dem Wochenende offen bleiben.
- Nur für den Fall «Starke Belüftung» erreicht die Strategie «Manueller Betrieb, Wochenende/Ferien offen» vergleichbare Resultate mit der Strategie «Automatisierter Betrieb». Der Grund dafür liegt in der Definition der Bedienungsstrategie «Automatisierter Betrieb». Diese Bedienungsstrategie ist temperaturabhängig und versucht den Raum in der Nacht auf 20.5 °C abzukühlen. Sobald dieses Temperaturniveau erreicht ist, schliessen sich die Lüftungsöffnungen. Beim Fall «Starke Lüftung» und der Betriebsart «Manueller Betrieb, Wochenende/Ferien offen» kann hingegen kein Temperaturgrenzwert eingehalten werden. Der Raum kann sich somit auch stärker abkühlen, was zu Unbehaglichkeit führen kann.

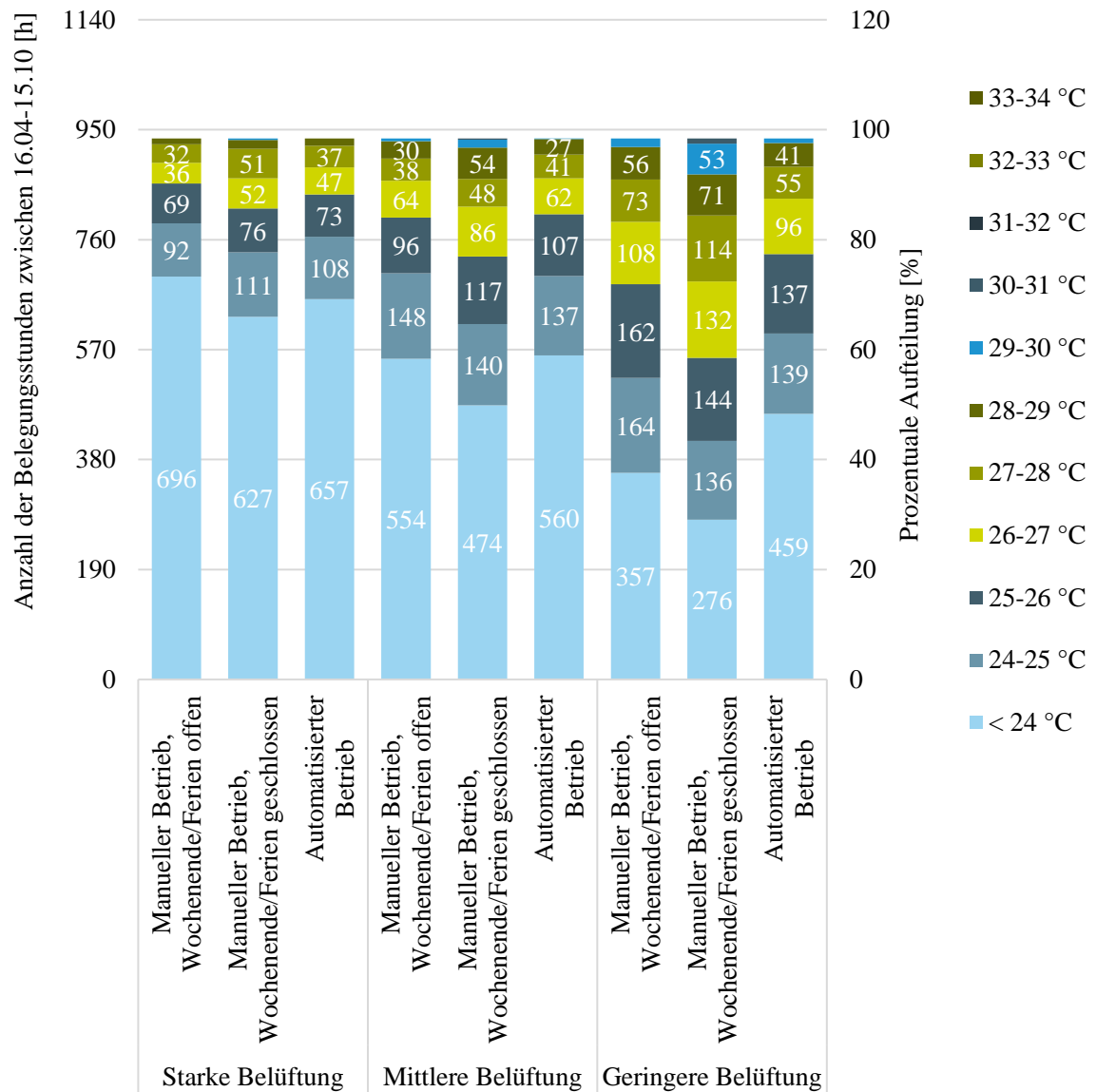


Abbildung 16: Sensitivität der empfundenen Raumtemperatur zur Bedienungsstrategie der Lüftungsöffnungen, bei Klimadaten "Basel Medianjahr 2063", Raumtyp «Schulzimmer»

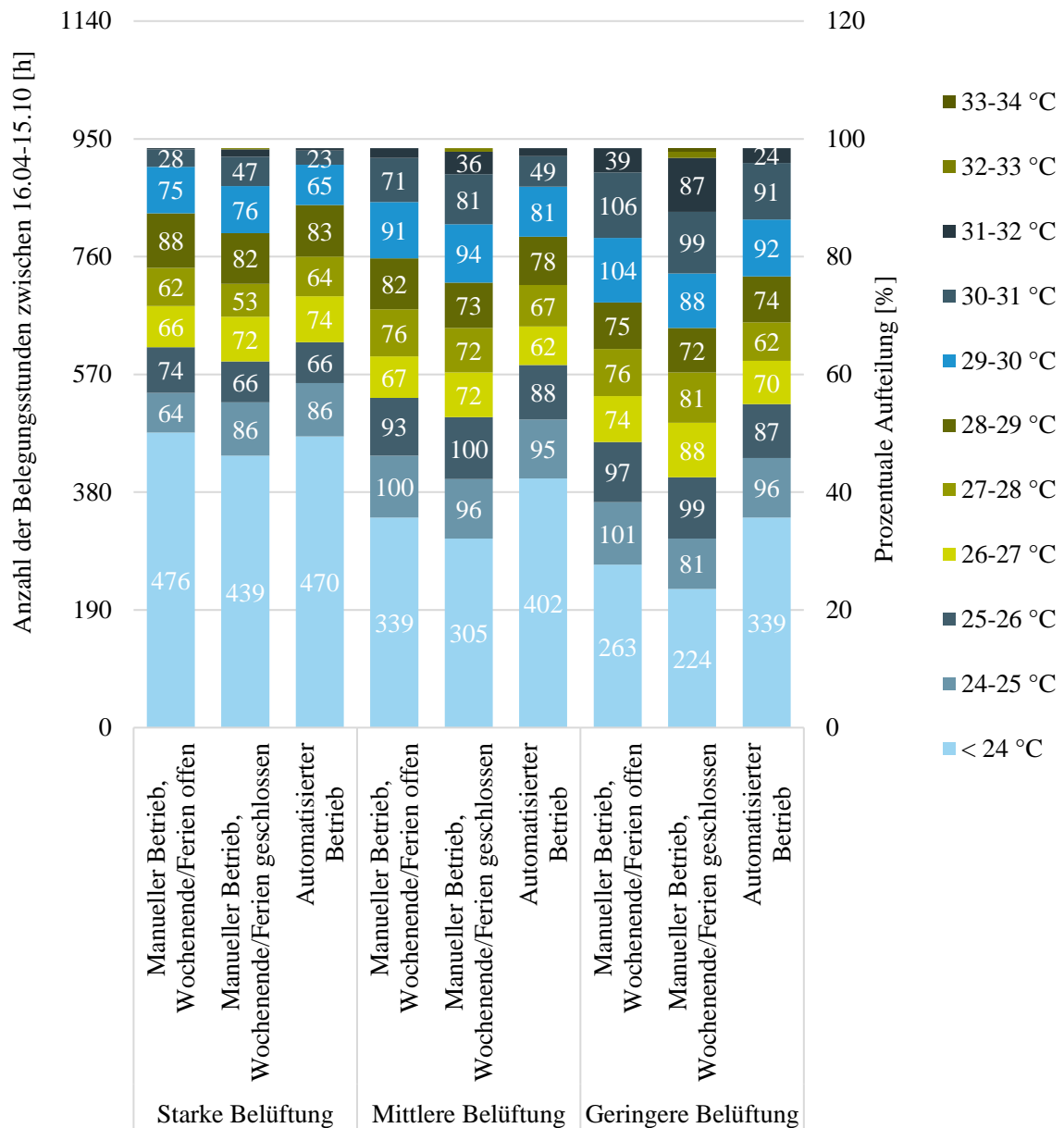


Abbildung 17: Sensitivität der empfundenen Raumtemperatur in Bezug auf die Bedienungsstrategie der Lüftungsöffnungen, bei Klimadaten "Basel wärmstes Jahr 2068", Raumtyp «Schulzimmer»

Die Sensitivität der Wirksamkeit der Nachtauskühlung in Bezug auf die Bedienungsstrategien wird folgendermassen zusammengefasst:

- Abbildung 18 zeigt die Dauer, während der die empfundenen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Bedienungsstrategien höher als 27 °C ausfällt
- Abbildung 19 zeigt die Dauer, während der die empfundenen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Bedienungsstrategien höher als 30 °C ausfällt

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass der Einfluss der Bedienungsstrategien für die Variante «Starke Belüftung» am kleinsten und für die Variante «Geringere Belüftung» am grössten ist. Der Einfluss der Bedienungsstrategien steigt mit der Klimaerwärmung.

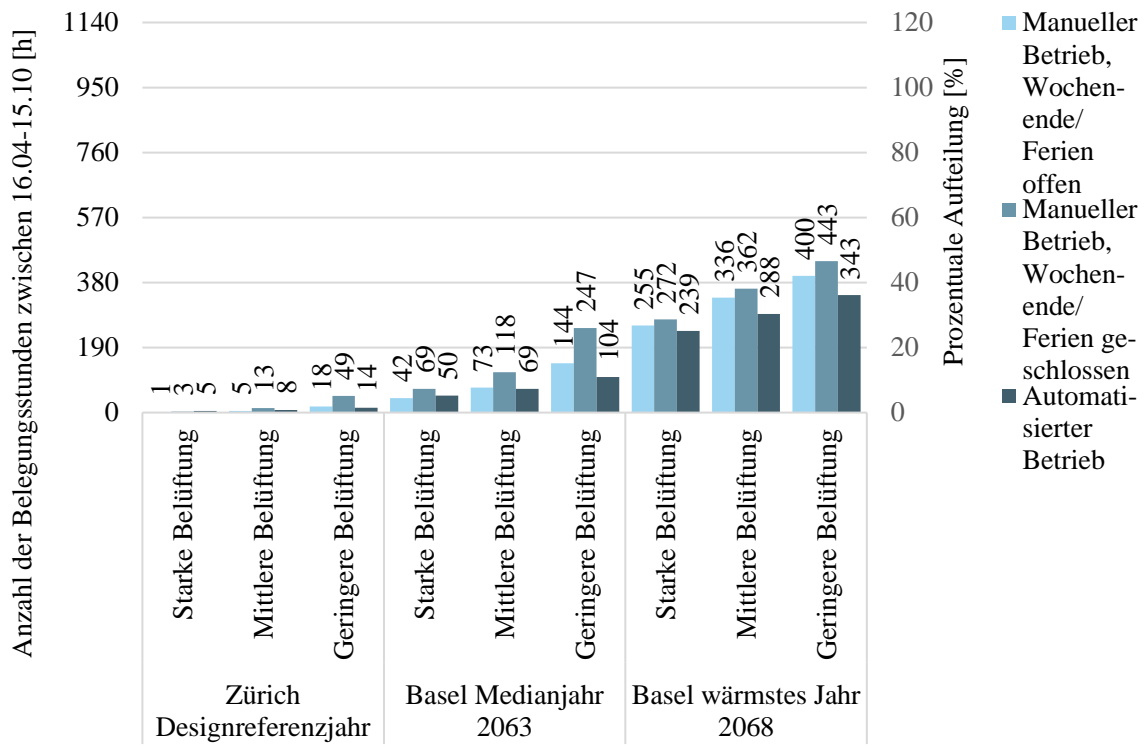


Abbildung 18: Anzahl der Belegungsstunden mit einer Raumtemperatur über 27 °C bei unterschiedlichen Bedienungsstrategien, Belüftungskategorien sowie Klimadaten

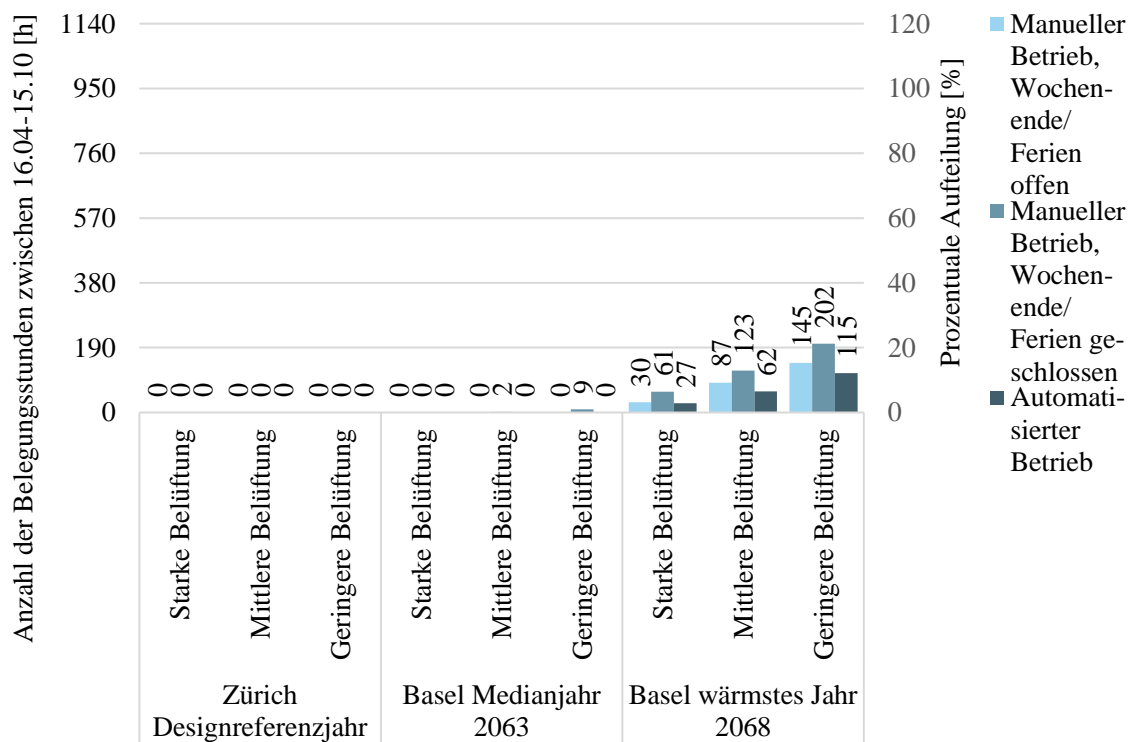


Abbildung 19: Anzahl der Belegungsstunden mit einer Raumtemperatur über 30 °C bei unterschiedlichen Bedienungsstrategien, Belüftungskategorien sowie Klimadaten

# 7 Erkenntnisse

Im Projekt wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Mit der Nachtauskühlung kann die Behaglichkeit (gemäss Figur 3 SIA 180:2014) im Sommer für das Designreferenzjahr Zürich mit allen simulierten Varianten sichergestellt werden (detaillierte Auswertung siehe im Kapitel 10.2). Die Aussage ist auch für Raumtypen mit intensiver Nutzung (z.B. Mehrzwecksaal) gültig. Die Lüftungsöffnungen müssen nicht besonders gross sein und können auch mit einer gewissen Freiheit angeordnet werden.
- Im Fall des Klimaszenarios «Basel Medianjahr 2063» wird die Anzahl Überhitzungsstunden auch mit den kleinen Lüftungsöffnungen (geringere Belüftung) für die Nutzungen «Schulzimmer», «Gruppenbüro» und «Sitzungszimmer» weiterhin nahezu null sein (siehe Tabelle 7). Für den Raumtyp «Mehrzwecksaal» steigt die Anzahl Überhitzungsstunden bis auf 129 Stunden an. In diesem Fall bieten grosse und mittlere Lüftungsöffnungen mehr Behaglichkeit an.

	Basel Medianjahr 2063		
	Starke Belüftung	Mittlere Belüftung	Geringere Belüftung
Schulzimmer	0	0	0
Gruppenbüro	0	0	0
Sitzungszimmer	0	0	1
Mehrzwecksaal	25	55	129

Tabelle 7: Die Anzahl Überhitzungsstunden pro Jahr gemäss Figur 3 SIA 180:2014 für das Klimaszenario «Basel Medianjahr 2063» (detaillierte Auswertung siehe im Kapitel 10.2)

Die Anzahl Überhitzungsstunden (gemäss Figur 3 SIA 180:2014) pro Jahr wird für den Fall «Basel wärmstes Jahr 2068» für alle Räume ansteigen (siehe Tabelle 8). Die Nachtauskühlung mit den grossen Lüftungsöffnungen (starke Belüftung) bringt eine wesentliche Verbesserung für die Räume mit der Nutzung «Schulzimmer», «Gruppenbüro» und «Sitzungszimmer». Für die Räume mit der intensiven Nutzung «Mehrzwecksaal» wird eine zusätzliche Kühlung nötig sein.

	Basel wärmstes Jahr 2068		
	Starke Belüftung	Mittlere Belüftung	Geringere Belüftung
Schulzimmer	13	48	100
Gruppenbüro	6	21	51
Sitzungszimmer	4	12	34
Mehrzwecksaal	136	294	461

Tabelle 8: die Anzahl Überhitzungsstunden pro Jahr gemäss Figur 3 SIA 180:2014 für das Klimaszenario «Basel wärmstes Jahr 2068» (detaillierte Auswertung siehe im Kapitel 10.2)

- Erwartungsgemäss wirken sich grössere Öffnungsflächen und kleine Druckverluste (ohne Wetterschutzgitter) positiv aus.
- Im Vergleich zum Einfluss des Klimawandels hat die Art der Bedienung der Lüftungsöffnungen eine untergeordnete Bedeutung auf die Ergebnisse.
- Aus Sicht der Belastung für den Menschen und der abnehmenden Konzentration bei hohen Raumtemperaturen stellt sich die Frage, ob die in der SIA 180 postulierte Grenzkurve für natürlich gelüftete Räume nicht zu hoch angesetzt ist. In der Studie [14] wurde aufgezeigt, dass durch die Steigerung der Raumtemperatur von 22 °C auf 30 °C eine Verschlechterung der Arbeitsleistung von 10 % resultieren kann.

## 8 Empfehlungen

Die untersuchte Art der Nachtauskühlung kann heute und in Zukunft als eine wirksame Lösung empfohlen werden, wenn folgende Voraussetzungen und Randbedingungen erfüllt sind:

- Die Form sowie die Querschnittsfläche der Lüftungsöffnungen haben den grössten Einfluss auf die Effizienz der Nachtauskühlung. Raumhöhe Lüftungsöffnungen mit einer Querschnittsfläche zwischen 3-5 % der Bodenfläche gewährleisten einen erhöhten Luftwechsel zwischen Innen- und Aussenraum und somit eine gute Wirkung der Nachtauskühlung.
- Neben einfachen und grossen Lüftungsöffnungen ist ein gut durchdachtes Wetterschutzgitter essentiell für den Einsatz der Nachtauskühlung. Es kann zur Absturzsicherung, Einbruch- und Vandalismusschutz dienen, muss aber vor allem einen möglichst kleinen Druckwiderstand aufweisen. Dieser hat einen bedeutenden Einfluss auf den Luftwechsel.
- Um die grösste Wirksamkeit der Nachtauskühlung zu erreichen, sollten Lüftungsöffnungen während den Arbeitstagen sowie an Wochenenden die ganze Nacht geöffnet bleiben. Dadurch entsteht auch das Risiko einer möglichen Unterkühlung des Raums. Der unerwünschte Effekt kann mit der Berücksichtigung von Wetterprognosen respektive mit einer automatisierten temperaturabhängigen Bedienung der Lüftungsöffnungen minimiert oder gar vermieden werden.
- Das Potential der Nachtauskühlung wird sich in Zukunft wegen der steigenden Aussenlufttemperatur und Hitzewellen mit immer längeren Perioden mit aufeinander folgenden Tropennächten reduzieren. Gebäude mit einer grösseren thermischen Speicherkapazität werden den Effekt der Nachtauskühlung besser ausnützen können.



## 9 Literaturverzeichnis

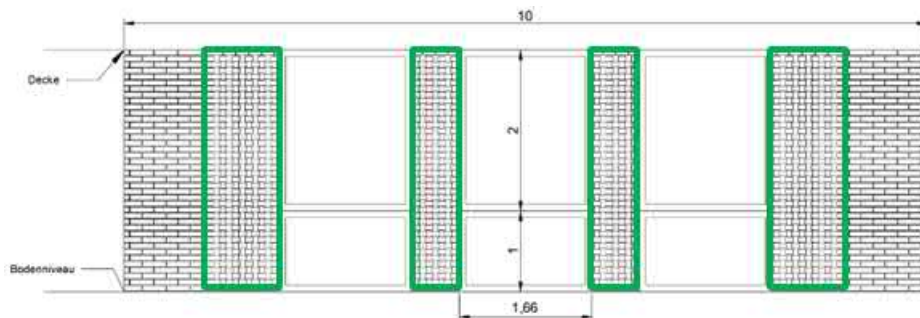
- [1] Thiel D. 1991. Möglichkeiten und Grenzen der natürlichen Nachtkühlung als Mittel zur Kühlung bei der Klimatisierung von Bürogebäuden, Düsseldorf, ISBN 3-18-145419-2. S. 131
- [2] Recknagel, Sprenger, Albers 2019. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Auflage 79. Oldenbourg Verlag München. S. 2800
- [3] SIA-Merkblatt 2023, Lüftung in Wohnbauten, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich. S. 56
- [4] P.A. Favaro, H. Manz 2005. Temperature driven single-sided ventilation through a large rectangular opening, Building and Environment 40, S. 689–699
- [5] I. Ibrahim 2016. Livable Eco-Architecture. Masdar city, Arabian Sustainable city, Procedia - Social and Behavioral Sciences 216. S. 46 – 55
- [6] <https://www.dezeen.com/2015/04/12/mm-architects-tropical-suburb-house-ho-chi-minh-city-brick-palm-tree-leaf-roof/>
- [7] Tall J.-C. 2013. Umubano Primary School. On Site Review Report. S. 18
- [8] Mateus N., Da Graca G.C. 2015. Stack driven ventilative cooling for schools in mild climates: analysis of two case studies. IEA-EBC Annex 62 Ventilative Cooling. S. 11
- [9] S. Álvarez, L.F. Cabeza, A. Ruiz-Pardo, A. Castell, J.A. Tenorio 2013. Building integration of PCM for natural cooling of buildings, Appl. Energy 109 S. 514–522
- [10] Y. Xiang, G. Zhou 2015. Thermal performance of a window-based cooling unit using phase change materials combined with night ventilation, Energy Build. 108 S. 267–278
- [11] <https://www.baunetzwissen.de/holz/objekte/kultur-bildung/landwirtschaftliches-zentrum-st-gallen-in-salez-7305470>
- [12] Settembrini, G. et al., 2017. KlimaBau – Planen angesichts des Klimawandels. Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 172 pp. <https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=46167&Load=true>
- [13] DUCO Ventilation & Sun Control. Lüftungsgitterkatalog. <https://www.rotex-metallbauteile.ch/files/Download/duco-lueftungsgitter-katalog.pdf>
- [14] Seppänen, O., Fisk, W. J., Lei, Q.H. Room Temperature and Productivity in Office Work. Proceedings «Healthy Buildings Conference». 2006. 6 pp. <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-60952.pdf>

# 10 Anhang

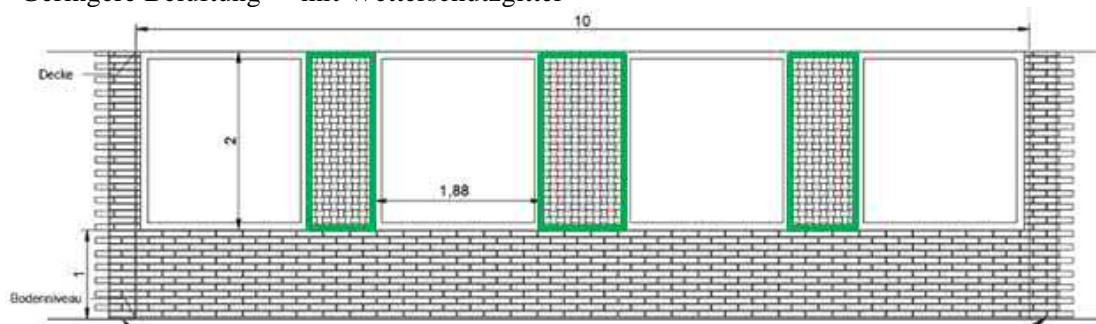
## 10.1 Architektonische Skizzen der Lüftungsöffnungen mit dem Hinweis auf die «Belüftungskategorie»

### 10.1.1 Raumtyp «Schulzimmer»

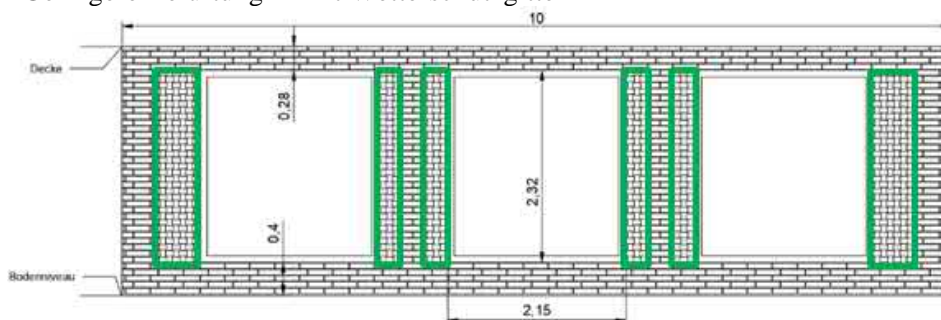
1. Raumhohe Lüftungsöffnungen  
«Starke Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Mittlere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter



2. Lüftungsöffnungen im Fensterband  
«Mittlere Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Geringere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

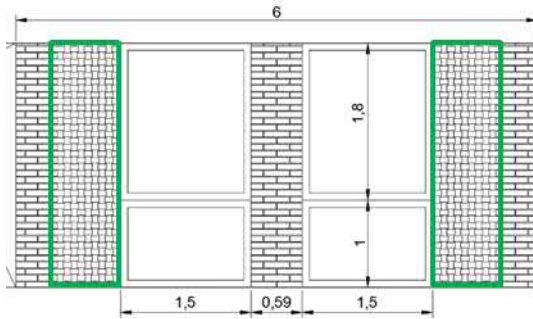


3. Lüftungsöffnungen in Lochfassade  
«Mittlere Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Geringere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

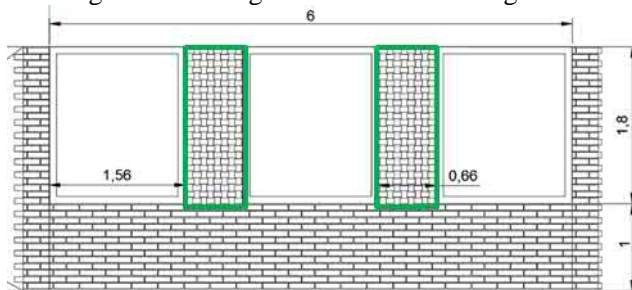


## 10.1.2 Raumtyp «Gruppenbüro»

1. Raumhohe Lüftungsöffnungen  
«Starke Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Mittlere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

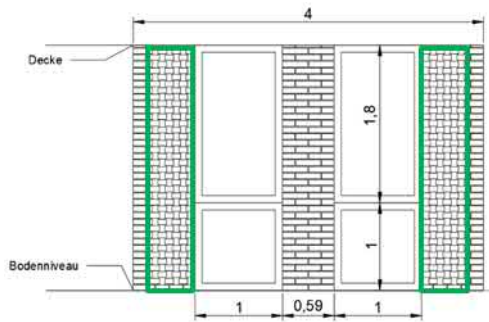


2. Lüftungsöffnungen im Fensterband  
«Mittlere Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Geringere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

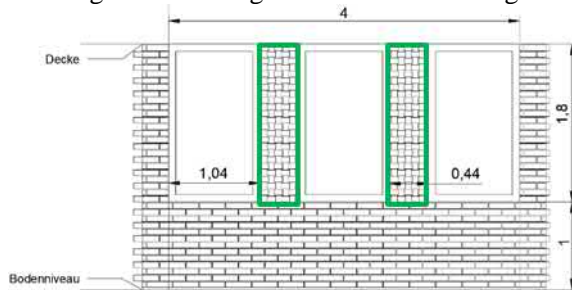


### 10.1.3 Raumtyp «Sitzungszimmer»

1. Raumhohe Lüftungsöffnungen  
«Starke Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Mittlere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

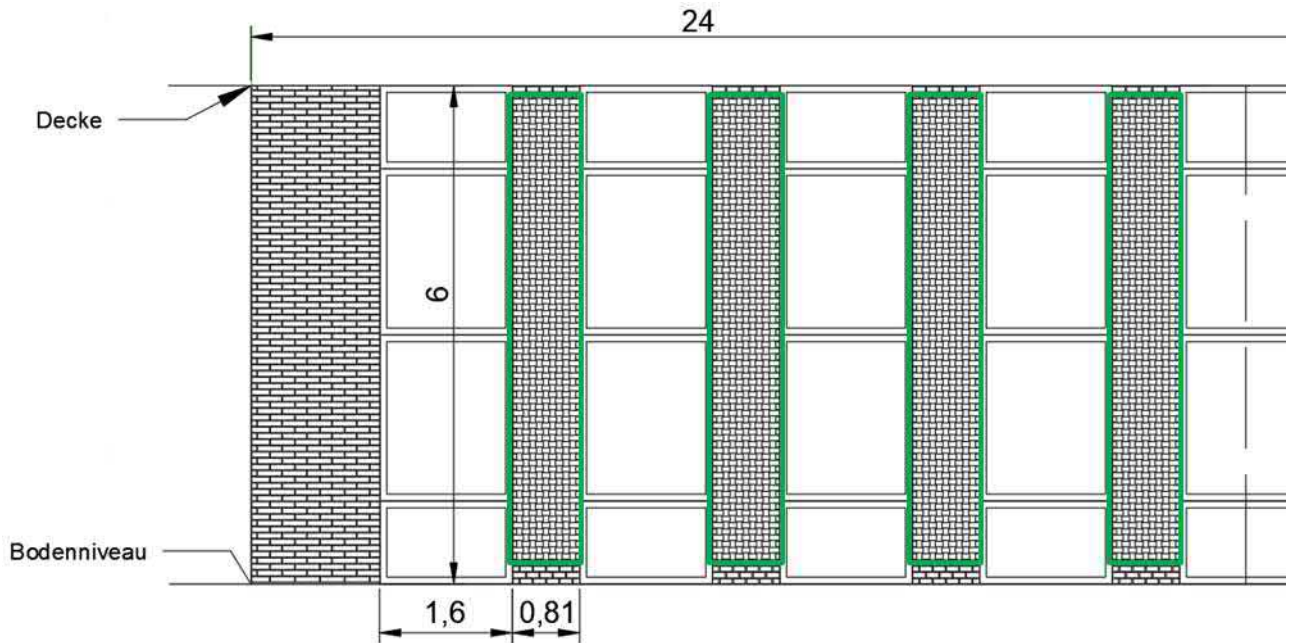


2. Lüftungsöffnungen im Fensterband  
«Mittlere Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Geringere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

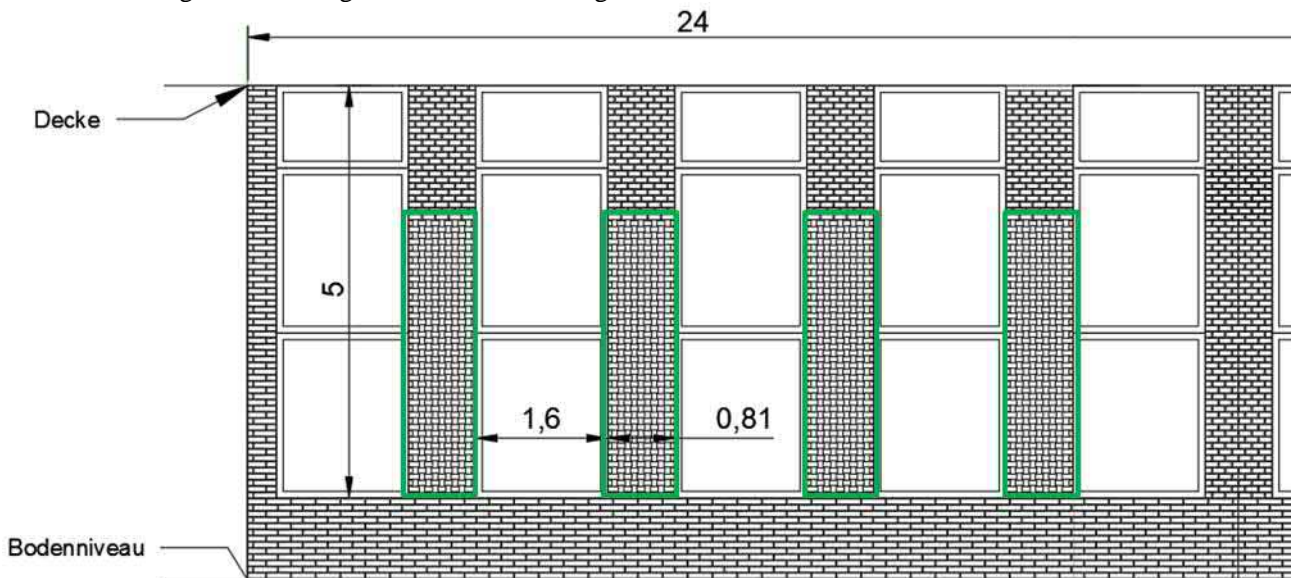


### 10.1.4 Raumtyp «Mehrzwecksaal»

1. Raumhohe Lüftungsöffnungen  
«Starke Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Mittlere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

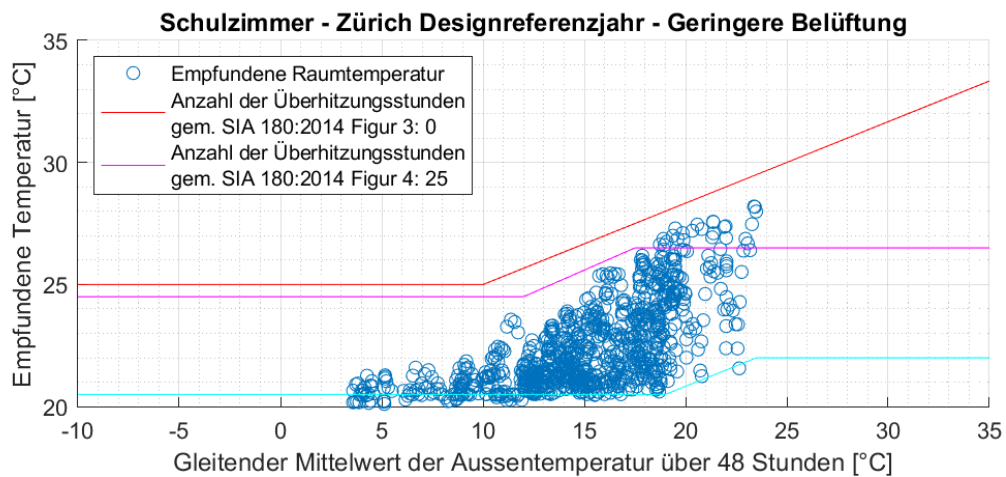
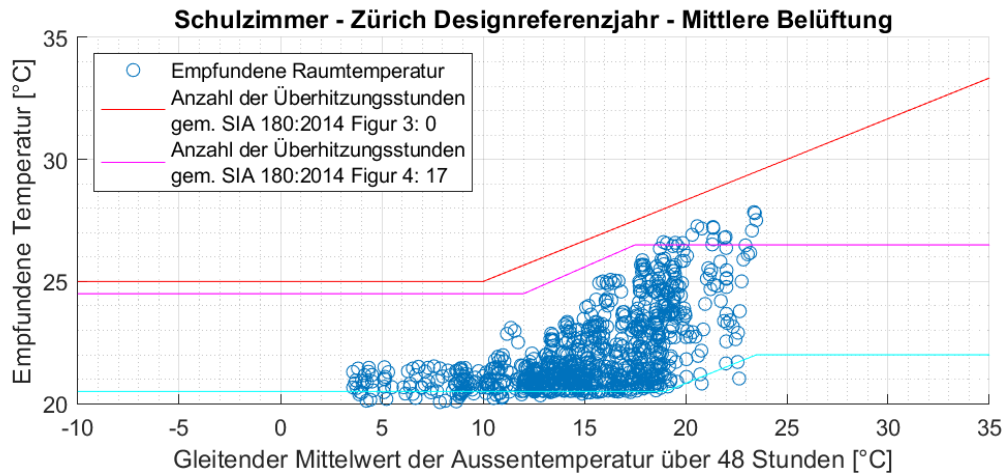
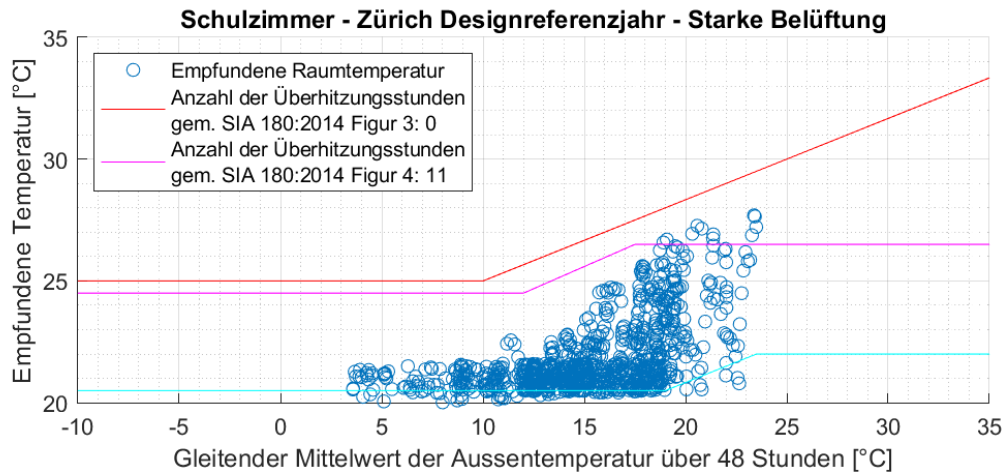


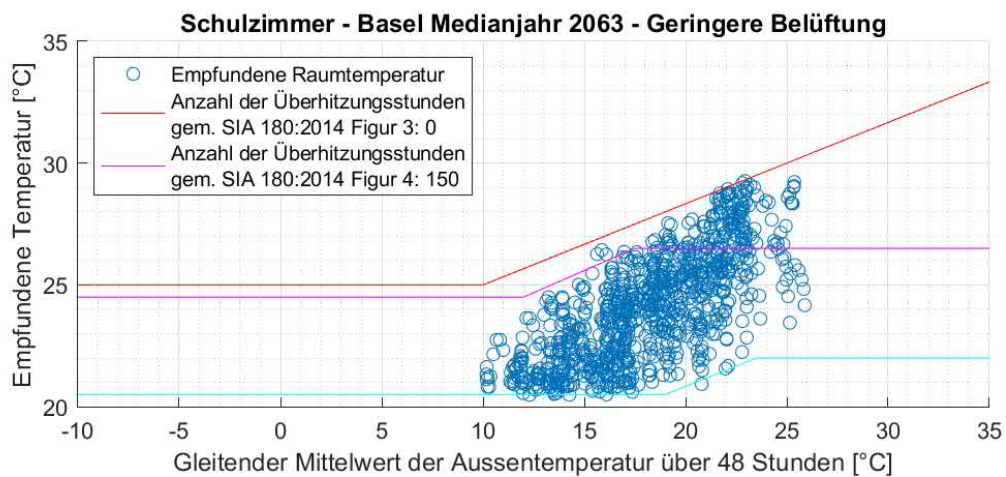
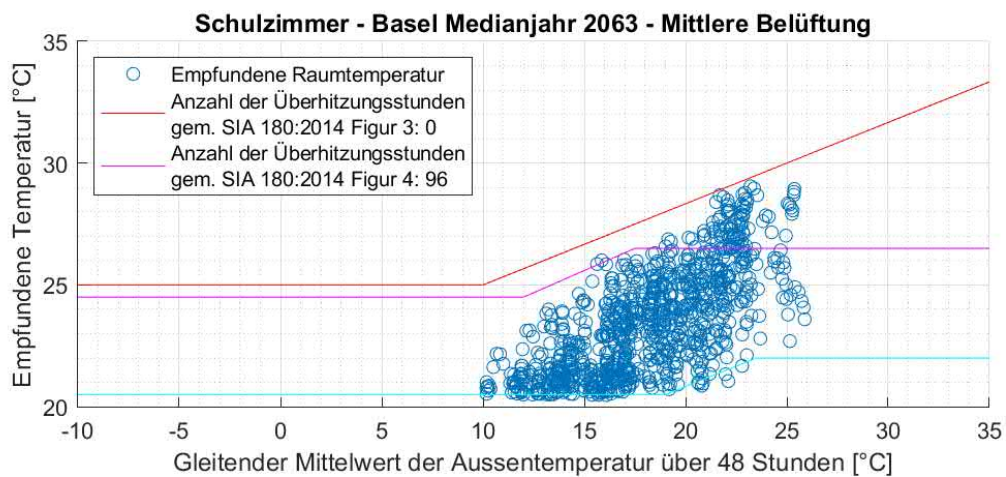
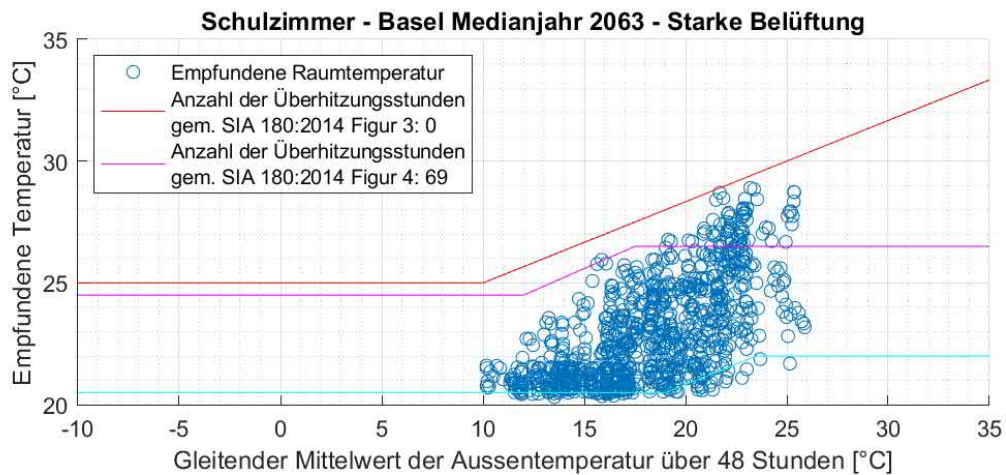
2. Lüftungsöffnungen im Fensterband  
«Mittlere Belüftung» - ohne Wetterschutzgitter  
«Geringere Belüftung» - mit Wetterschutzgitter

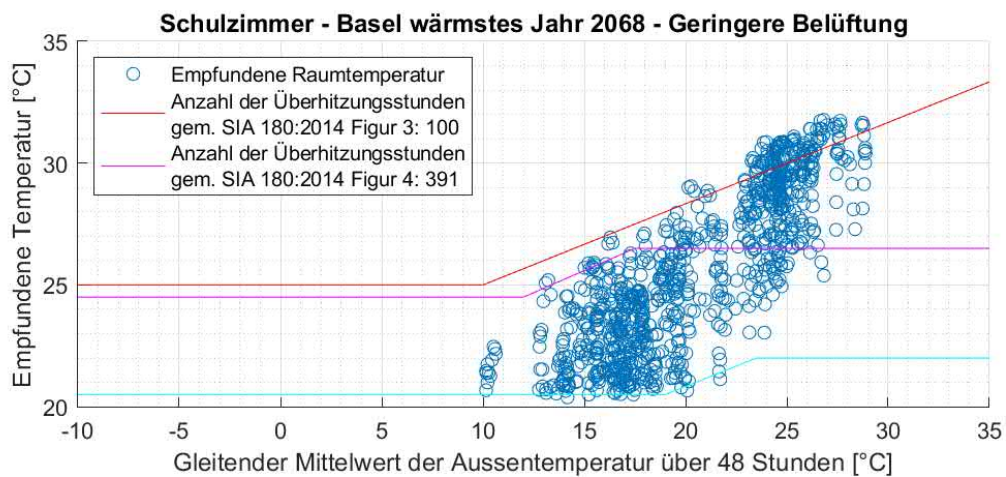
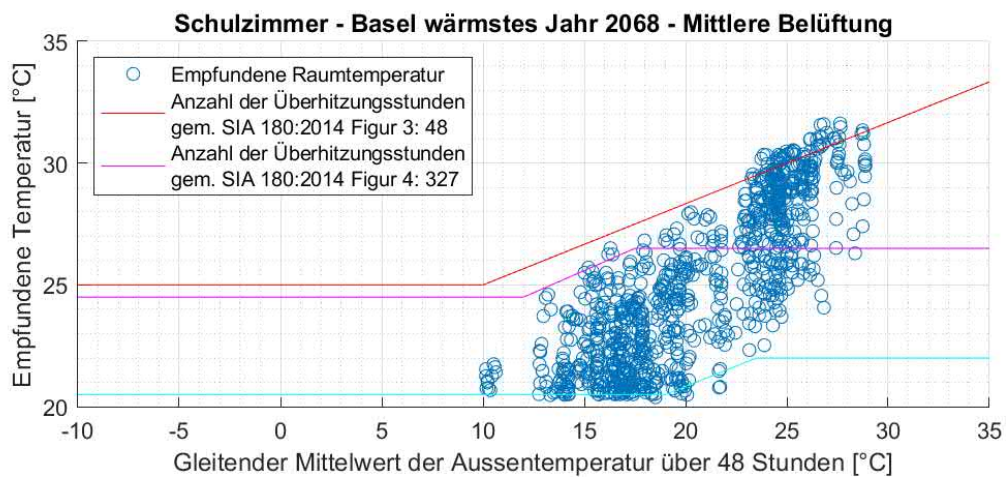
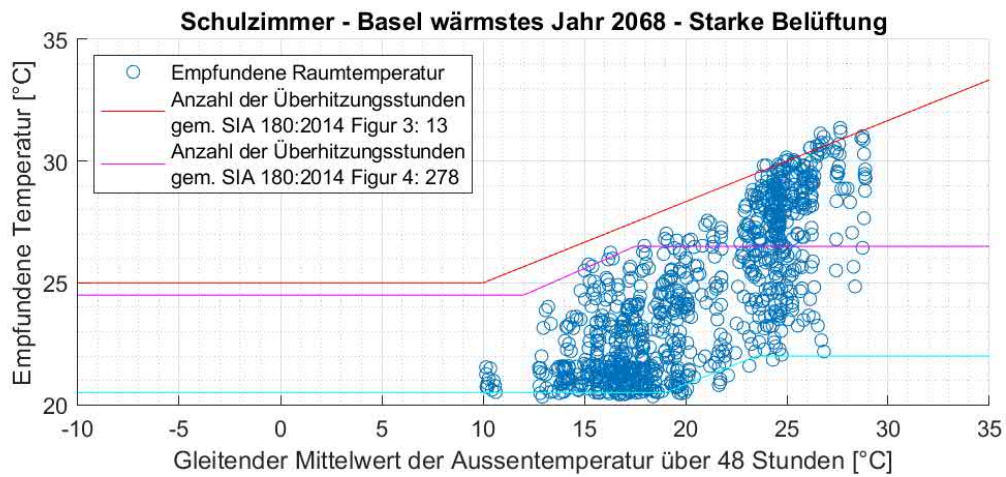


## 10.2 Auswertung nach SIA 180:2014

### 10.2.1 Raumtyp «Schulzimmer»

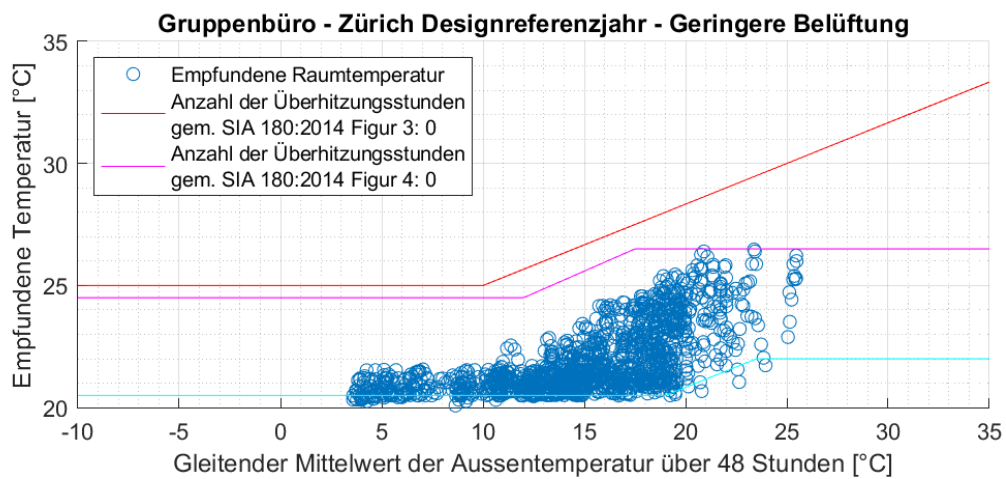
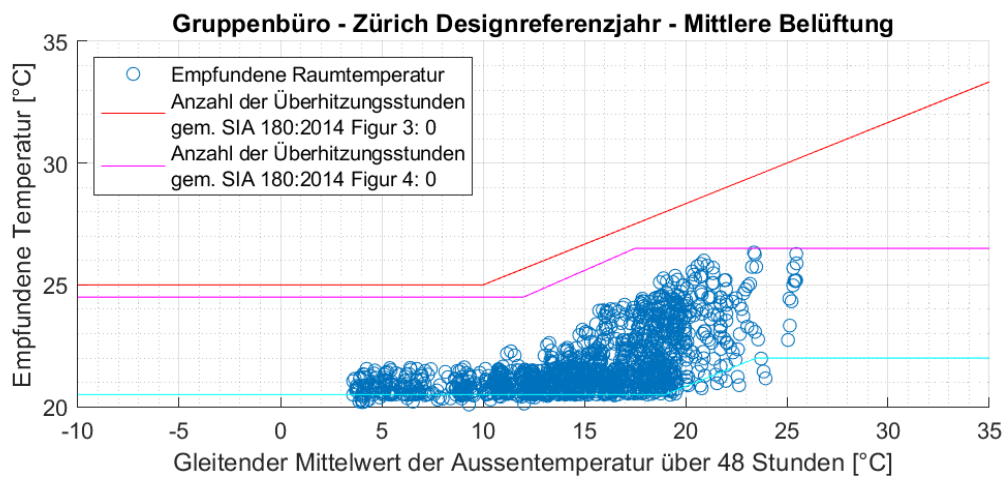
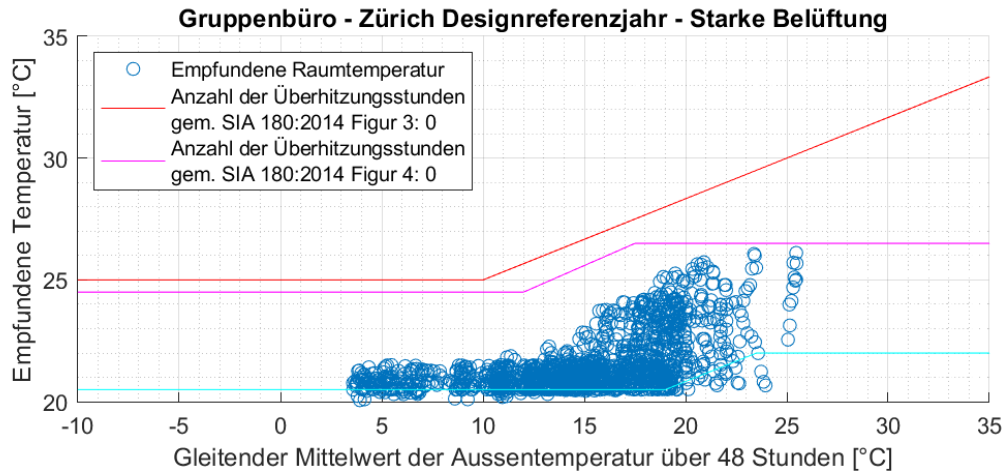


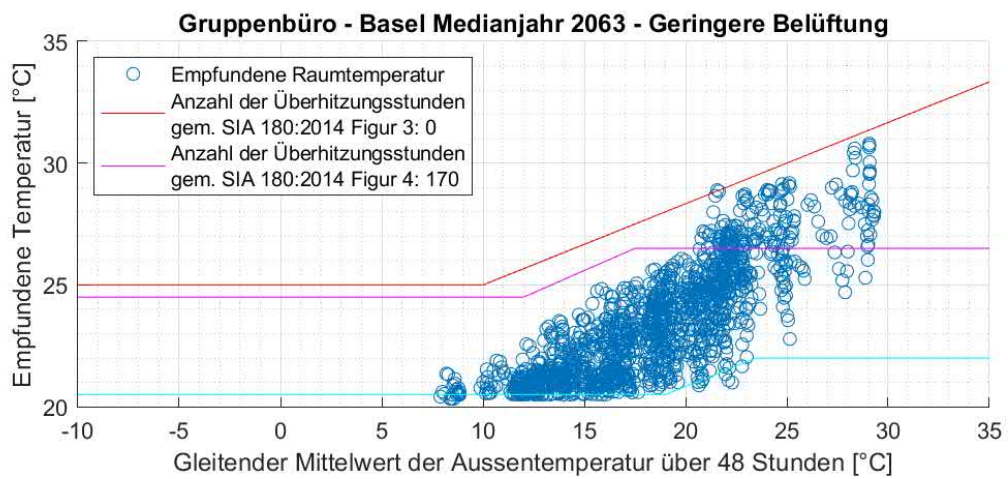
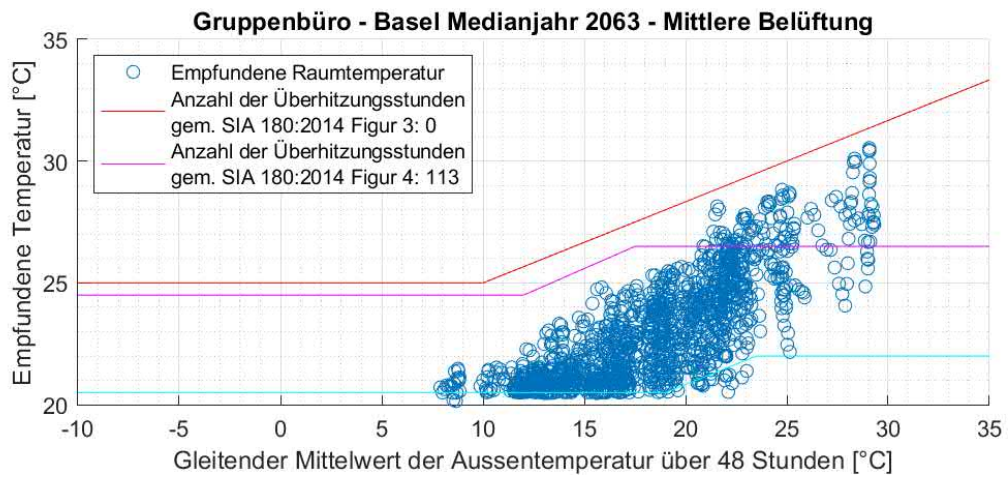
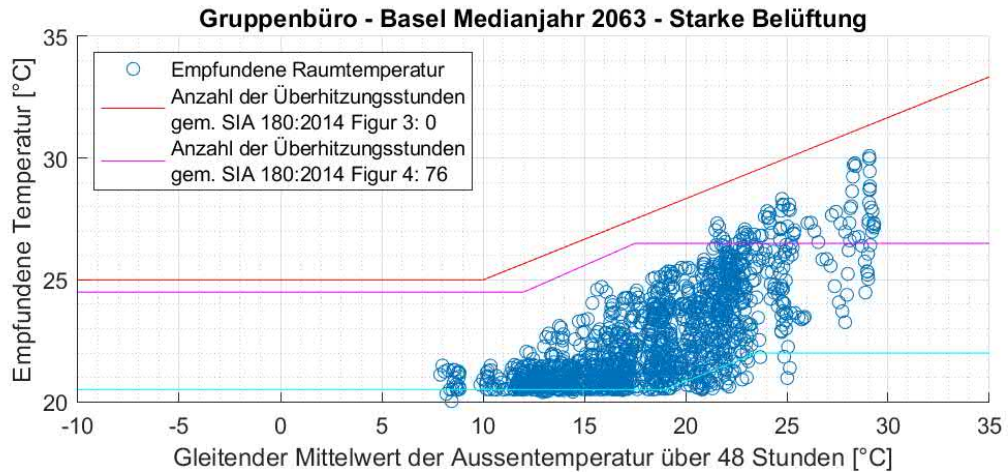


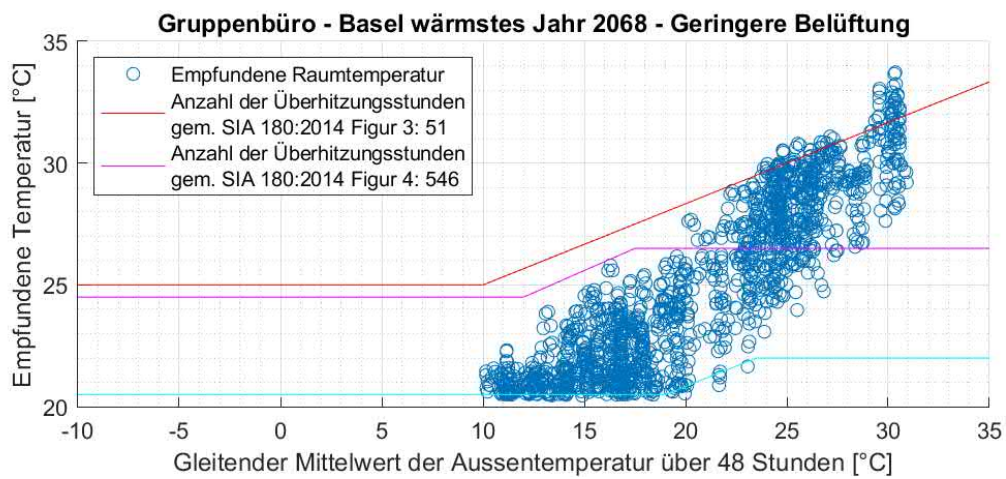
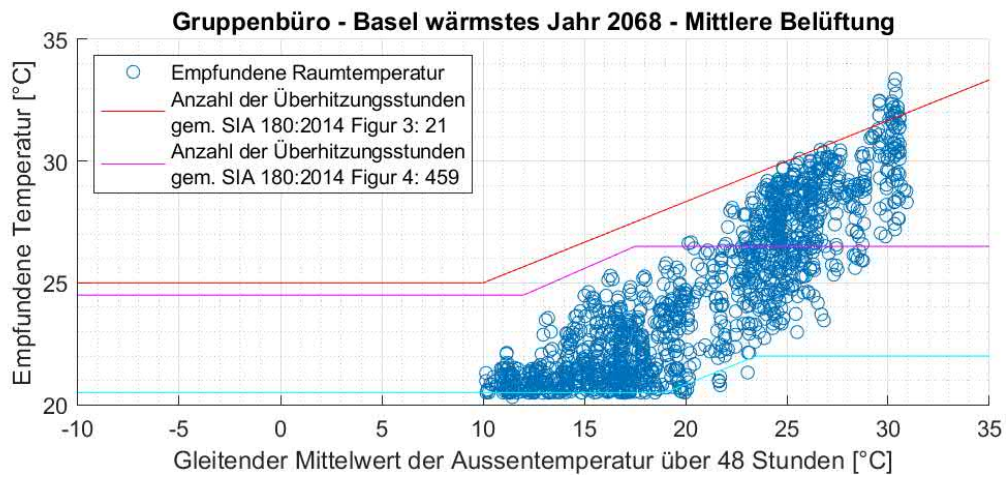
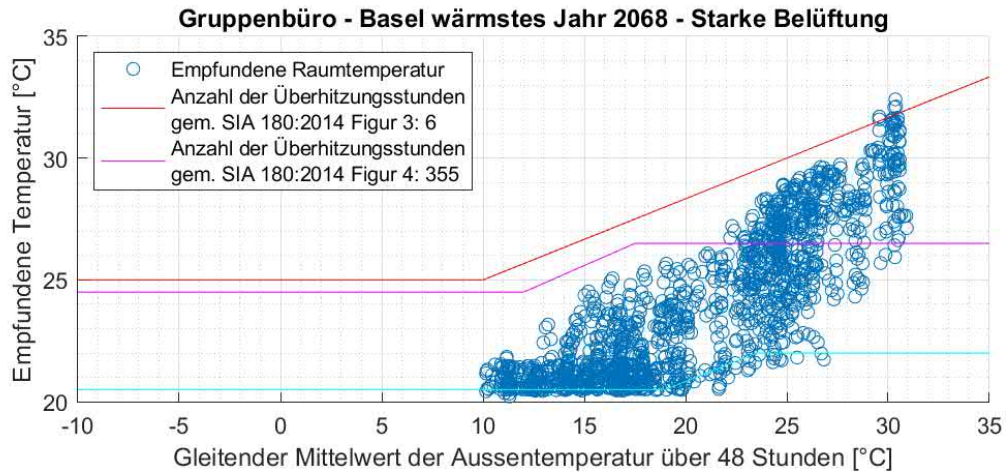




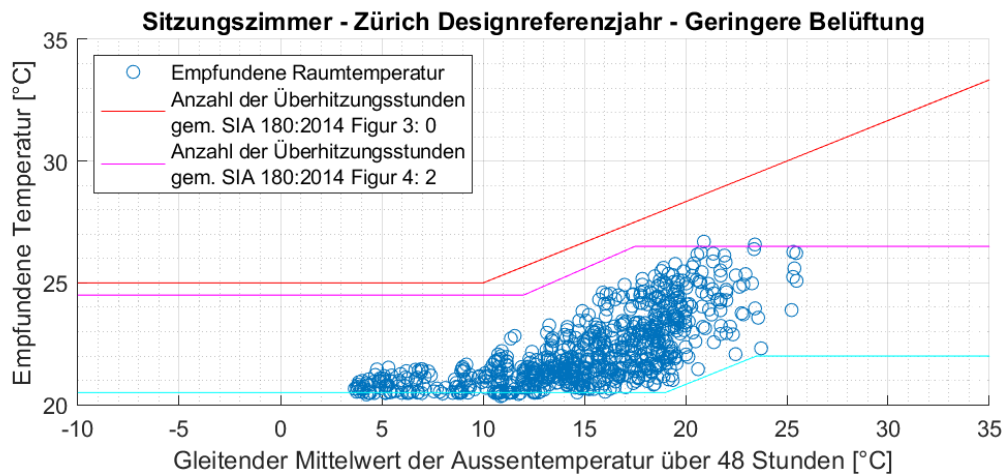
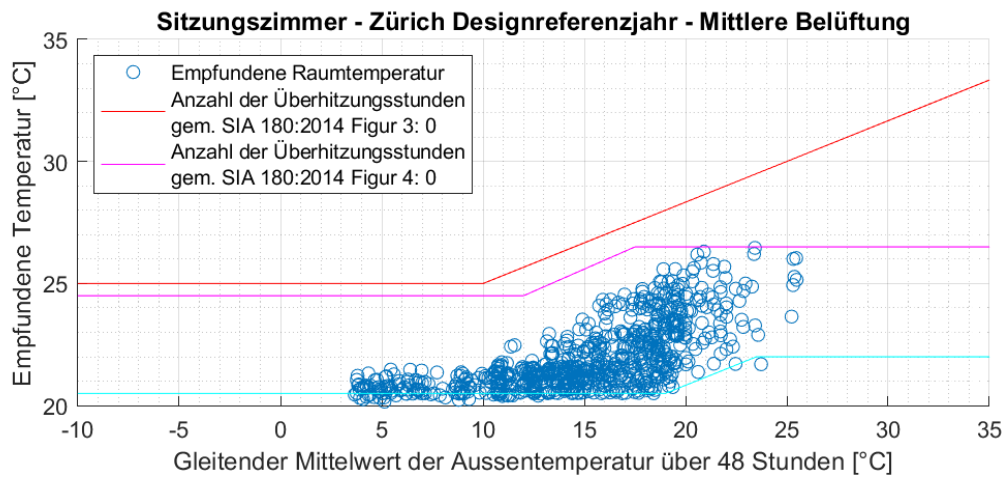
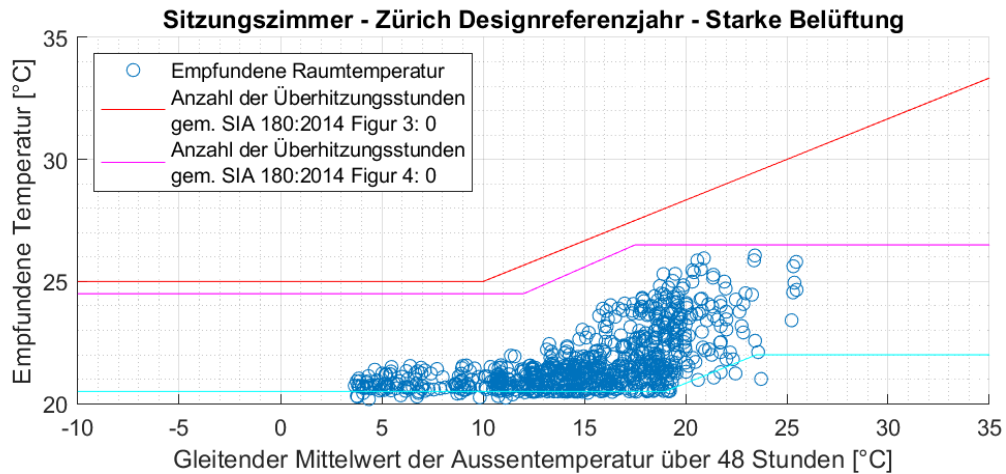
## 10.2.2 Raumtyp «Gruppenbüro»

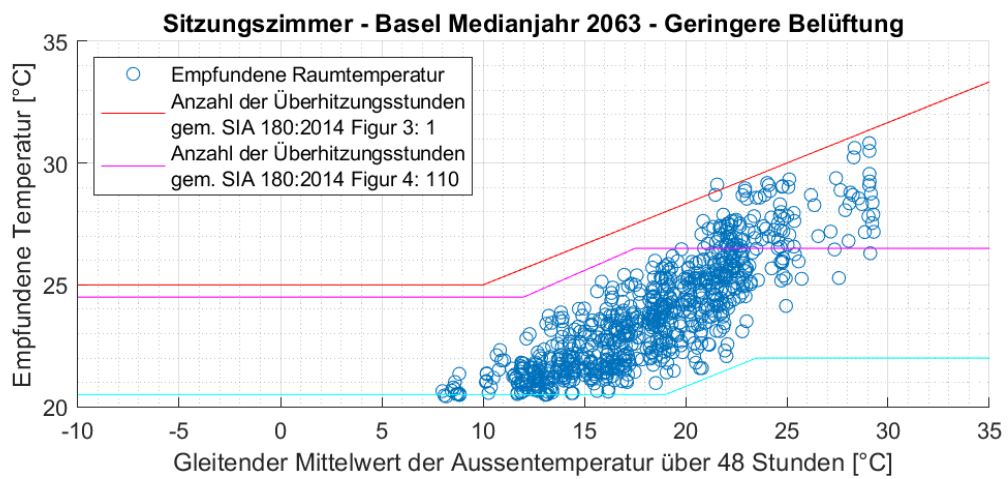
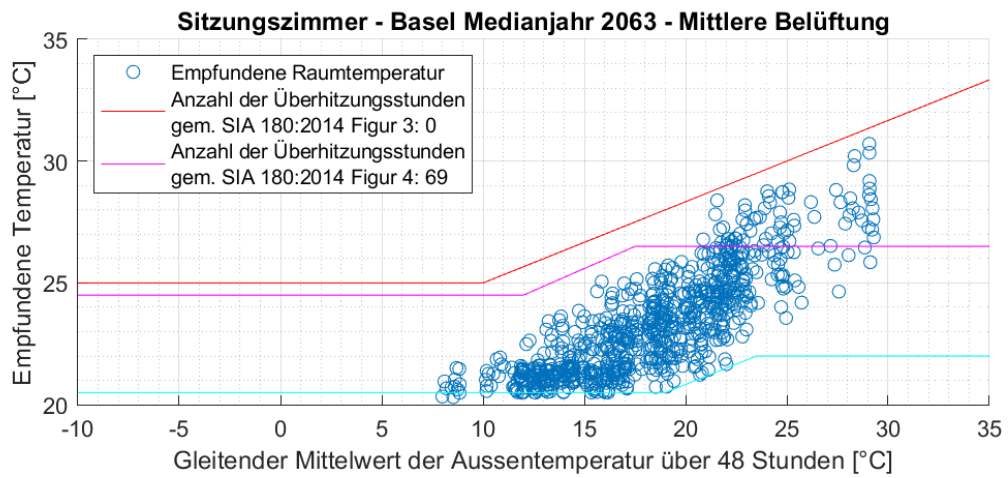
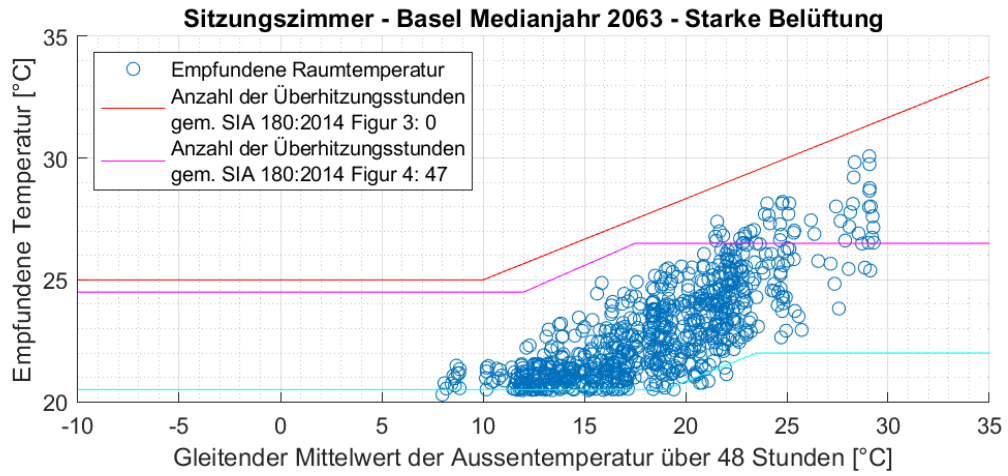


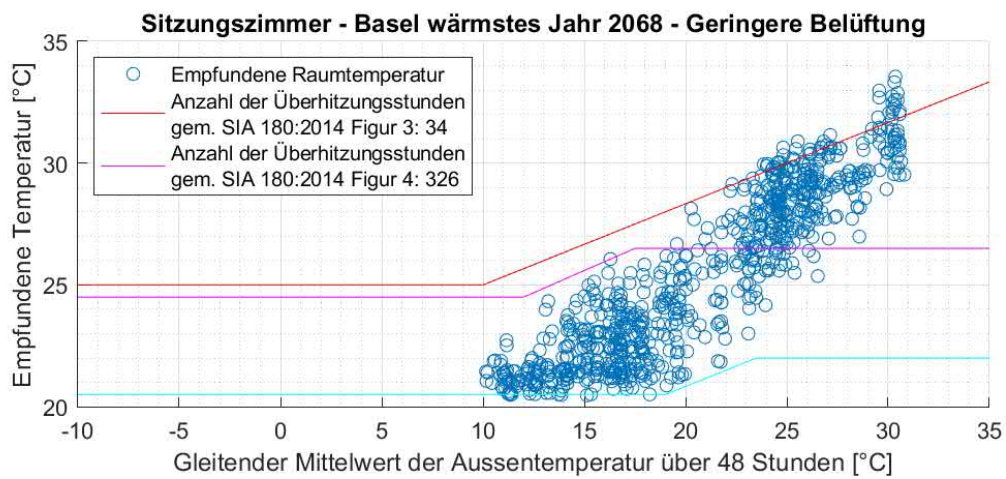
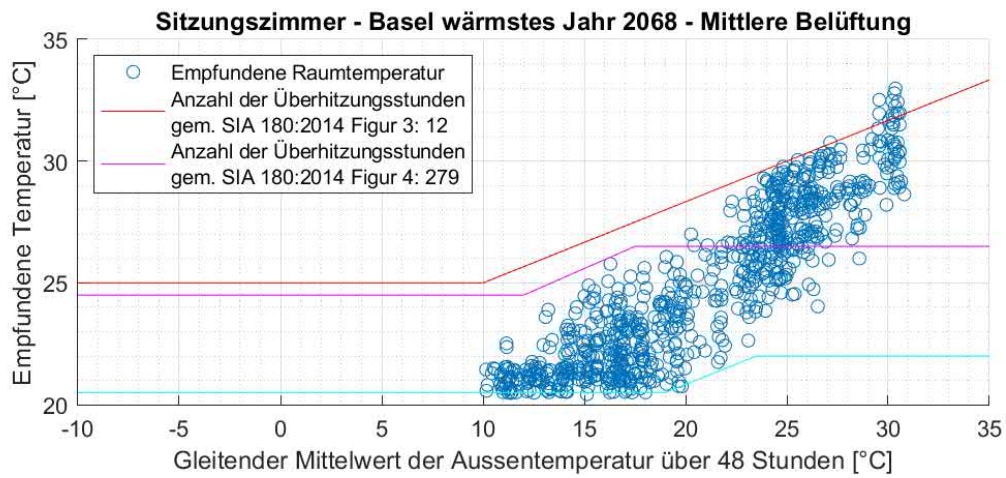
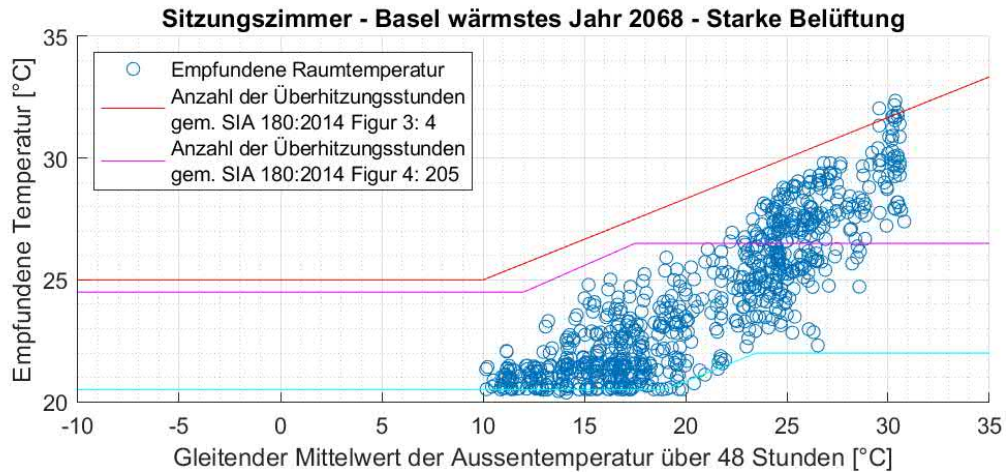




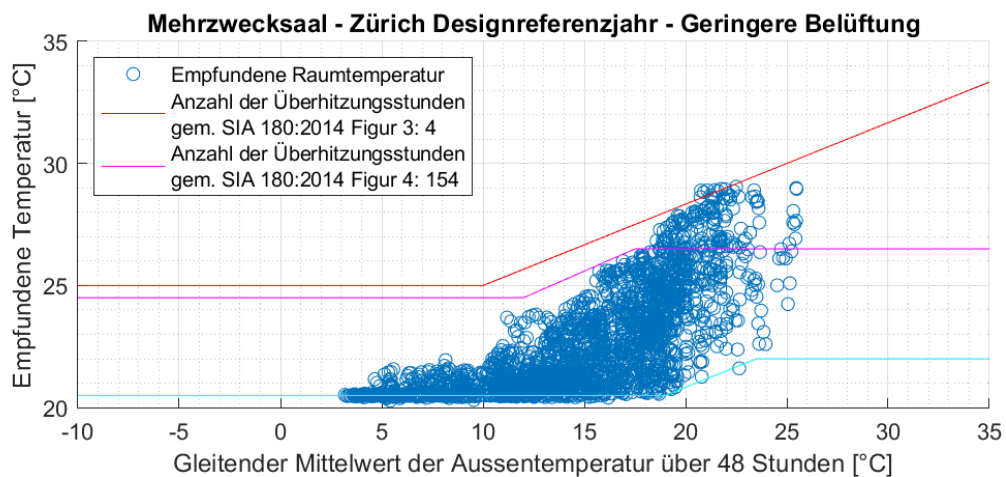
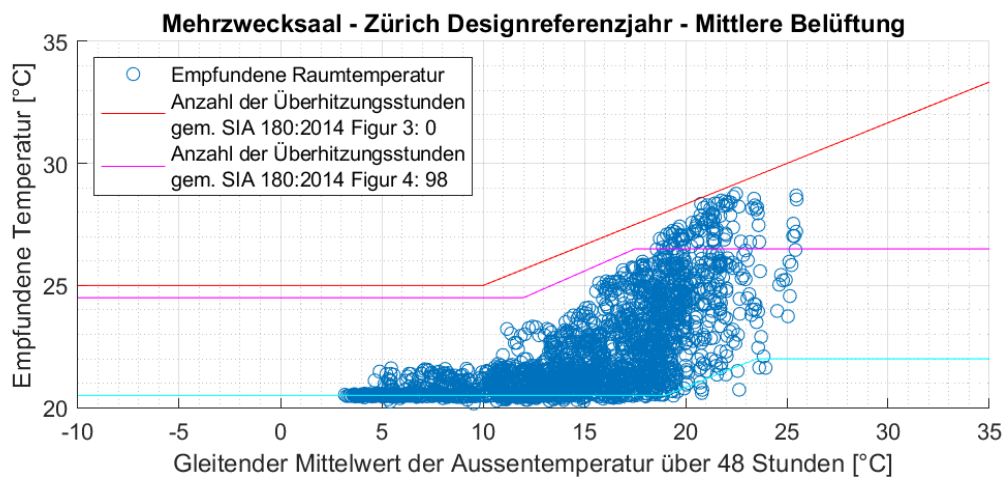
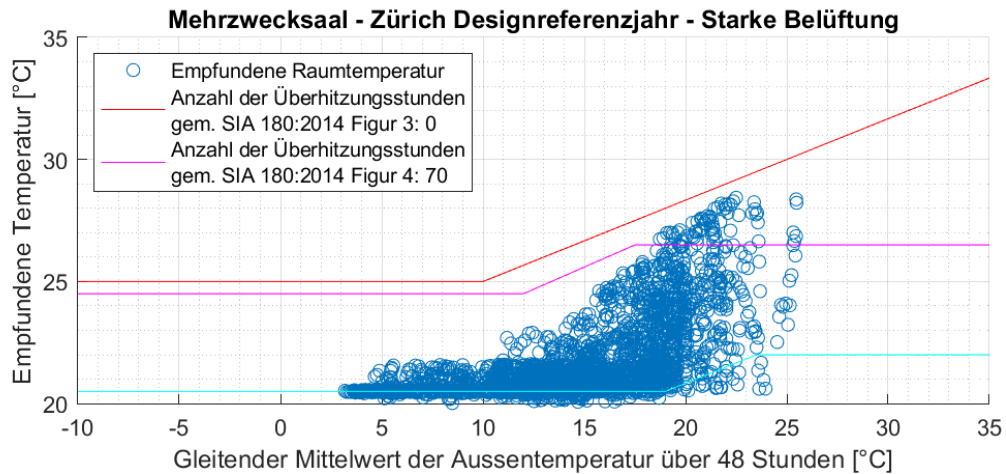
### 10.2.3 Raumtyp «Sitzungszimmer»

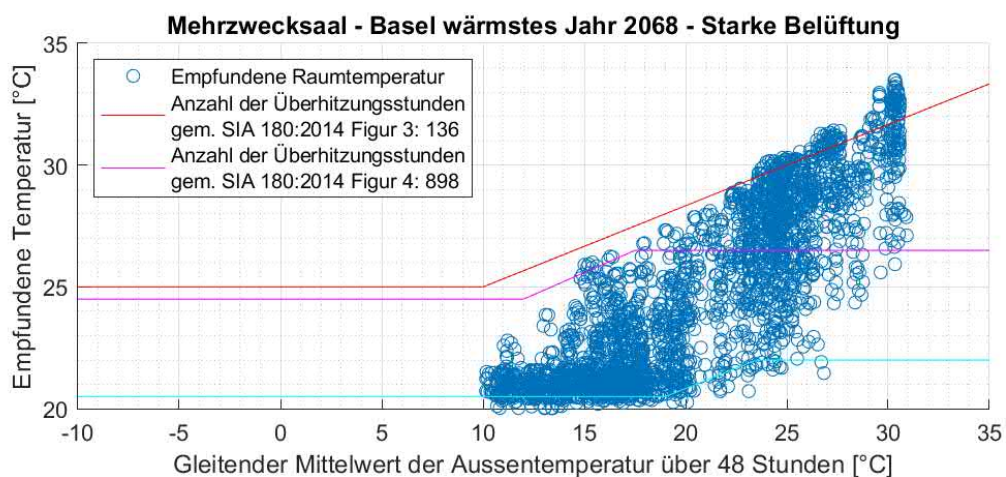
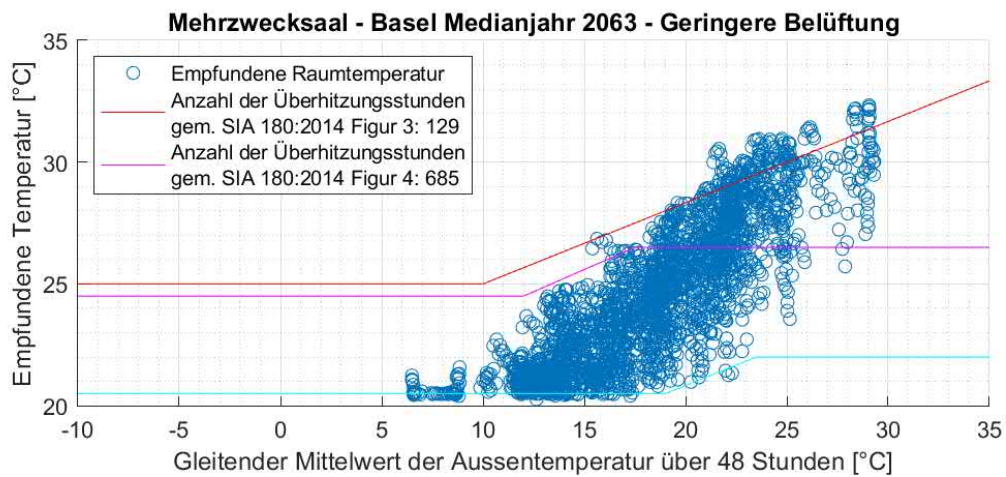
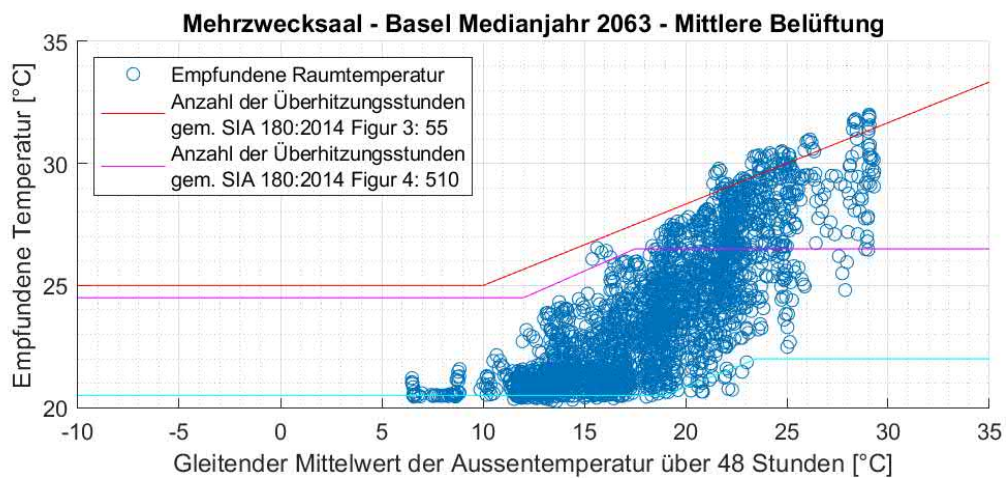
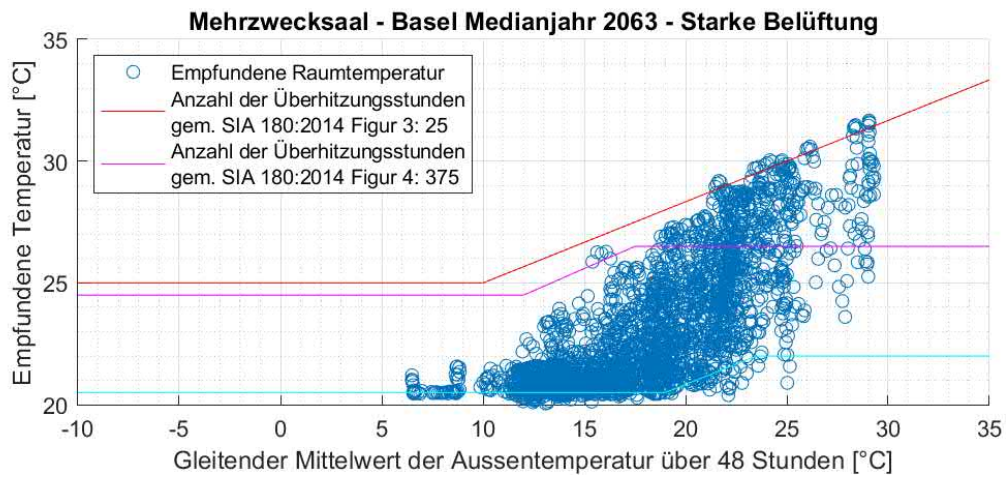




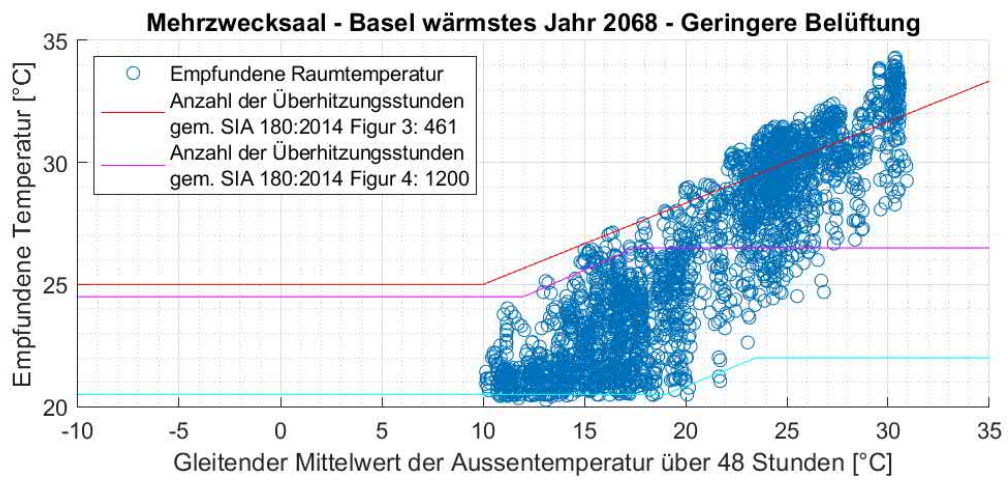
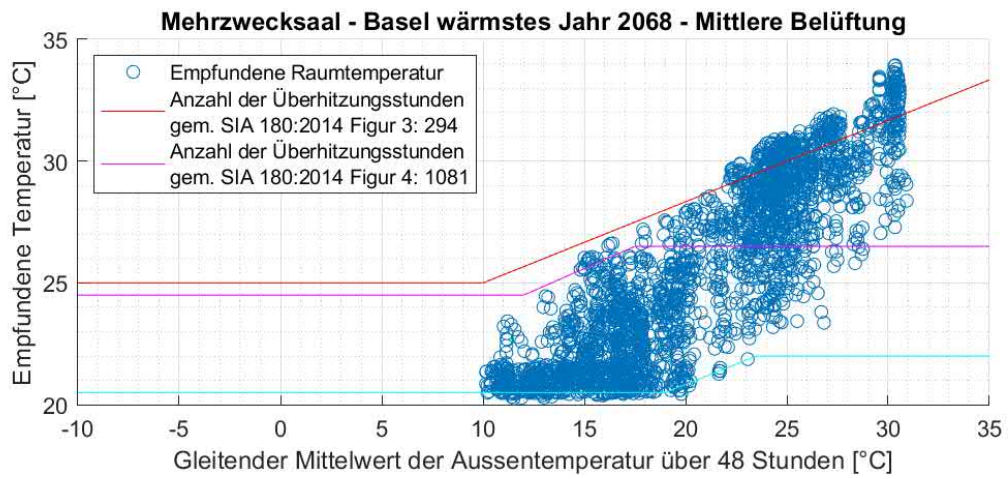


## 10.2.4 Raumtyp «Mehrzwecksaal»



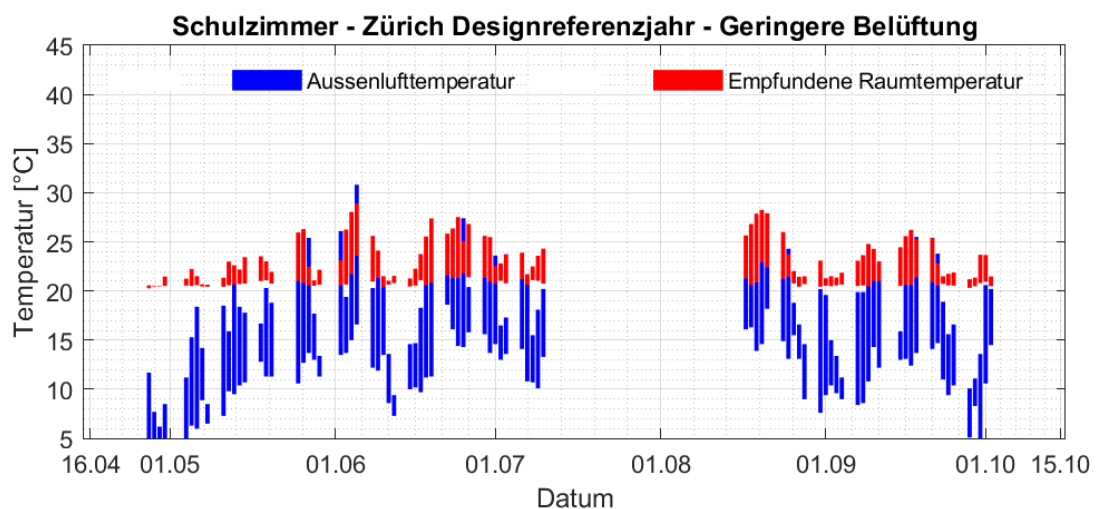
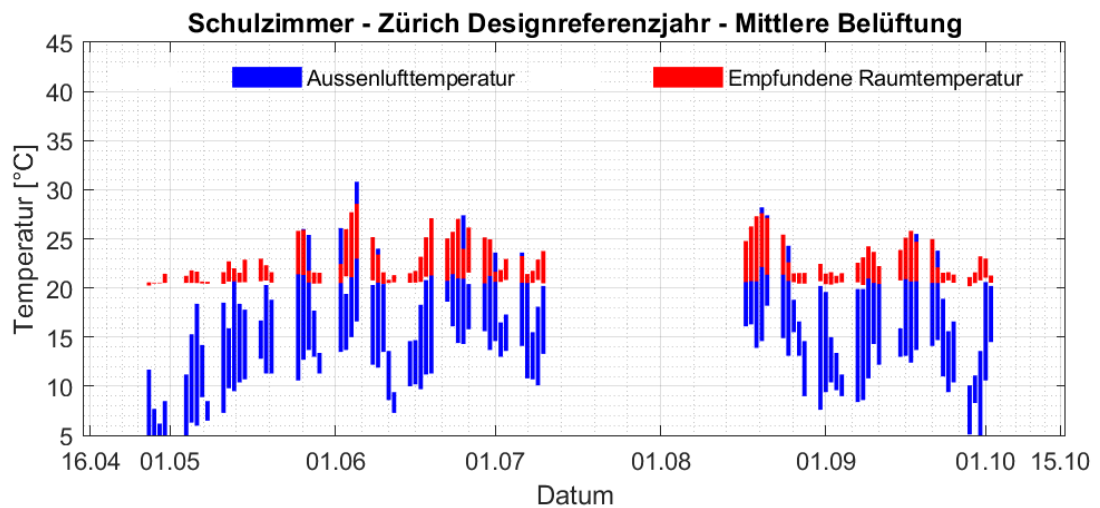
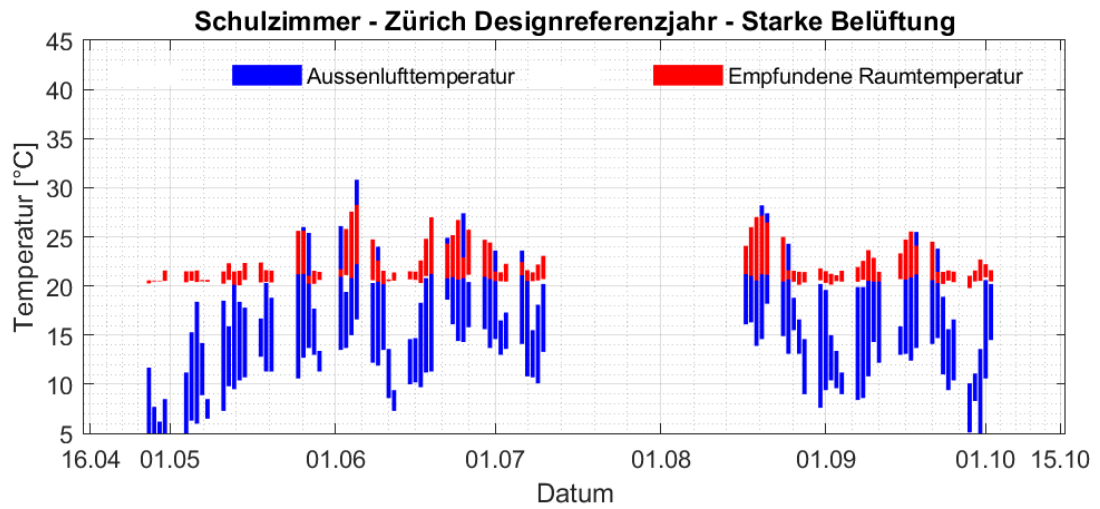


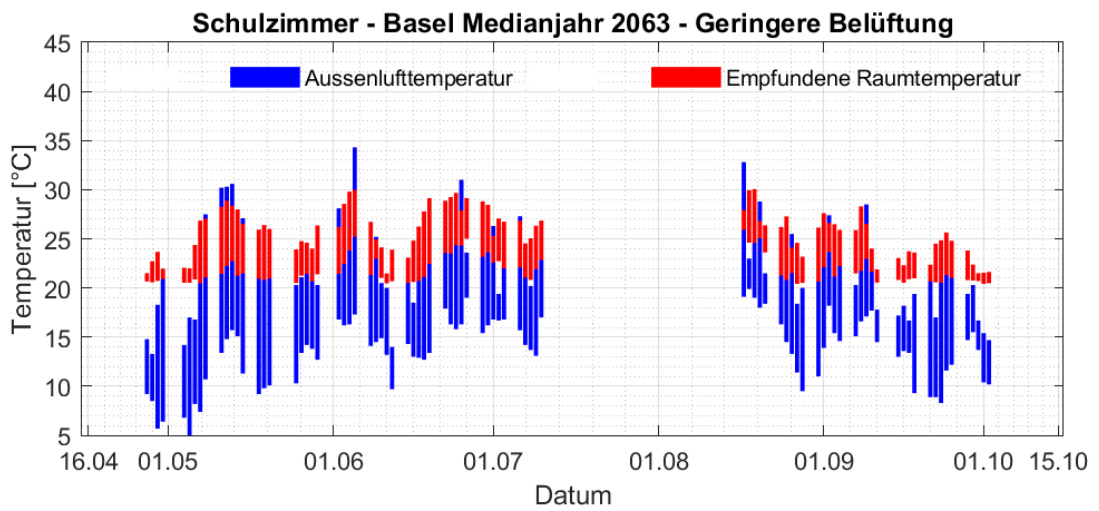
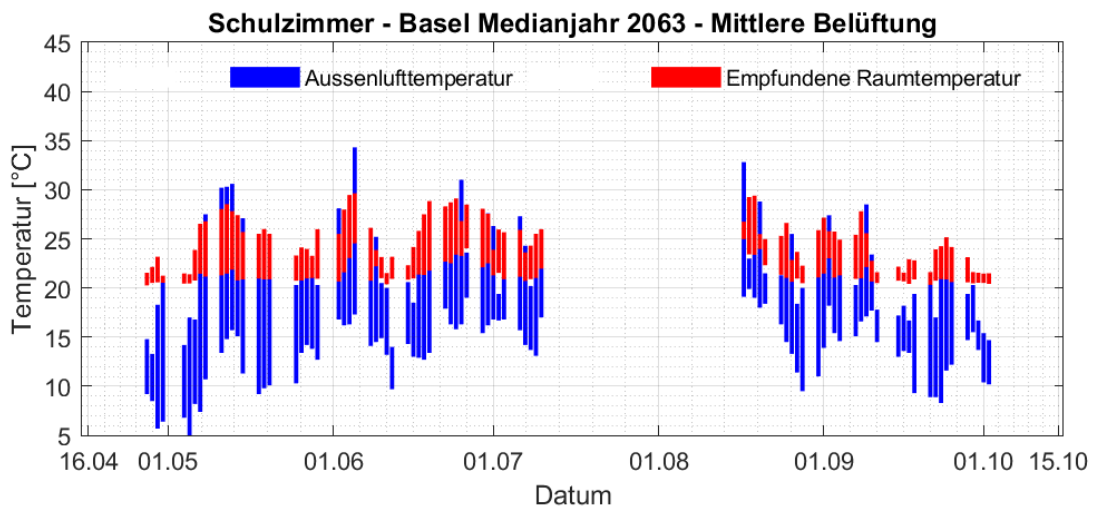
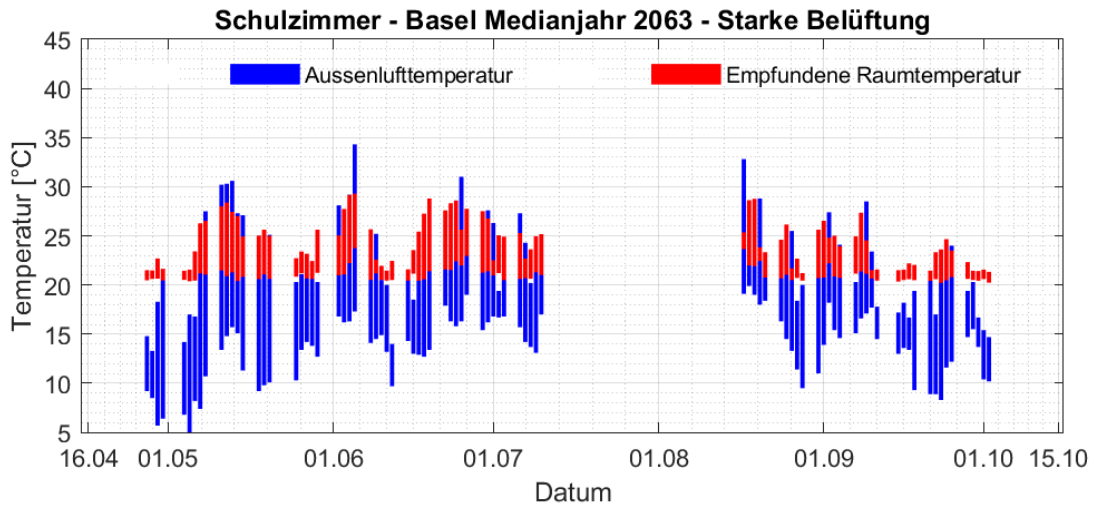


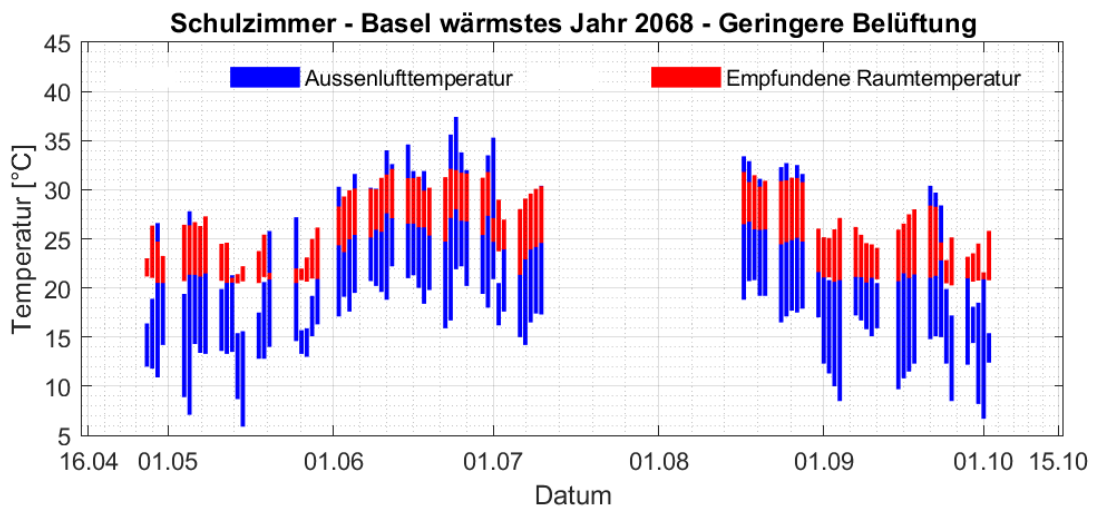
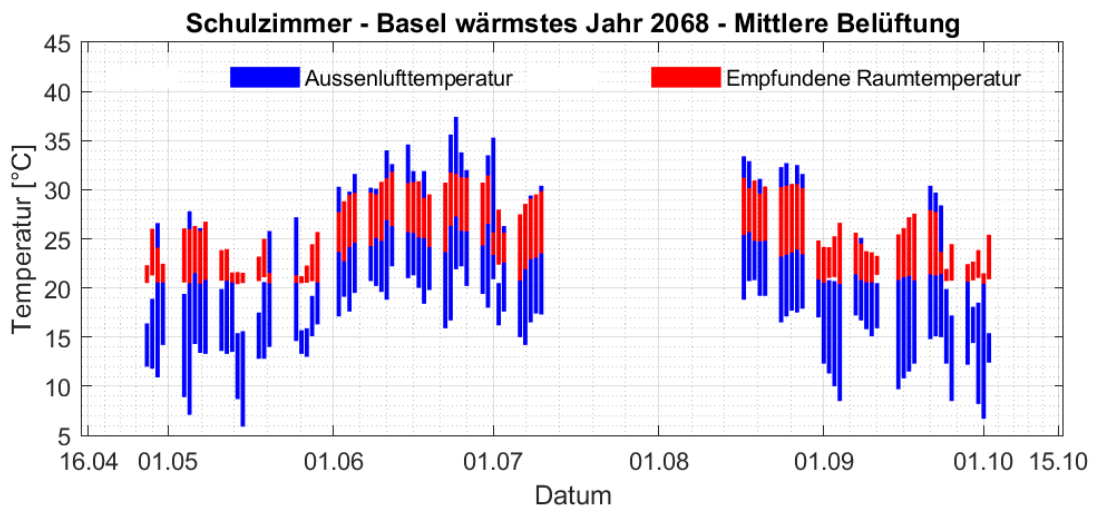
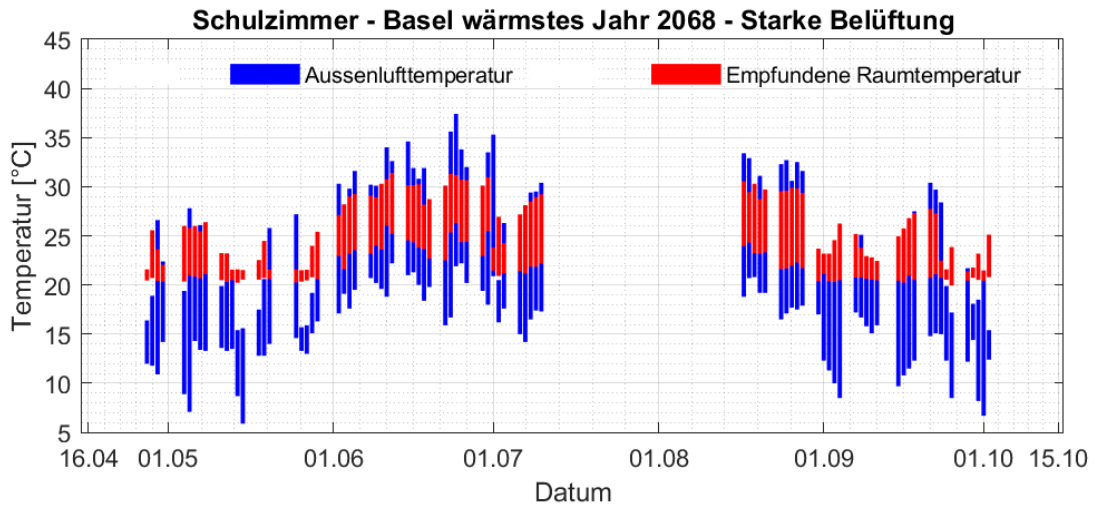


## 10.3 Täglichen Schwankung der Aussentemperatur und Schwankung der Raumtemperatur während der Belegungszeit

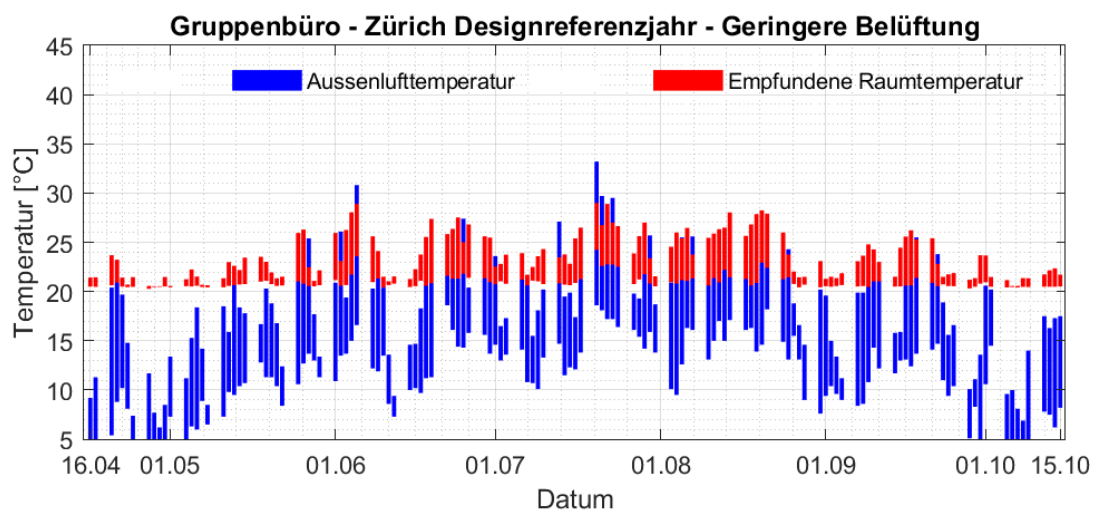
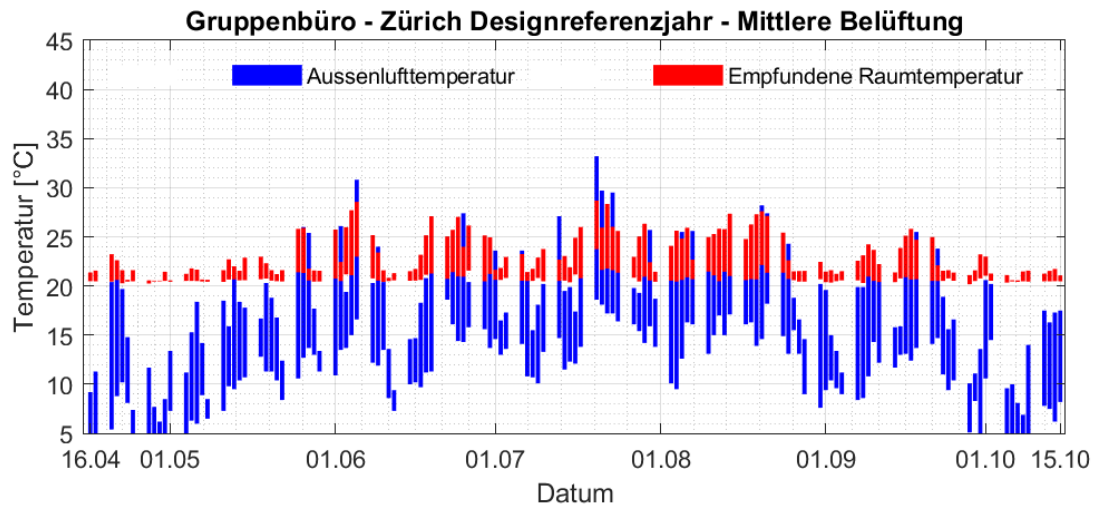
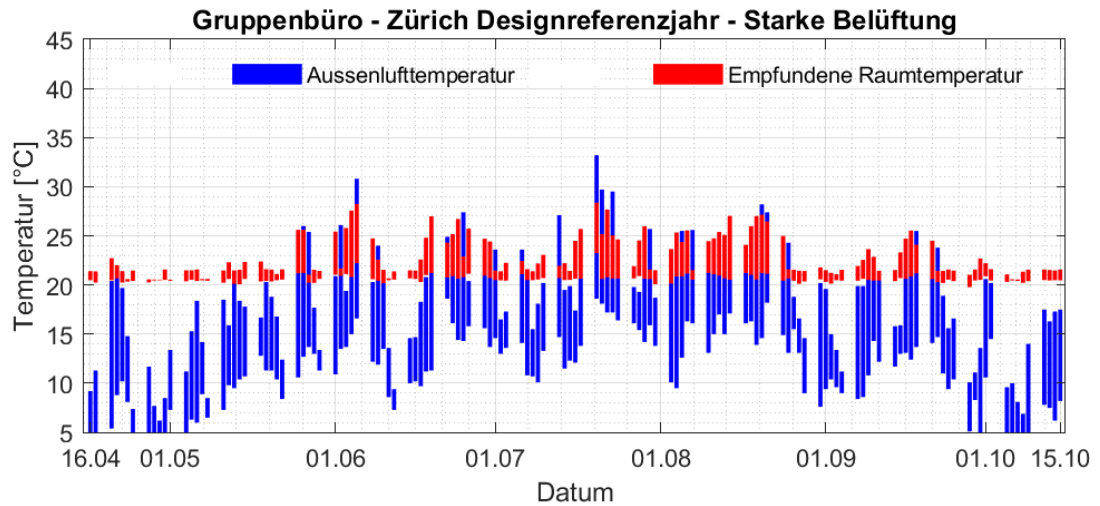
### 10.3.1 Raumtyp «Schulzimmer»

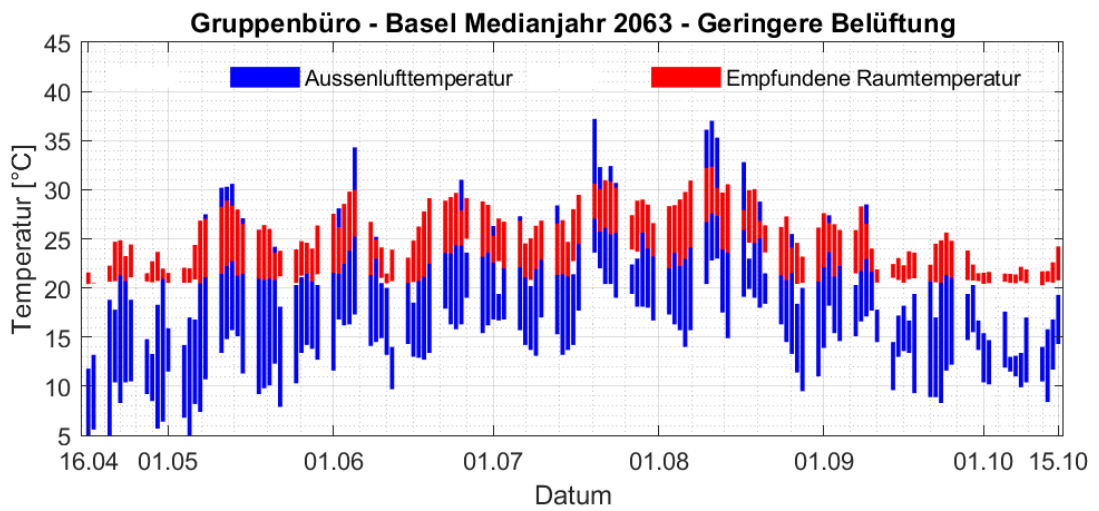
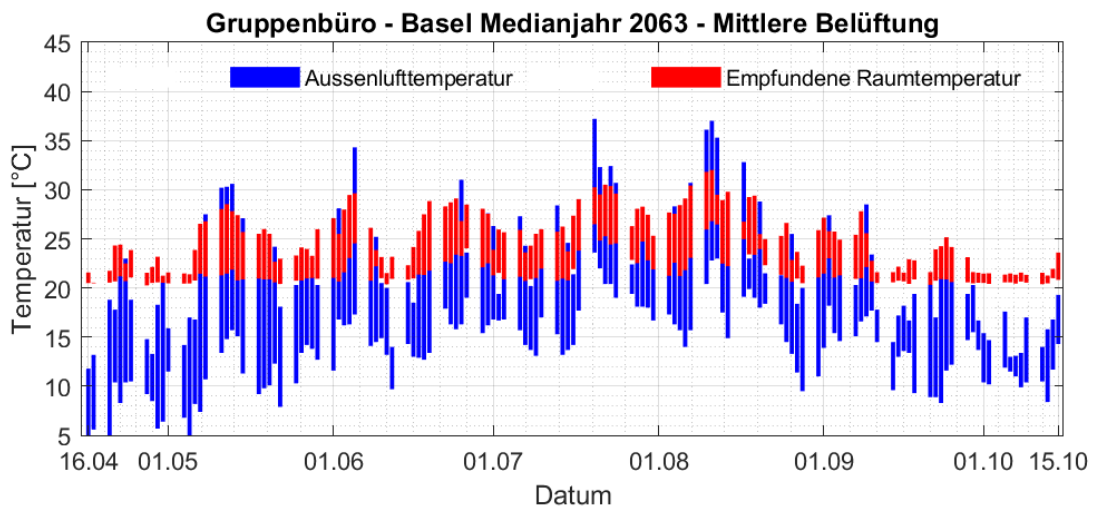
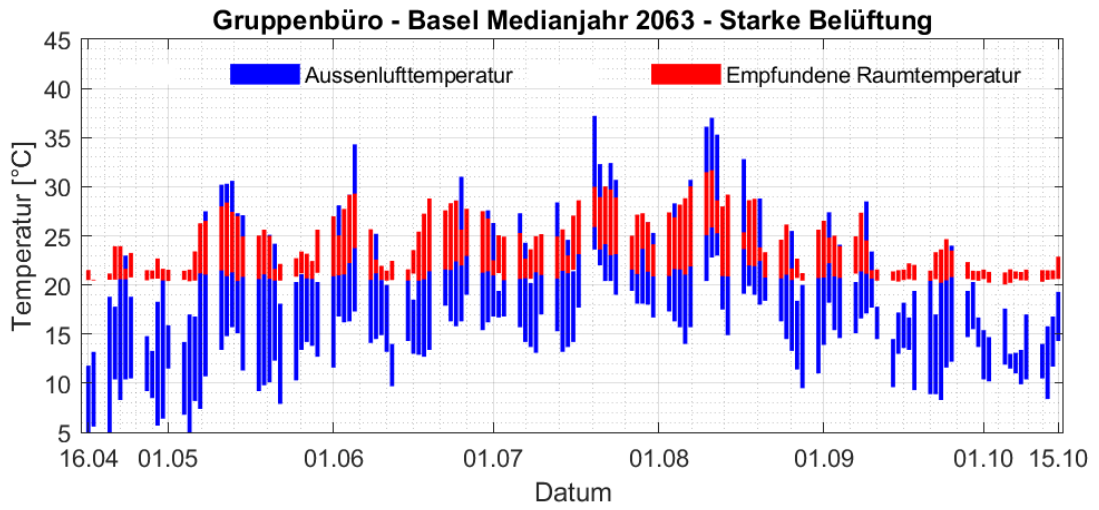


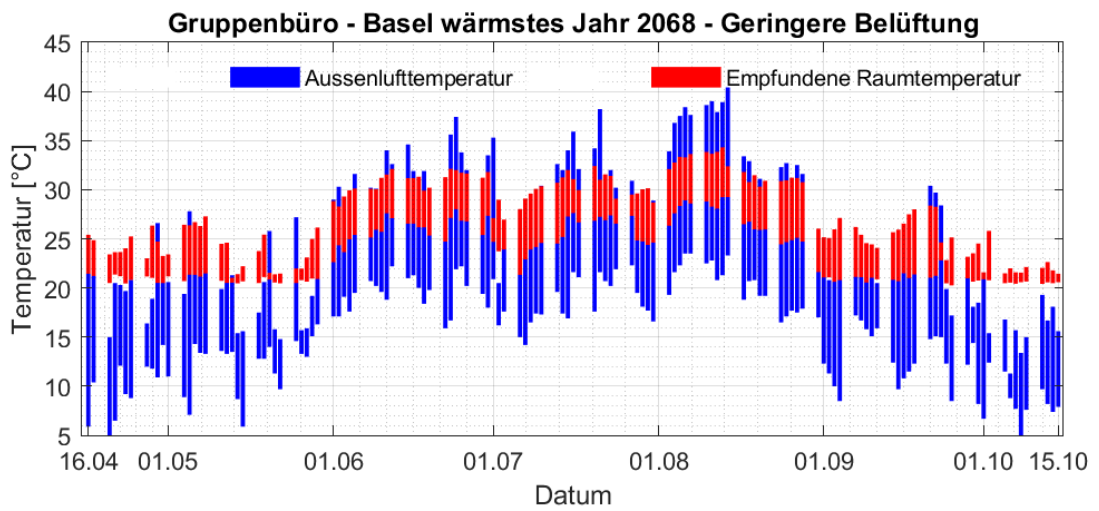
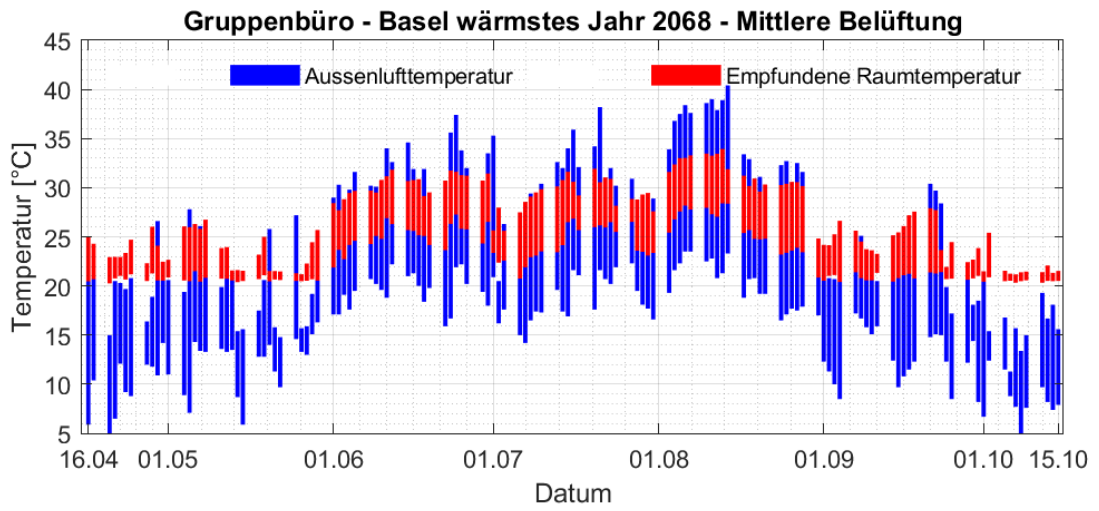
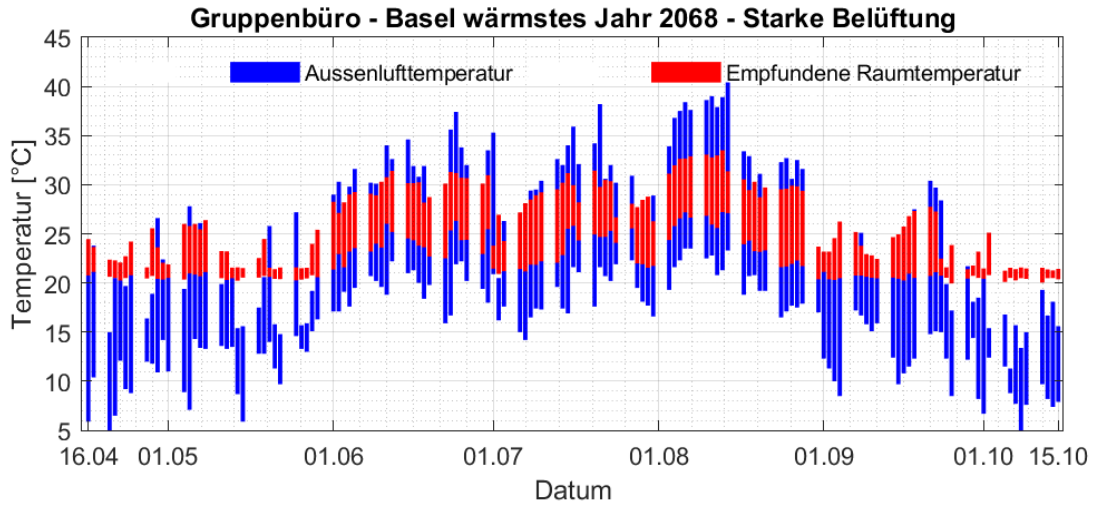




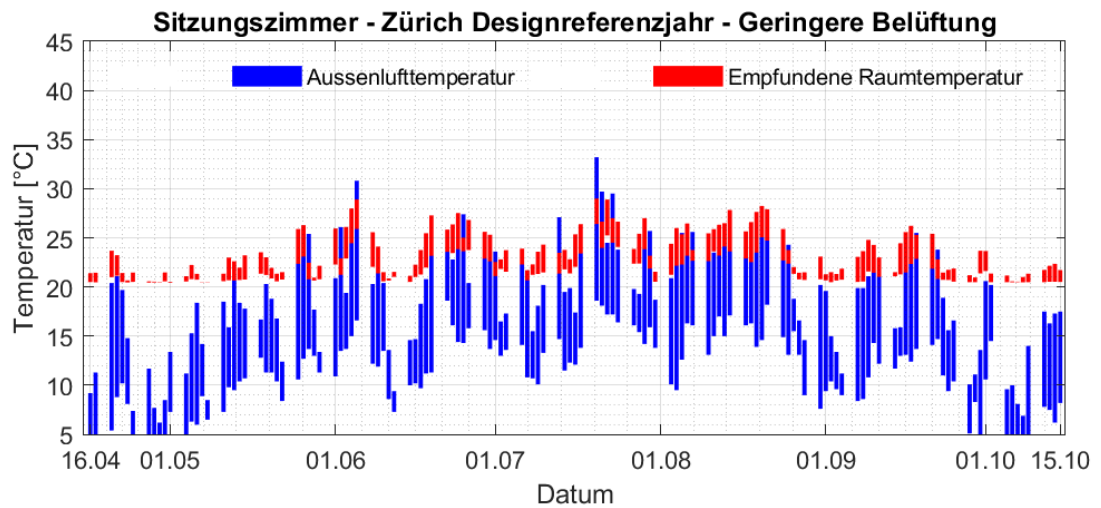
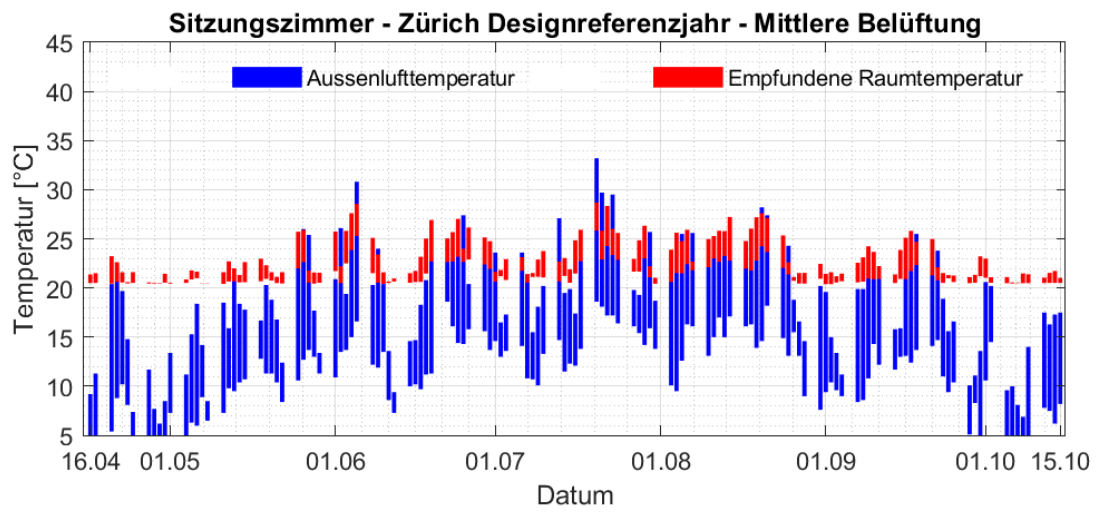
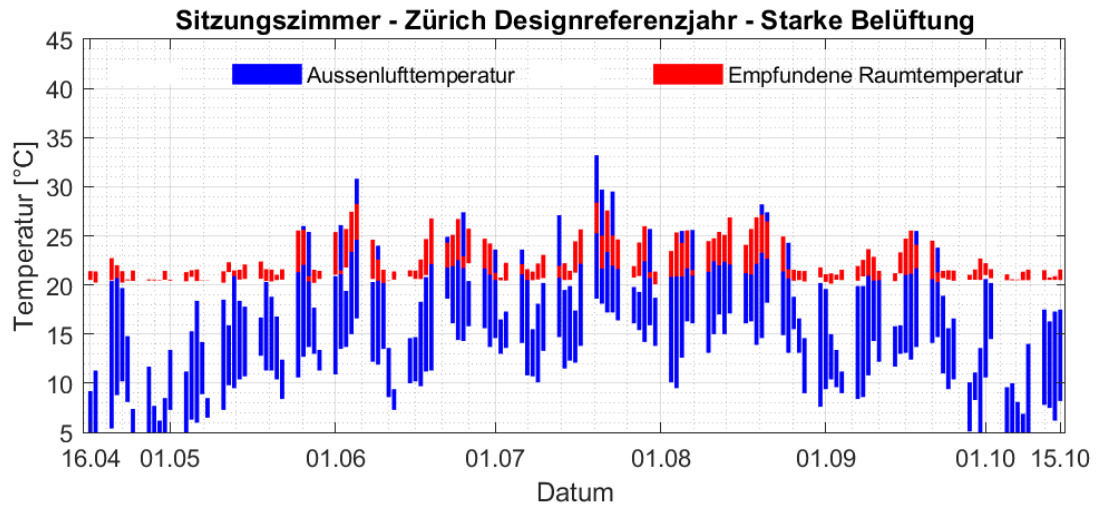
### 10.3.2 Raumtyp «Gruppenbüro»



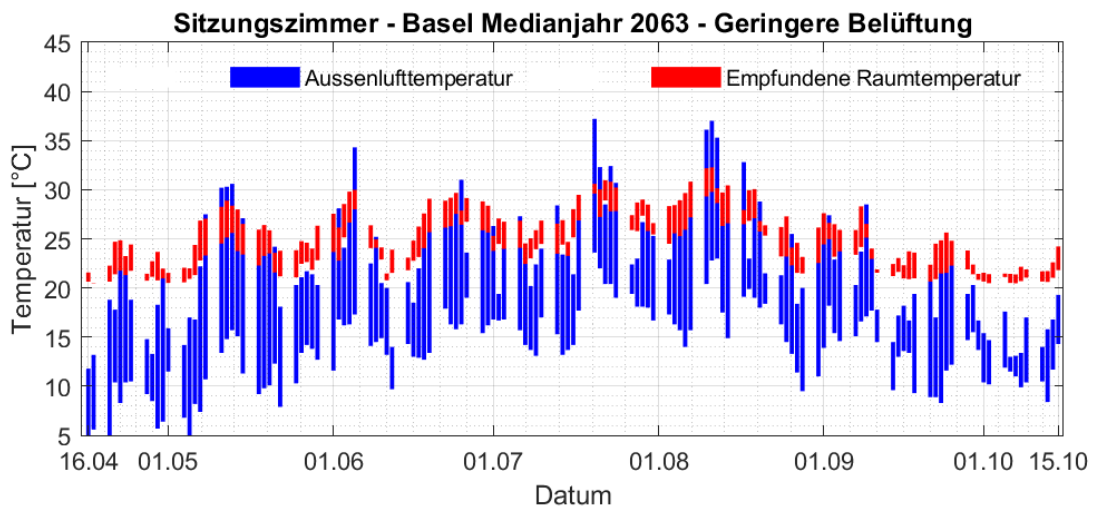
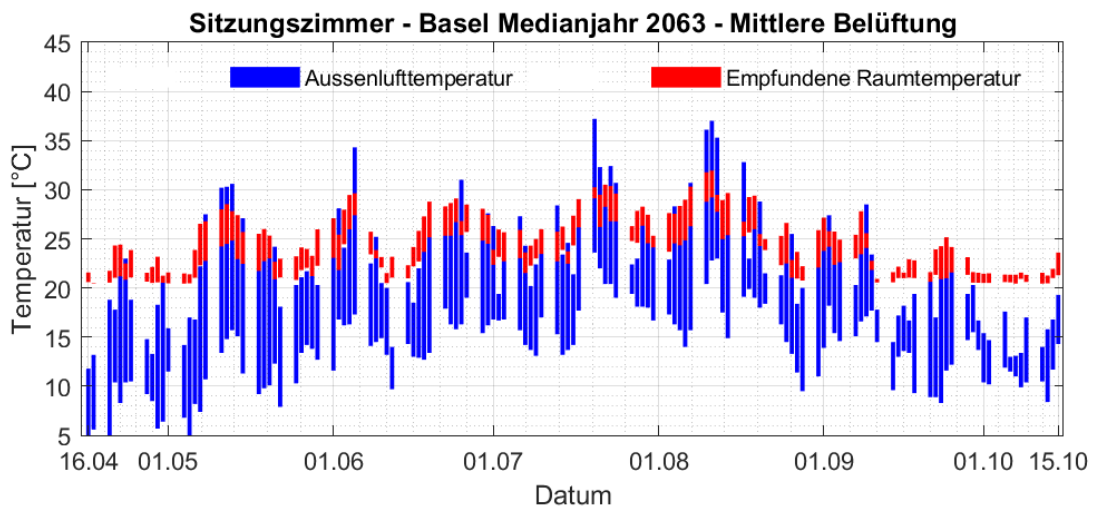
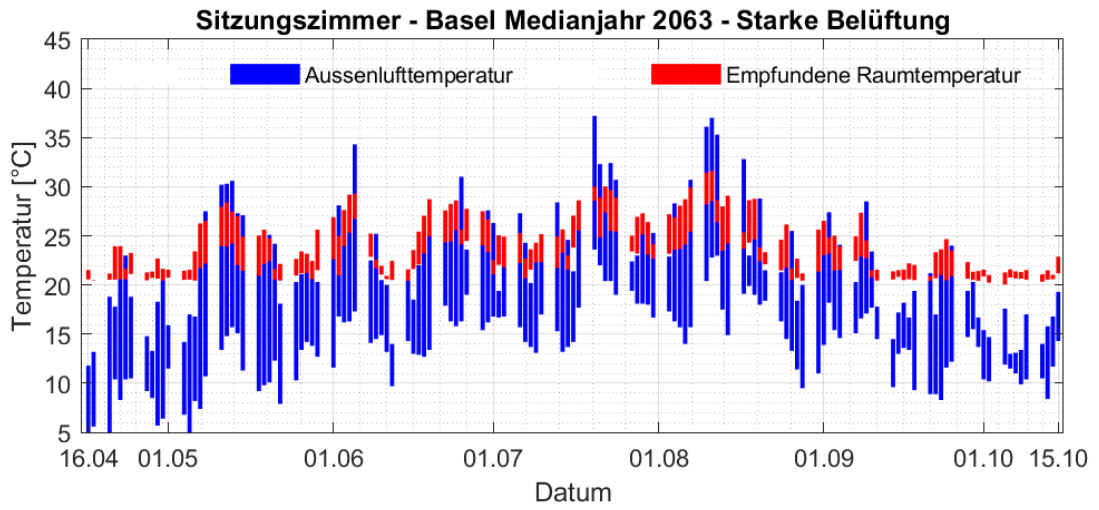


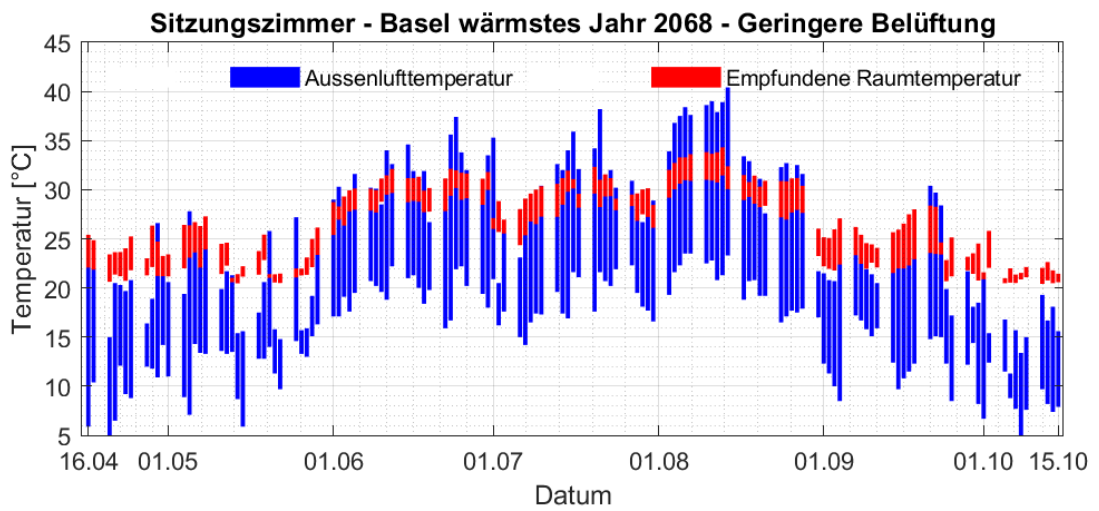
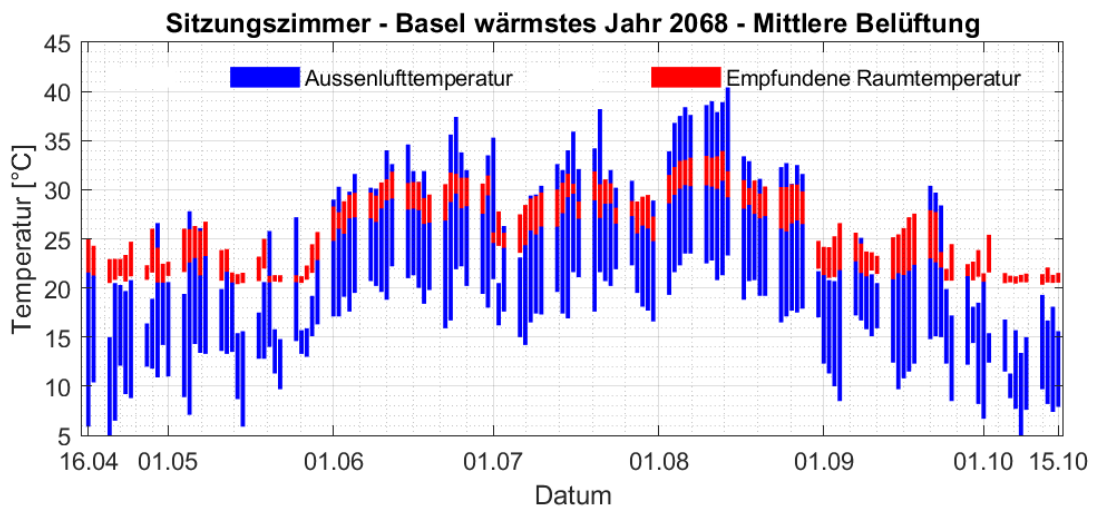
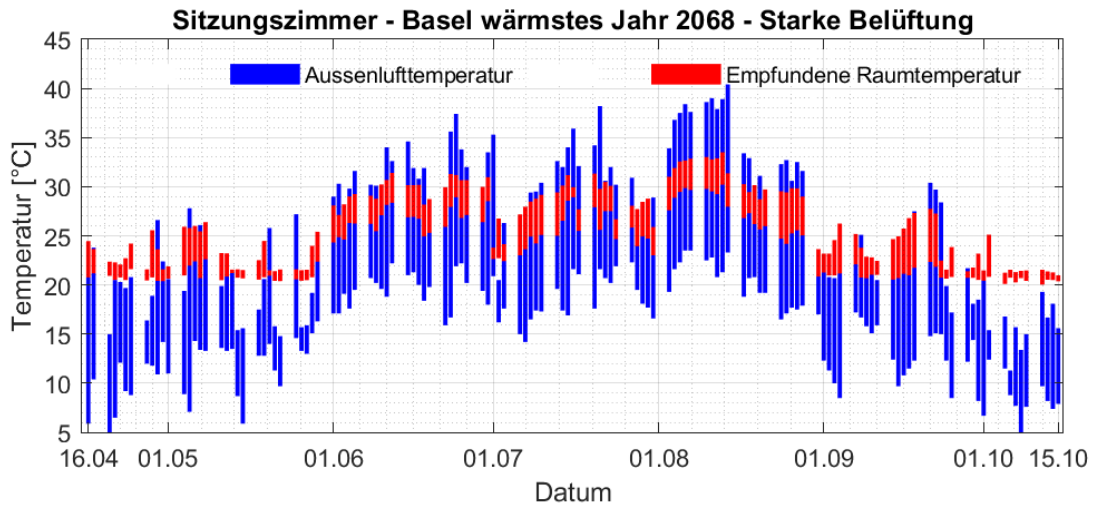


### 10.3.3 Raumtyp «Sitzungszimmer»









### 10.3.4 Raumtyp «Mehrzwecksaal»

