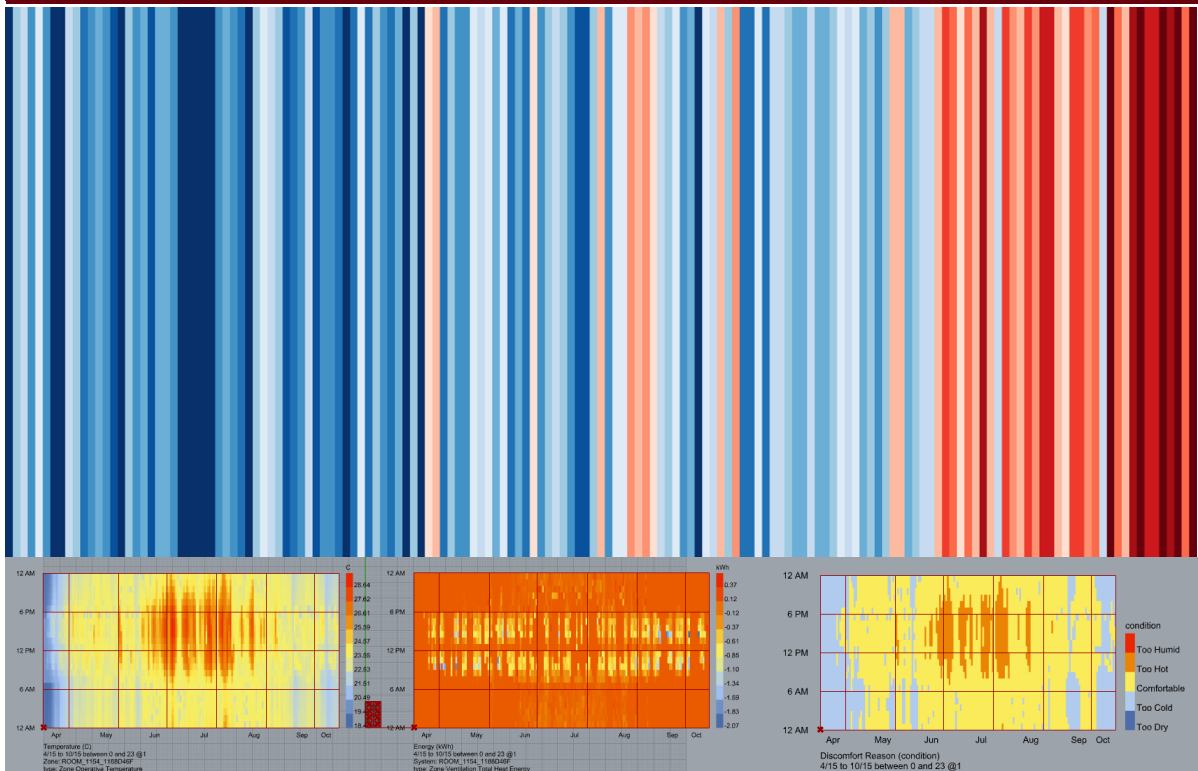


Bauliche Umsetzung des sommerlichen Wärmeschutzes im Jahr 2060



Biel/Bienne, 20. Dezember 2022

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Mandat	P20167
Titelbild	#ShowYouStripes https://showyourstripes.info
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt (BAFU) Abteilung Wald CH-3003 Bern Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Auftragnehmer	Prona AG Fachbereich Bauphysik Collègegasse 9, CH-2502 Biel/Bienne www.prona.ch
Autoren	Matthias Schmid, Julien Nembrini
Projektverantwortlicher	Matthias Schmid
Begleitung BAFU	Christian Aebischer, Achim Schafer
Hinweis	Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Résumé	6
1. Ausgangslage	7
1.1. Inhalt	7
1.2. Ziele	7
2. Methodik	9
2.1. Allgemein	9
2.2. Berechnungsansatz	9
2.3. Ermittlung Handlungsbedarf	10
2.4. Eingesetzte Hilfsmittel	13
2.5. Analyse der Klimadaten	13
2.6. Parametrische Studie	14
3. Ergebnisse	18
3.1. Klimadaten	18
3.2. Raumklima	22
3.3. Holzbau versus Massivbau	24
4. Fazit	34
4.1. Kernaussagen der Untersuchungen	34
4.2. Fragestellung	35
4.3. Ausblick und weiterführende Ergänzungen	37

Diagramme

Diagramm 2-1 Sogenannte RCPs ("Representative Concentration Pathways") vom IPCC 5th assessment report, aus denen die CH2018 Klimaszenarien erzeugt worden sind.	8
Diagramm 3-1: Häufigkeit der Hitzetage - Tageshöchsttemperatur $\geq 30^{\circ}\text{C}$	19
Diagramm 3-2: Häufigkeit/Anzahl der Tropennächte - Tagestiefsttemperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$	19
Diagramm 3-3: Häufigkeit/Maximal Dauer der Hitzewellen nach dem Tagesmittel $\geq 25^{\circ}\text{C}$	20
Diagramm 3-4: Maximale Dauer der Hitzewellen nach dem Tagesmittel $\geq 25^{\circ}\text{C}$ Definition und nach dem Tagesmaximum $\geq 30^{\circ}\text{C}$ Definition	20
Diagramm 3-5: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen, je nach Aussentemperatur (gleitender Mittelwert) nach Norm SIA 180. (Ragonesi et al., 2018)	22
Diagramm 3-6: Building Bio-Climatic Comfort Chart (BBCC) der Industrieländer (de Siqueira, 2015)	24
Diagramm 3-7: Gleitende 24h-Temperaturmittel im heissesten Raum für den Fall «base case»	25
Diagramm 3-8: Temperaturverlauf 1. Stock Erweiterungsneubau Gymnasium Strandboden Biel mit Bautyp, Massiv, Holz-Betonverbund und Holzbau	25
Diagramm 3-9: Gegen Süden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb und unterschiedlicher Konstruktionsweisen	27
Diagramm 3-10: Gegen Norden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb	27
Diagramm 3-11: Gegen Süden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell exkl. Sommerbetrieb	28
Diagramm 3-12: Gegen Norden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell exkl. Sommerbetrieb	28
Diagramm 3-13: Gegen Süden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb	29
Diagramm 3-14: Gegen Norden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb	29
Diagramm 3-15: Überhitzungsstunden für alle Klimaszenarien für einen Raum gegen Süden ausgerichtet. Raum im Erdgeschoss (links), Raum im ersten Stock (Mitte), oberstes Stockwerk (rechts).	30
Diagramm 3-16: Überhitzungsstunden für alle Klimaszenarien für den exponierten Raum Aufstockung Süd-Osten (links) und Raum Süd-Westen (rechts).	31
Diagramm 3-17: Temperaturverlauf in den Räumen der Aufstockung für das Klimaszenario 2060 RCP8.5 Extremfall 1/10	32

Diagramm 3-18: Überhitzungsstunden für alle Klimaszenarien für den exponierten Raum der Aufstockung Süd-Osten in Abhängigkeit des Öffnungsanteils. 33

Abbildungen

Abbildung 2-1: Zusammenspiel der unterschiedlichen Hilfsmittel im geplanten Workflow	9
Abbildung 2-2: Parametrische Untersuchung der Fensterhöhen (1,6 m bis 2,8 m, Fensteranteil konstant bei 0,35)	11
Abbildung 2-3: Parametrische Untersuchung des Verhältnisses des Fensteranteils (0,25 bis 0,55, konstante Höhe 1,6 m)	11
Abbildung 2-4: Numerisches Modell des Gebäudes Gymnasium Strandboden in Biel	12
Abbildung 2-5: Aufstockung Schulgebäude Primarschulhaus Orpund: links Bestandesgeschoss, rechts geplante Aufstockung	12
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung von Überhitzungsstunden für zwei unterschiedliche Grenzbereiche der SIA 180 am Beispiel eines abstrakten Holzbaus	23
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung von Überhitzungsstunden für zwei unterschiedliche Grenzbereiche der SIA 180 am Beispiel des Gymnasiums Strandboden Biel	26

Tabellen

Tabelle 1: Einsatz von Hilfsmittel und Tools für die Studie	13
Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Klimadaten mit Quellangaben	14
Tabelle 3: Definition der verwendeten Bautypen und Konstruktionsaufbauten	16

Zusammenfassung

Mit den SIA CH2018 Klimadaten stehen neu Berechnungsgrundlagen zur Verfügung, welche die unterschiedlichen Klimaszenarien bis ins Jahr 2060 berücksichtigen. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden daher die Konsequenzen der zunehmend wärmeren Temperaturen auf Gebäude untersucht. Herauszufinden galt es, welche baulichen Massnahmen notwendig sind, um im Jahr 2060 ein komfortables Raumklima zu gewährleisten.

Tatsache ist, dass gemäss den verfügbaren Klimaszenarien die heute zulässigen Überhitzungsstunden bei weitem überschritten werden. Oder anders gesagt: die aktuell definierten Grenzwerte für den Klimakomfort können noch maximal bis ins Jahr 2035 gewährleistet werden.

Umfangreiche bauliche Massnahmen sind also unerlässlich. Es hat sich zudem gezeigt, dass der bereits heute unter der Bezeichnung *DRY warm* bekannte Klimadatensatz vergleichbar zu den neuen Grundlagen ist. Ein signifikanter Unterschied zwischen der Massivbauweise und der Holzbauweise konnte nicht ausgemacht werden. Stehen längere Hitzewellen an, können Bauten in Leichtbauweise wie Holz die thermischen Lasten über eine vorgesehene Nachtauskühlung effizienter und schneller abführen. Über den Tag sind leicht höhere Raumtemperaturen als gegenüber dem Massivbau zu erwarten. Mit zunehmend steigenden Temperaturen rückt der Fokus der Bauweisen in den Hintergrund. Faktoren wie der Fensteranteil an exponierten Fassaden sind stärker zu gewichten.

Die Autoren empfehlen aufgrund der gemachten Untersuchung die Gebäude wie folgt zu planen:

- Effizient gedämmte Gebäudehülle und leistungsfähiger Sonnenschutz.
- Maximaler Fensteranteil von 35% (Auslegung auf Tageslichtbedarf).
- Anteil Fensteröffnungen zur Querlüftung und Nachtauskühlung rund 40 bis 50%.
- Maximaler Nutzen des Kamineffektes und der Speichermasse.
- Installation von passiven Komponenten wie Luft-Erdregister und Solar Cooling welche intelligent mit den lokal verfügbaren Ressourcen gekoppelt sind.
- Konzipierung und Planung möglicher Nachrüstung von Komponenten falls erforderlich für die aktive Kühlung.

Der Klimakomfort 2060 muss eine zentrale Rolle einnehmen im Entwurf und der Planung von Gebäuden. Die Autoren empfehlen deshalb eindringlich die Anwendung der neuen Klimadatensätze oder die Verwendung von *DRY warm* für die Auslegung der Komponenten. Weiter ist zu beachten, dass in erster Linie alle baulichen (passiven) Massnahmen konsequent umgesetzt werden sollen. Erst in letzter Instanz ist eine aktive Kühlung vorzusehen. Diese sollte dann zumindest mit erneuerbarer Energie gekoppelt werden.

Résumé

Les données climatiques SIA CH2018 fournissent désormais une base de calcul qui tient compte des différents scénarios climatiques jusqu'en 2060. Dans ce contexte, la présente étude s'intéresse aux conséquences d'une augmentation des températures sur les bâtiments. Il s'agit de déterminer avec l'aide de ces nouvelles données quelles mesures de construction seraient nécessaires pour garantir le climat intérieur en 2060.

Selon ces scénarios il apparaît que les heures de surchauffe autorisées aujourd'hui seront largement dépassées. En d'autres termes, les valeurs limites actuellement définies pour le confort thermique ne peuvent être garanties qu'au maximum jusqu'en 2035. D'importantes mesures de construction sont donc indispensables. Il s'est en outre avéré que les données climatiques de références "chaudes" (DRY warm), déjà disponibles auparavant, sont comparables aux nouvelles données.

Il été identifié que, du fait de l'augmentation générale des heures de surchauffe, il n'y aurait dans le futur pas de différence significative entre la construction massive et la construction en bois. Toutefois, en cas de vague de chaleur prolongée, les constructions légères comme le bois peuvent évacuer les charges thermiques plus efficacement et plus rapidement par un refroidissement nocturne, bien que les charges accumulées pendant la journée soient plus élevées que celles d'une construction massive.

Sur la base de cette étude, les auteurs recommandent de concevoir les bâtiments comme suit :

- Une enveloppe de bâtiment suffisamment isolée et une protection solaire performante.
- Une proportion maximale de fenêtres de 35% (dimensionnement en fonction des besoins en lumière du jour).
- Une proportion d'ouvertures de fenêtres pour la ventilation naturelle transversale et le refroidissement nocturne d'environ 40 à 50%.
- Une utilisation maximale de l'effet de cheminée et de la masse thermique.
- L'installation de composants passifs tels que puits canadien et refroidissement solaire, intelligemment couplés aux ressources disponibles localement.
- Si nécessaire : conception et planification d'une éventuelle mise à niveau des composants pour le refroidissement actif.

Le confort climatique en 2060 doit jouer un rôle central dans la conception et la planification des bâtiments. Les auteurs recommandent donc impérativement l'utilisation des nouvelles données climatiques ou l'utilisation des données de référence "chaudes" (DRY warm) pour le dimensionnement des éléments du bâtiment. Il convient en premier lieu de mettre en oeuvre toutes les mesures constructives (passives) de manière conséquente. Un refroidissement actif n'est à prévoir qu'en dernier recours, et devrait, le cas échéant, à minima être couplé à une énergie renouvelable.

1. Ausgangslage

1.1. Inhalt

Holz ist eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen der Schweiz, die zu relevanten gesellschaftlichen Herausforderungen wie dem Klimawandel, der Nachhaltigkeit im Bau und der Stärkung der Schweizer Regionen positive Beiträge leistet. Dabei gilt der heutige moderne Holzbau als nachhaltige und klimaschonende Bauweise.

Unbestritten sind die klimatischen Veränderungen, welche zu mehr Hitzetagen und -perioden im Jahr führen. Mehrere Studien wie z.B. die vom BFE unterstützte «ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels» befassen sich mit der quantitativen Betrachtung des Klimawandels (*Anpassung an den Klimawandel*, o. J.). Daraus geht hervor, dass Faktoren wie Sonnenschutz, Nachtauskühlung und natürliche Lüftung wesentlichen Einfluss auf das Innenraumklima haben.

Die geplante Studie setzt sich insbesondere damit auseinander, wie die baulichen Massnahmen an und in Schweizer Gebäuden im Jahr 2060 sein müssten, damit der Komfort in heissen Sommern für die Bewohner gewährleistet werden kann. In diesem Sinne nutzt die Studie die neuen Klimadaten (NCCS, o. J.), welche im Rahmen des nationalen Pilotprogrammes «Klimawandel» erarbeitet wurden.

1.2. Ziele

In der geplanten Studie sollen darum folgende Fragestellungen, mit dem Fokus Holzbau, beantwortet werden:

- a) Welche baulichen Massnahmen sind für einen effektiven Sonnenschutz zu treffen?
- b) Wie schafft man es, die natürliche Lüftung so zu gestalten, dass sie einen wesentlichen Effekt der Abkühlung mit sich bringt?
- c) Wie ist die Nachtauskühlung in Gebäude zu integrieren, um thermisch einen möglichst optimalen Nutzen zu bekommen?
- d) Wie sehen die Behaglichkeitsgrenzen im Jahr 2060 genau aus?
- e) Gibt es u. U. bautypische Unterschiede zu beachten für einen Holzbau bzw. Hybridbau im Vergleich zu Massivbau?
- f) Gibt es daraus Punkte, welche in der Normierung bereits heute vorgesehen werden müssen?

Um diese Fragestellungen beantworten zu können, sind Betrachtungen des Status quo notwendig, um eine entsprechende Projizierung zu realisieren. In diesem Zusammenhang ist es von Interesse, gebaute Beispiele aufzugreifen und für die Zukunft zu analysieren.

Die Konsequenzen des Klimawandels sind für Bauplanende und professionelle Bauherren zu wenig bekannt und schwierig in konkrete Massnahmen umzusetzen. Ziel der Studie ist es, für die

genannte Zielgruppe erste konkrete bauliche Massnahmen so zu definieren, dass die heutige Planung die klimatischen Begebenheiten des Jahres 2060 bereits berücksichtigen kann.

Denkbar ist (nicht abschliessend):

- Weiterführung bestehendes Merkblatt KBOB «Bauen wenn das Klima wärmer wird» (KBOB, 2008)
- Onlineplattform auf GIS-Basis der untersuchten Gebäude in Holzbauweise
- Fachpublikation der Ergebnisse mit Zielgruppe Bauplanende

Bis dato wurden im Zusammenhang mit dem sommerlichen Wärmeschutz viele Untersuchungen und Studien zu den einzelnen am Bau vorhandenen Einflussparameter wie Fensteranteil, Ausrichtung, Bauweise, interne Lasten, Sonnenschutz usw. gemacht. Im Hinblick auf den offensichtlichen Klimawandel sind jedoch gewisse Parameter zu hinterfragen wie z.B. Klimaszenario für das Jahr 2060 oder die Entwicklung der Komfortzone durch Anpassung an Hitzeperioden.

Entwicklung verschiedener Klimaszenarien von 2000 bis ins Jahr 2300

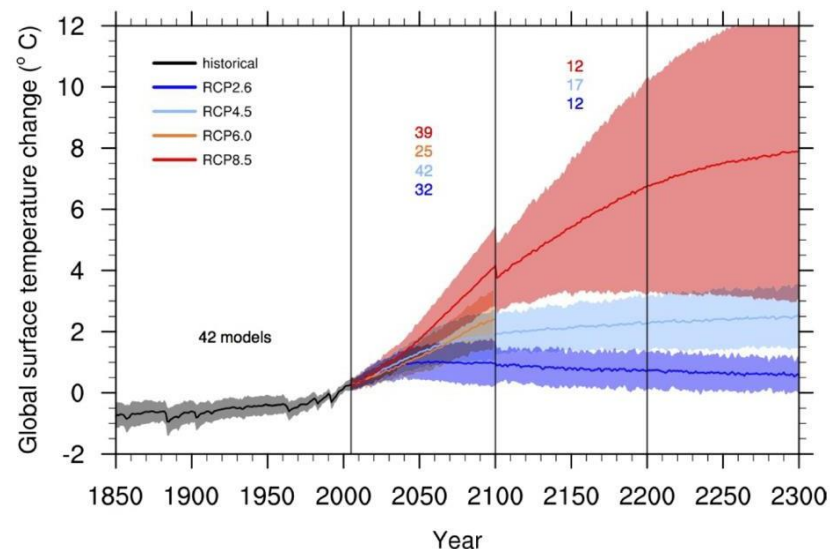


Diagramm 1-1 Sogenannte RCPs ("Representative Concentration Pathways") vom IPCC 5th assessment report, aus denen die CH2018 Klimaszenarien erzeugt worden sind.

Diese Erkenntnisse sollen als Ergänzung zu den bereits getätigten Parameterstudien dienen und so zusammen ein komplettes Bild der Thematik ergeben.

2. Methodik

2.1. Allgemein

In einer ersten Phase werden umfangreiche Analysen zu den bestehenden Klimaszenarien durchgeführt. Als Ergänzung werden die Szenarien mit den heutigen normativ anzuwendenden stündlichen Klimadaten verglichen. Daraus soll sich ein klares Bild ergeben, wie sich das Raumklima im Jahr 2060 verhält.

In der Studie interessieren insbesondere Gebäude in Holz- und Mischbauweise. Als Vergleich und als Grundlage für die Diskussion ist jedoch auch die Gegenüberstellung zur Massivbauweise vorgesehen. In erster Instanz zur Parameterstudie wird ein abstraktes Modell erstellt. Zur weiteren Analyse werden zwei reale Projekte mit den stündlichen Klimadaten untersucht. Für diese Berechnungen wird ein eigener Workflow definiert.

2.2. Berechnungsansatz

Die Resultate der Projektbasis sollen als gesamtheitliche Parameter in einer Modellierung zusammengefasst werden. Dazu muss ein neues Verfahren entwickelt werden. Die bekannten Verfahren, wie sie die SIA-Normen und das Minergie-Label beschrieben, sind primär nicht für eine dynamische Betrachtung konzipiert. Der Anspruch der neuen Modellierung zeichnet sich vor allem damit aus, dass spezifische Programme miteinander verknüpft werden. Das erlaubt dem Nutzer viele eigene Einstellungen bzw. Parameter zu definieren.

Ablaufschema der Datenbearbeitung und die benötigten Hilfsmittel

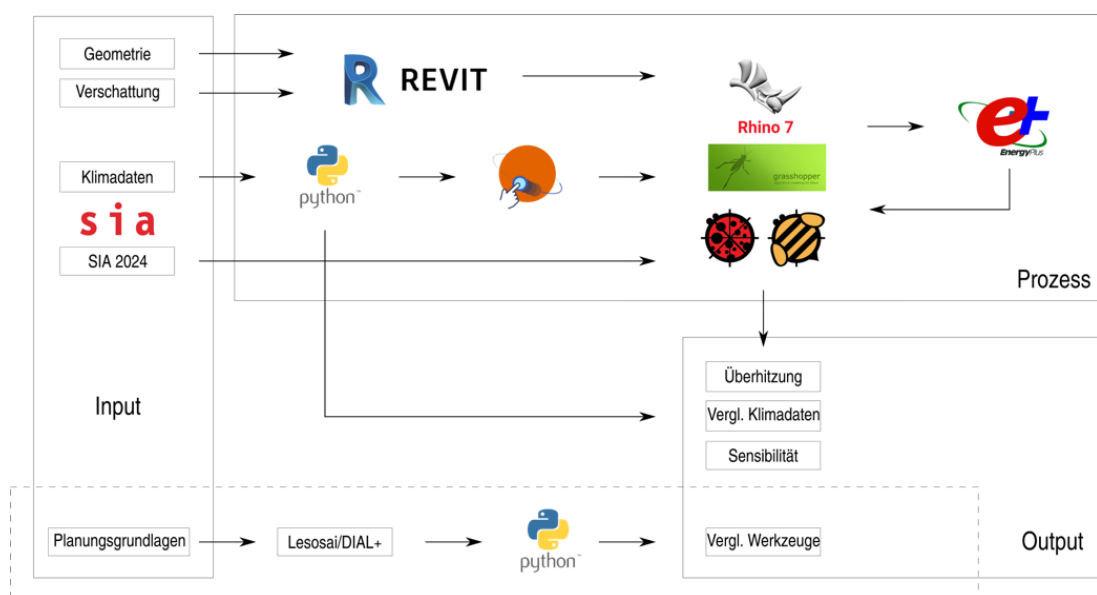


Abbildung 2-1: Zusammenspiel der unterschiedlichen Hilfsmittel im geplanten Workflow

Als weiterer Anspruch gilt dabei, den Prozess der Modellierung bzw. der Simulation so zu gestalten, dass ein Ablauf nach BIM-Kriterien möglich bzw. kompatibel ist. Leider konnte aus Zeitgründen die Einbindung von Lesosai und Dial+ nicht realisiert werden.

2.3. Ermittlung Handlungsbedarf

In der letzten Phase können umfangreiche Parameterstudien durchgeführt werden, um die Wirkung einzelner Komponenten genauer zu bestimmen und diese hingehend der Klimaszenarien zu testen. Daraus lassen sich die gewünschten baulichen Massnahmen ableiten, welche für das Klima 2060 geeignet und effizient sind. Die Massnahmen sollen insbesondere die Themen thermische Dynamik, Nachtauskühlung und Lüftungskonzepte beinhalten.

Für diese parametrische Studie werden drei Fallstudien vorgeschlagen. Diese Beispiele haben alle eine schulische Nutzung, da dies offenkundig die schwierigste Nutzung für sommerlichen Komfort ist, aufgrund der hohen Belegung während des Tages und oft großzügiger Öffnungen zur natürlichen Beleuchtung.

1. Ein abstraktes Gebäude mit insgesamt 8 Räumen mit rechteckigem Grundriss auf zwei Geschossen.
2. Der Erweiterungsneubau des Gymnasium Strandboden in Biel als gebautes Gebäude in Holzbauweise aus dem Jahr 2015.
3. Aufstockung in Holzbauweise des bestehenden Primarschulgebäudes in Orpund geplant im Jahr 2023.

Für diese drei Fälle werden drei verschiedene konstruktive Systeme geprüft:

- a) Bautyp in Massivbauweise in Beton/Backstein mit aussenliegender Wärmedämmung
- b) Bautyp in Holzbauweise; Fassade als Holzrahmenbau mit Ausfachung Holzfaser- und Steinwollendämmung, Deckenkonstruktionen in Holzbeton-Verbund mit Unterlagsboden (geschliffen).
- c) Bautyp wie b) jedoch mit einem Parkett als Bodenbelag.

Alle drei Konstruktionen bzw. Bedingungen lehnen sich an Praxisbeispiele an. Der Bautyp b) wurde im konkreten Fall beim Erweiterungsneubau des Gymnasiums Strandboden in Biel umgesetzt. Zudem wird der Bautyp c) mit einer Variante «Projekt» ergänzt. Diese beinhaltet nach heutigem Stand der Erkenntnisse die bestmögliche Variante für den Hitzeschutz.

Zur Vereinfachung der Berechnungen wurde die Verschattung durch umliegende Gebäude oder das Gelände weggelassen. Dieser situationsunabhängige Ansatz ermöglicht den Vergleich der Resultate untereinander.

Jedes der Fallbeispiele wird für jeden Bautyp mit den sieben SIA CH2018 Datensätzen simuliert, um den Einfluss des zukünftigen Klimas auf die Entwicklung eines Bauprojekts zu bestimmen.

Daraus lässt sich der Handlungsbedarf für bauliche Massnahmen ableiten.

2.3.1. Abstraktes Gebäude

Um den Einfluss von Parametern wie Fensterhöhe und Fensteranteil auf den sommerlichen Komfort unter zukünftigen Klimabedingungen zu bestimmen, wird ein abstraktes Gebäudemodell vorgeschlagen, das aus insgesamt acht rechteckigen Räumen auf zwei Etagen besteht. Das Gebäude ist auf einer Nord-Süd-Achse angeordnet, um die Fenster tagsüber maximal der Sonne auszusetzen. Die Variation der Fensterhöhe und des Fensteranteils wird mit dem parametrischen Tool Labybug-Honeybee durchgeführt.



Abbildung 2-2: Parametrische Untersuchung der Fensterhöhen (1,6 m bis 2,8 m, Fensteranteil konstant bei 0,35)

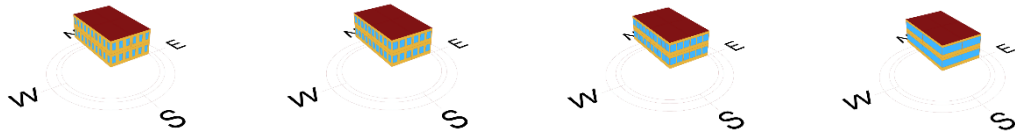


Abbildung 2-3: Parametrische Untersuchung des Verhältnisses des Fensteranteils (0,25 bis 0,55, konstante Höhe 1,6 m)

2.3.2. Erweiterungsneubau Gymnasium Strandboden Biel

Beim vorliegenden Fallbeispiel handelt es sich um dreistöckiges Schulgebäude in Holzbauweise mit Untergeschoss. Es ist der Erweiterungsneubau des Gymnasiums Strandboden in Biel. Es wurde 2014-2015 gebaut und wird teilweise durch das Wasser der nahegelegenen Schüss gekühlt. Die Fassadenelemente bestehen aus gedämmten Holzrahmen. Die Geschosstrenndecken gleichen einer Holz-Beton-Verbundkonstruktion. Es wird nur ein Teil des Gebäudes mit drei übereinander liegenden Räumen modelliert, und zwar in dem Teil des realisierten Gebäudes, der am stärksten der Gefahr einer sommerlichen Überhitzung ausgesetzt ist. In der hier vorgeschlagenen Studie wird die aktive Kühlung nicht berücksichtigt, um das Verhalten des Gebäudes unter zukünftigen Klimabedingungen abzuschätzen.

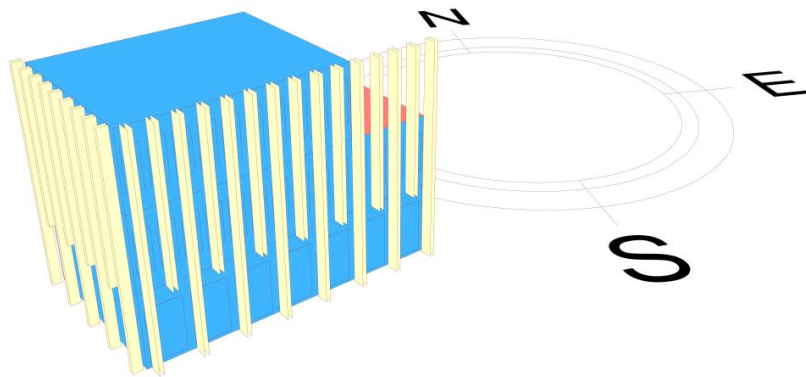


Abbildung 2-4: Numerisches Modell des Gebäudes Gymnasium Strandboden in Biel

2.3.3. Aufstockung Primarschulhaus Orpund

Das Projekt einer Schulhausaufstockung erscheint uns besonders interessant, da es sich mit der heutigen Situation einer Nachverdichtung von Gebäudestrukturen, ausgelöst durch das neue Raumplanungsgesetz, auseinandersetzt. Solche Nachverdichtungen sind oft aus statischen Gründen nur mit einer Leichtbauweise wie dem Holzbau realisierbar.

Bereits unter den derzeitigen klimatischen Bedingungen sind diese leichten Aufstockungen sehr anfällig für sommerliche Überhitzung. Die Frage stellt sich dabei, welche Parameter optimiert werden müssen, um im Jahr 2060 einen zumindest akzeptablen Komfort zu erreichen. Die vorgeschlagene Fallstudie befindet sich in Orpund im Kt. Bern und ist eine Erweiterung des bestehenden Primarschulgebäudes. Für die Analyse werden zwei exponierte Klassenzimmer untersucht. Dies jeweils für den derzeitigen Bestand, sowie für die geplante Aufstockung als oberstes Geschoss.

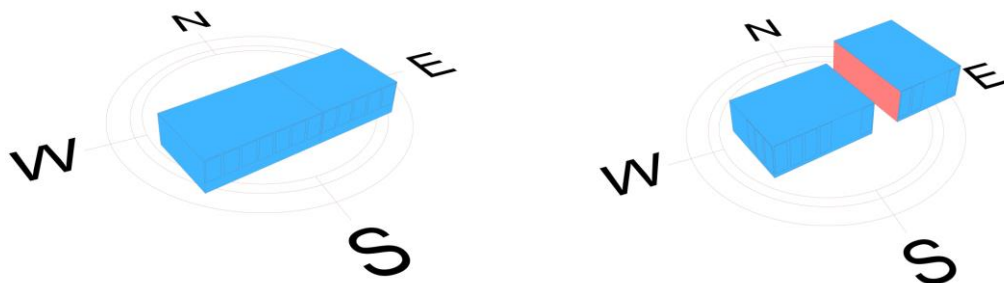


Abbildung 2-5: Aufstockung Schulgebäude Primarschulhaus Orpund: links Bestandesgeschoss, rechts geplante Aufstockung

2.4. Eingesetzte Hilfsmittel

Die vorgesehenen Hilfsmittel/Grundlagen bestehen, je nach Phase, aus folgenden Daten / Tools:

Phase I	Klimadaten: (Brunner et al., 2007) (<i>Daten zum zukünftigen Klima (zu SIA 2028)</i> , o. J.) (<i>Klimadaten SIA 2028</i> , o. J.) (SIA, 2014)
Phase II	Software: Rhino, Grasshopper, Ladybug tools (<i>EnergyPlus</i> <i>EnergyPlus</i> , o. J.)
Phase III	Datenanalyse mit Python/Pandas Interpretation der Resultate

Tabelle 1: Einsatz von Hilfsmittel und Tools für die Studie

2.5. Analyse der Klimadaten

Zu Beginn der Studie reichten die verfügbaren Klimadaten nicht aus, um dynamische Simulationen zur Vorhersage des Gebäudeverhaltens im Jahr 2060 zu starten. Die Daten, die im Rahmen der CH2018-Szenarien zur Verfügung gestellt wurden, umfassten nur Tagesdaten und keine Stundenwerte.

Mit der Fertigstellung des Projekts ClimaBau II wurden neuen Klimadaten (NCCS, o. J.) mit Stundenwerten für die unterschiedlichen Klimaszenarien zur Verfügung gestellt.

Trotz der Lokalisierung unserer Fallbeispiele im Seeland wurde aus zwei Gründen entschieden, unsere Analyse auf die Daten aus Basel unter Verwendung der MeteoSchweiz-Station BAS zu stützen: (1) Die Region Basel ist am anfälligsten für Hitzewellen, (2) das Opendata-Portal des Kantons Basel stellt Wetterdaten zur Verfügung, die einen Vergleich der aktuellen Situation mit den Prognosen der CH2018-Szenarien ermöglichen.

Daten	Quelle
Jahr 2021	OpenData Basel (<i>Home — Datenportal BS</i> , o. J.) https://data.bs.ch/explore
SIA <i>DRY WARM</i>	Export Lesosai (Daten SIA 2028)
Szenarien CH2018	NCCS/Meteosuisse

	Verfügbar auf Anfrage https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien.html
Szenarien SIA CH2018	Verfügbar auf geoadmin https://s.geo.admin.ch/94e9d38450 https://www.sia.ch/de/politik/klimaschutz-klimaanpassung/innenraumklima/

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Klimadaten mit Quellangaben

Die Frage der Verfügbarkeit der Klimadaten für die Berechnungen war während der gesamten Projektdauer von zentraler Bedeutung. Die Tatsache, dass die SIA CH2018 Daten nun online verfügbar sind, ist zu begrüßen. Leider ist es nach wie vor nicht möglich, daraus gewisse Datenformate zu generieren. Zudem besteht keine Vergleichsmöglichkeit mit der aktuellen Wetterlage, die aus dem Opendata-Portal des Kantons Basel zur Verfügung steht.

2.6. Parametrische Studie

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die verschiedenen Bautypen bewerten zu können, werden die wesentlichen Parameter wie der Fensteranteil und die natürliche Belüftung betrachtet. Die Berechnungen werden für alle verfügbaren SIA CH2018-Klimaszenarien durchgeführt.

2.6.1. Gebäudemodellierung

Die Gebäude werden entsprechend ihren geometrischen Eigenschaften modelliert. In einem zweiten Schritt werden den geometrischen Elementen physikalische und dynamische Eigenschaften zugewiesen.

Um das dynamische Verhalten von Gebäuden für verschiedene Bautypen zu vergleichen, wurden typische Konstruktionen ausgewählt: eine konventionelle Konstruktion mit Perimeterdämmung, ein Holz-Beton-Verbundsystem mit Fassade in Rahmenbauweise und eine Aufstockung in Holzbauweise auf einer bestehenden Betonstruktur. Die Spezifikationen sind in der folgenden Tabelle zu finden:

Massivbau	Aussenwand	Aussenputz	1 cm
		Dämmung EPS	24 cm
		Beton	18 cm
		Innenputz	1 cm
	Dach	Gründach	
		Dichtungsbahn	
		Dämmung EPS	24 cm
		Beton	20 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Decke	Anhydritestrich	8 cm
		Trittschalldämmung	4 cm

		Beton	20 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Innenwand	Gipsfaser	1.5 cm
		Steinwolle	10 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
Holz-Beton-Verbund	Aussenwand	3-Schichtplatte	2.7 cm
		Luftschicht	3 cm
		Steinwolle	10 cm
		Steinwolle	24 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Dach	Gründach	
		Dichtungsbahn	
		Dämmung EPS	24 cm
		CLT-Platte	10 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Decke	Anhydritestrich	8 cm
		Trittschall	4 cm
		Beton	6 cm
		3-Schichtplatte	2.7 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Innenwand	Gipsfaser	1.5 cm
		Steinwolle	10 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
Holzbau	Aussenwand	3-Schichtplatte	2.7 cm
		Luftschicht	3 cm
		Steinwolle	10 cm
		Steinwolle	24 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Dach	Gründach	
		Dichtungsbahn	
		Dämmung EPS	24 cm
		CLT-Platte	10 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Decke	Anhydritestrich	8 cm
		Trittschall	4 cm
		3-Schichtplatte	2.7 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Innenwand	Gipsfaser	1.5 cm
		Steinwolle	10 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
Projekt	Aussenwand	3-Schichplatte	2.7 cm
		Luftschicht	3 cm
		Steinwolle	10 cm
		Steinwolle	16 cm
		Gipsfaser	1.5 cm
	Dach	Gründach	
		Dichtungsbahn	
		Steinwolle	24 cm
		3-Schichtplatte	2.7 cm

	Steinwolle	24 cm
	3-Schichtplatte	2.7 cm
	Luftschicht	3 cm
	Gipsfaser	1.5 cm
Decke	Parkett	1.5 cm
	Anhydritestrich	8 cm
	Trittschalldämmung	4 cm
	Beton	20 cm
	Steinwolle	4 cm
	Gipsfaser	1.5 cm
Innenwand	3-Schichtplatte	2.7 cm
	Flumroc	24 cm
	3-Schichtplatte	2.7 cm
Fenster		U = 0.77 W/m ² K, g = 0.45

Tabelle 3: Definition der verwendeten Bautypen und Konstruktionsaufbauten

Fensteröffnungen werden für die natürliche Belüftung verwendet und ihre Steuerung erfolgt in Abhängigkeit von der Innen- bzw. Außentemperatur. Die Belüftung erfolgt bei einem Delta von 1°C und einer Außentemperatur von weniger als 23°C.

Leibungsverschattungen welche durch die Dicke der Wände entstehen, werden von der Simulation automatisch berücksichtigt. Feste Verschattungen werden zusätzlich geometrisch definiert. Schatten durch benachbarte Gebäude werden in der Studie nicht berücksichtigt.

Jede Fensteröffnung wird durch eine Stoffmarkise mit einem g-Wert von 0,20 abgedeckt, da diese aus ästhetischen Gründen oft den Rafflamellen-Systemen vorgezogen werden. Die Markisen werden automatisch in Abhängigkeit der Strahlungsleistung gesteuert.

2.6.2. Simulationssetup / Workflow

Um die parametrischen Studien mit den zahlreichen Klimadaten effizient durchführen zu können, wird eine Software verwendet, welche den Start sämtlicher Simulationen automatisiert.

Die 3D-Modellierungssoftware Rhino ist mit der parametrischen Erweiterung Grasshopper ausgestattet. Eine Reihe von Open-Source-Tools (Ladybug tools) ermöglicht es, Simulationen mit Energy+ und Radiance zu starten, um das Verhalten eines Gebäudes in Bezug auf Komfort, Energie und natürliche Beleuchtung abzuschätzen.

Mithilfe eines Python-Skripts und der Software Meeonorm werden die SIA CH2018-Klimadaten transcodiert, um sie in der Simulationssoftware Energy+ auswerten zu können. Anschliessend werden Simulationen mit der Software Energy+ durchgeführt, welche im Bereich der dynamischen Gebäudesimulation als Referenz gilt. In den Berechnungen der sommerlichen Überhitzung, wird nur ein passives Verhalten modelliert und keine Einbindung aktiver Heiz- oder Kühltechnik. Die Simulation wird für die Sommerperiode vom 15.04. bis am 15.10. durchgeführt und liefert stündliche Ergebnisse. Die Ergebnisse beinhalten Energiegewinne und -verluste sowie

Werte, die für die Berechnung des Komforts notwendig sind, wie z.B. Energieverluste durch natürliche Belüftung oder die operative Innentemperatur.

Die internen Gewinne sind in der SIA 2024 für Klassenzimmer definiert. Die Luftdichtheit des Gebäudes ist durch den Minergie-P-Standard gegeben und der Bedarf an Frischluft wird durch die Belegung definiert. Die beweglichen Beschattungen werden aktiviert, sobald die horizontale Globalstrahlung 200 W/m^2 übersteigt und die Außentemperatur über 18°C liegt.

Um die passive Kühlkapazität so genau wie möglich abzuschätzen, wird der Modellierung von Wärmeflüssen durch Belüftung besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Hierzu wird die AFN-Technik (Air Flow Network) verwendet, bei der die Luft über die Fenster und Türen ausgetauscht wird. Diese Technik ermöglicht die Modellierung von Wärmeströmen zwischen mehreren Fenstern (Querlüftung).

Die natürliche Belüftung wird aktiviert, sobald:

- die Innentemperatur über 23°C steigt,
- ein Temperaturunterschied zur Außentemperatur mindestens 1°C beträgt
- und die Außentemperatur zwischen 15°C und 29°C liegt.

3. Ergebnisse

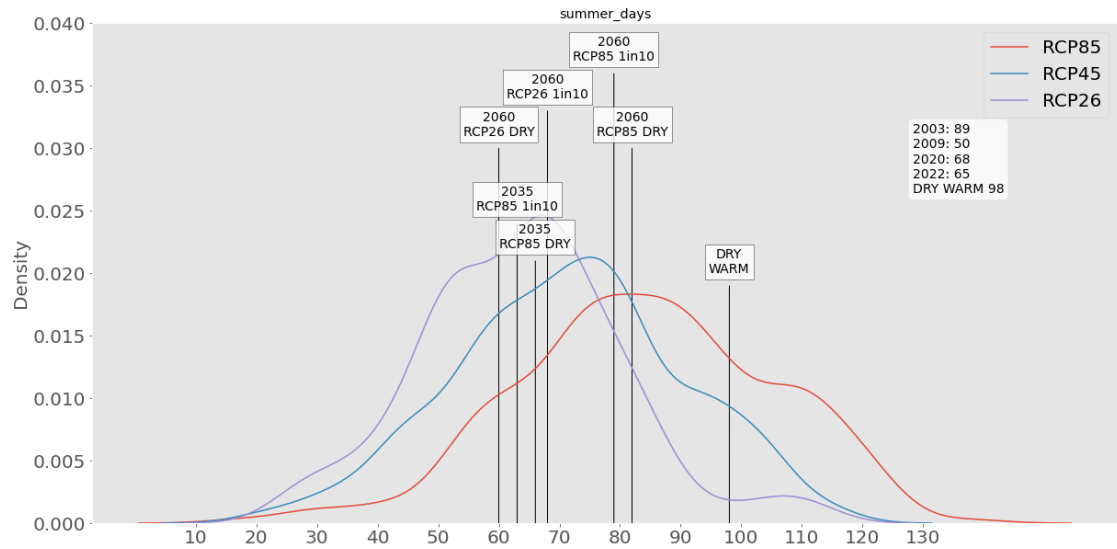
3.1. Klimadaten

Die grundsätzliche Klimaanalyse erfolgt nach den anerkannten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways - RCPs). Diese Modelle betrachten Projektionen über den Zeitraum 2001-2100 für die drei RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5. Bei dem Szenario RCP8.5 beträgt der Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2100 etwa 4,8 °C im Vergleich mit dem vorindustriellen Zustand bzw. 4 °C gegenüber 1986-2005. Im mittleren Szenario RCP4.5 erreicht die Erwärmung 2,6 °C gegenüber dem vorindustriellen Wert. Bei dem Szenario RCP2.6 bleibt der mittlere globale Temperaturanstieg des Modells dagegen unter dem 2-Grad-Ziel. Der Index RCPx ($x = 2.6, 4.5, 8.5$) bezieht sich jeweils auf den Strahlungsantrieb durch anthropogene Treibhausgase von $x \text{ W/m}^2$ im Jahre 2100 im Vergleich zu 1850. Als Zusatz zu den Szenarien gibt es noch den Zusatz eines extremen Hitzeereignis mit der Wahrscheinlichkeit 1-mal pro 10 Jahre.

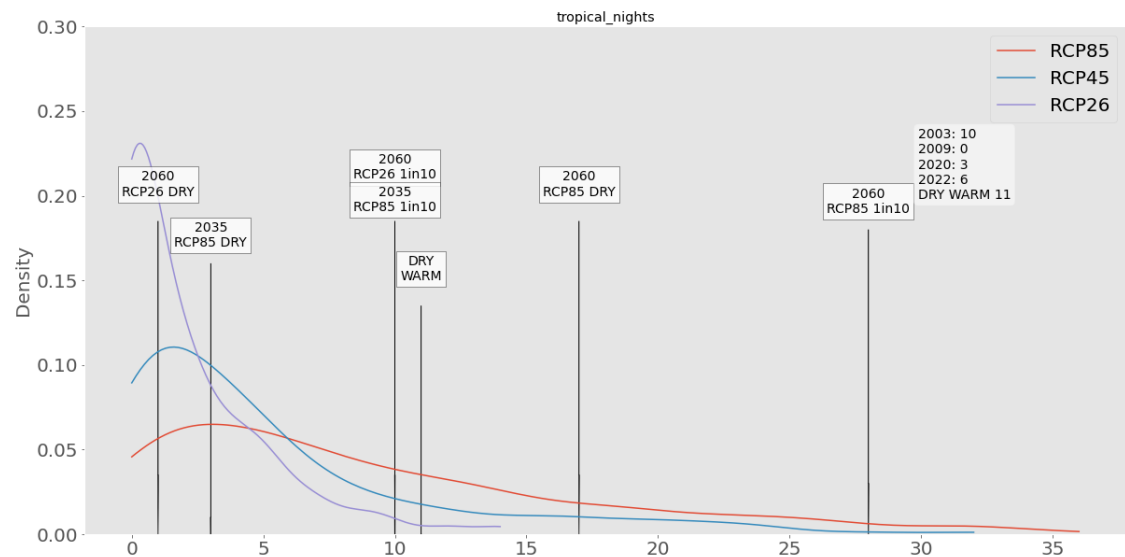
Für den Nutzen der RCP-Klimaszenarien wurden die Daten im Rahmen des Projekts «Klimadaten der Zukunft für Planende» an der HSLU mit MeteoSchweiz und Unterstützung durch die SIA in Stundenwerte für das Jahr 2035 und 2060 umgerechnet. Die daraus entstandenen Klimadaten CH2018 stehen den Planenden nun kostenlos zur Verfügung. Zudem entwickelt sich auch der Trend zu OpenData Plattformen wie zum Beispiel der der Stadt Basel (*Explore — Datenportal BS*, 2020). Dies ermöglicht es zusätzlich aktuelle Wetterdaten für Berechnungen herzunehmen. Der Vergleich der Tageshöchsttemperaturen unterschiedlichen Szenarien zeigt eindeutig den Effekt der Klimaerwärmung. Mit zunehmender Erwärmung nimmt auch die Häufigkeit der Hitzetage zu. Es fällt auf, dass der Klimadatensatz *DRY warm* (SIA, 2014) und empfohlen durch (KBOB, 2008)) die extremste Auslegung darstellt. Dieser Klimadatensatz wurde auf der Basis des Hitzesommers 2003 entwickelt.

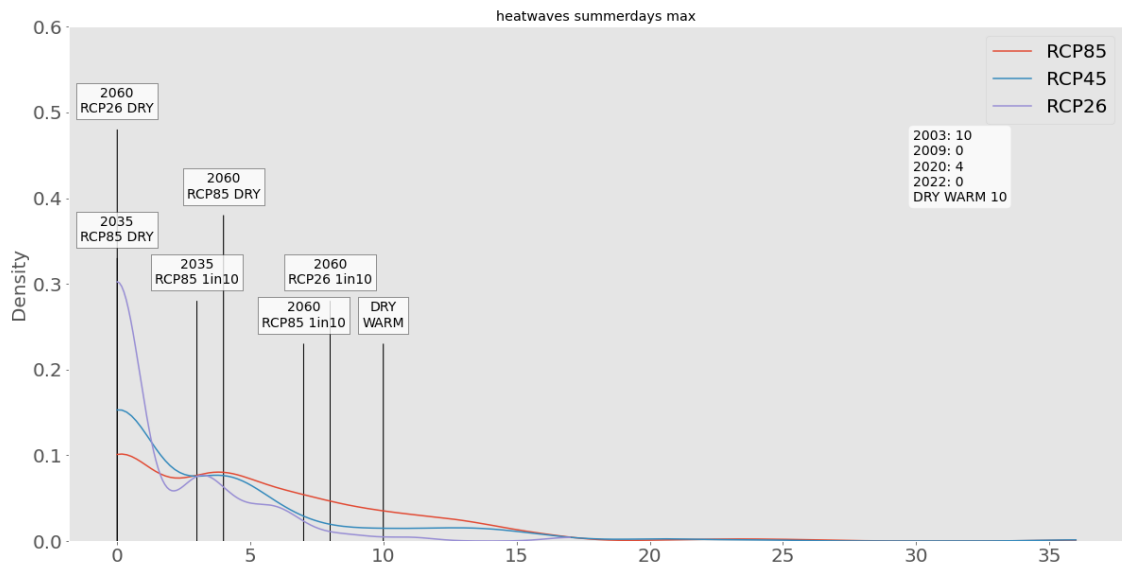
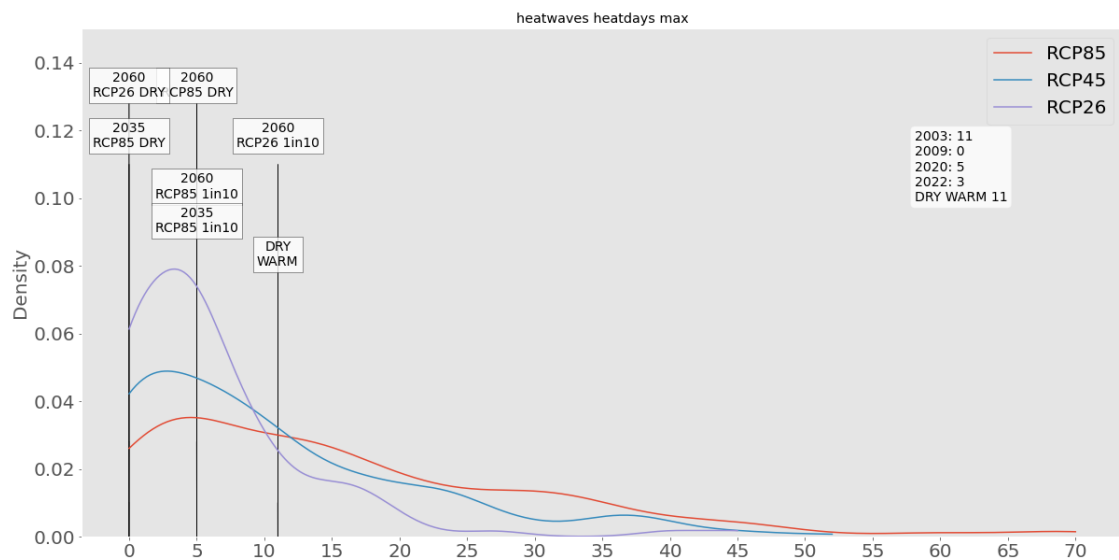
Die SIA CH2018 Datensätze liefern die für die Gebäudesimulation die notwendige Auflösung und fassen einen Teil der zahlreichen CH2018-Szenarien zusammen. Ausgehend von unseren vorläufigen Analysen haben wir einen Vergleich der unterschiedlichen Klimaszenarien bzw. inklusive dem Datensatz *DRY warm* durchgeführt. Zu den wesentlichen Faktoren des Hitzeklimas zählen die Anzahl Hitzetage, Tropennächte und Dauer von Hitzewellen.

Anzahl der Hitzetage unterschiedlicher Klimaszenarien

Diagramm 3-1: Häufigkeit der Hitzetage - Tageshöchsttemperatur $\geq 30^{\circ}\text{C}$

Bei den Tropennächten verhält es sich entsprechend dem gleichen Schema. Mit zunehmender Temperaturextremen, nimmt auch die Häufigkeit der Tropennächte zu.

Anzahl der Tropennächte mit Temperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$ Diagramm 3-2: Häufigkeit/Anzahl der Tropennächte - Tagestiefsttemperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$

Dauer in Tagen von Hitzewellen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ Diagramm 3-3: Häufigkeit/Maximal Dauer der Hitzewellen nach dem Tagesmittel $\geq 25^{\circ}\text{C}$ Dauer in Tagen von Hitzewellen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ und $\geq 30^{\circ}\text{C}$ Diagramm 3-4: Maximale Dauer der Hitzewellen nach dem Tagesmittel $\geq 25^{\circ}\text{C}$ Definition und nach dem Tagesmaximum $\geq 30^{\circ}\text{C}$ Definition

Für Gebäude sind Hitzewellen entscheidend für das sommerliche Komfortklima. Sobald die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes nach heißen Tagen - und vor allem Nächten - erschöpft ist, kann bis zum Ende der Hitzewelle nur noch eine aktive Kühlung den Komfort gemäss SIA Norm 180 gewährleisten.

In diesem Bericht werden zwei Definitionen verwendet, um eine Hitzewelle zu beschreiben:

- Minimum 3 aufeinanderfolgende Tage mit Tagesmittel $\geq 25^{\circ}\text{C}$
- Minimum 3 aufeinanderfolgende Tage mit Tagesmaximum $\geq 30^{\circ}\text{C}$

In Diagramm 3-4 wird die maximale Länge einer Hitzewelle nach beiden Definitionen für die SIA-Szenarien CH2018 berechnet. Für die erste Definition decken die SIA-Daten die Klimavorhersagen für das Jahr 2060 gut ab. Bei der zweiten Definition fällt auf, dass die Länge der Hitzewellen größer zu sein scheint als in den von der SIA vorgeschlagenen Szenarien. Es fällt auch eine gewisse Homogenität der Szenarien auf, die vermuten lässt, dass die Daten untereinander Ähnlichkeiten aufweisen.

Letztendlich stimmen die verschiedenen SIA-Datensätze adäquat mit den Prognosen der CH2018-Szenarien überein. Erstaunlicher ist die gute Übereinstimmung mit den früher verfügbaren *DRY warm* Daten, deren Verwendung in der KBOB-Empfehlung «Bauen, wenn das Klima wärmer wird» enthalten ist.

3.2. Raumklima

Das Raumklima wird ausführlich in der Norm SIA 180 beschrieben. Dabei werden zwei Situationen bzw. Grenzbereiche definiert:

- 1) gekühlte und/oder mechanisch belüftete Räume
- 2) weder beheizte noch gekühlte Räume mit natürlicher Lüftung

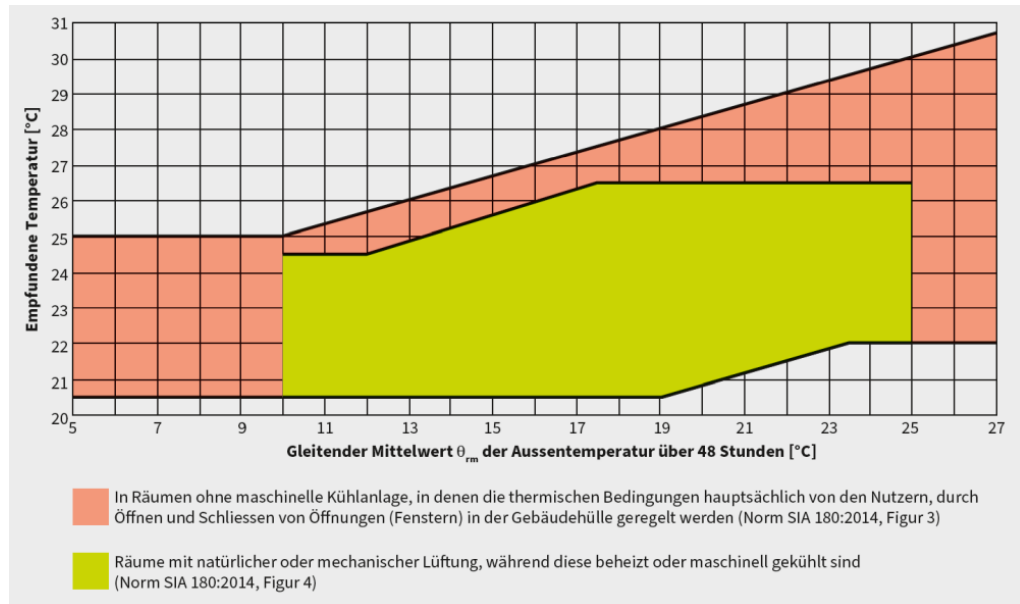


Diagramm 3-5: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Wohn- und Büroräumen, je nach Aussentemperatur (gleitender Mittelwert) nach Norm SIA 180. (Ragonesi et al., 2018)

Werden diese definierten Grenzbereiche für den Fall 1) überschritten, so gelten nach SIA 382/1 folgende Bedingungen:

Bei Neubauten

keine Überschreitung	keine Kühlung notwendig
bis 100 h pro Jahr	Kühlung erwünscht
mehr als 100 h pro Jahr	Kühlung notwendig

Bei Bestandesbauten wie auch Wohnbauten¹

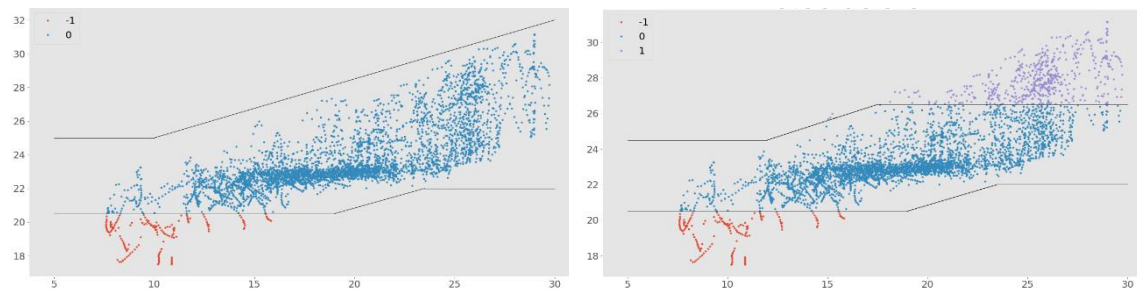
bis 200 h pro Jahr	keine Kühlung notwendig
201 bis 400 h pro Jahr	Kühlung erwünscht
mehr als 400 h pro Jahr	Kühlung notwendig

¹SIA 382/1 Ziffer 4.5.4.3: Bei bestehenden Bauten und bei Wohnbauten mit mechanischer Lüftung kann von einer erhöhten Toleranz infolge Anpassung der Nutzer ausgegangen werden.

Für den Fall 2) ist die Überschreitung des Grenzbereiches nicht zulässig.

In der Praxis zeigt sich, dass auch bei Gebäuden mit natürlicher Fensterlüftung die strengerer Anforderungen gewünscht sind. Eine exemplarische Gegenüberstellung zeigt die Diskrepanz der beiden Bedingungen. Als Beispiel des abstrakten Gebäudes als Holzbau mit einem Klimaszenario 2060 RCP8.5 mit 1/10 Extremfall aufgezeigt (Daten für ein ausserordentliches Jahr mit Temperaturen, welche nur einmal alle zehn Jahre vorkommen).

Schematische Darstellung der Überhitzung Fall 1) und Fall 2) nach SIA 180



Grenzwerte «natural» nach Diagramm 3-5

Grenzwerte «mechanical» nach Diagramm 3-5

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung von Überhitzungsstunden für zwei unterschiedliche Grenzbereiche der SIA 180 am Beispiel eines abstrakten Holzbaus

Während die Grenzwerte für natürliche Lüftung (natural) auch für ein extremes Klima im Jahr 2060 eingehalten werden, stellt sich die Frage, ob dies auch realistischerweise als komfortabel empfunden wird/werden kann. Werden dieselben Daten nach dem Grenzbereich für mechanisch belüftete Gebäude beurteilt, ergibt dies eine absolute Überschreitung von 493 Stunden.

Neueste Untersuchungen zeigen ein differenziertes Bild für die Umsetzung bzw. der Definition der Behaglichkeit. Insbesondere wird im Modell von Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT (de Siqueira, 2015) durch Abhängigkeit des Klimastandortes und der baulichen Komfortweiterung der Grenzraum erweitert. Diese Betrachtung unterscheidet sich vom bisher bekannten Behaglichkeitsbereich der SIA 180 welche für alle Standorte gleichgestellt und somit statisch bleibt.

Building Bio-Climatic Comfort Chart (BBCC)

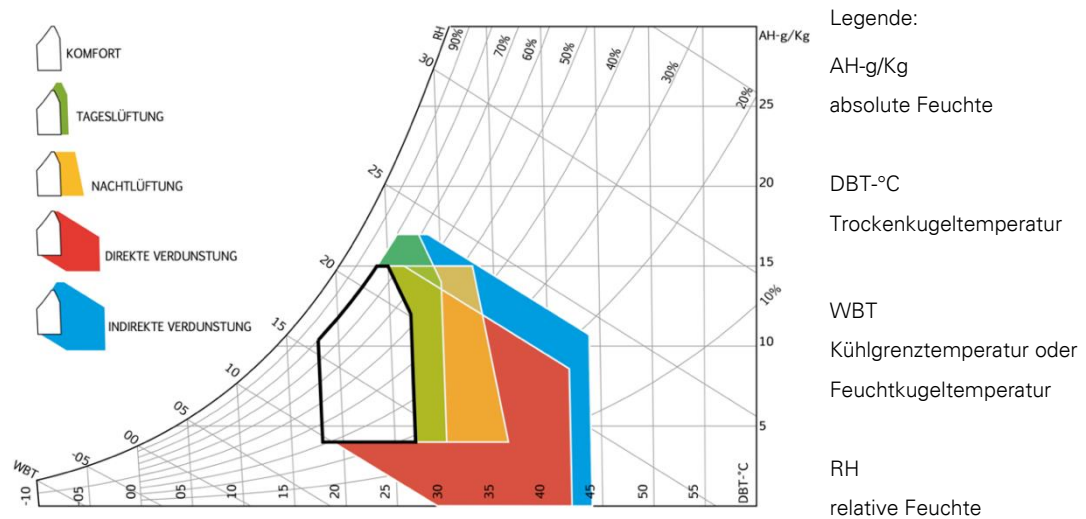


Diagramm 3-6: Building Bio-Climatic Comfort Chart (BBCC) der Industrieländer (de Siqueira, 2015)

Ebenso ist im Diagramm ersichtlich, wie die Strategien wie Tages-/Nachtlüftung, direkte und indirekte Verdunstung den Komfortbereich wesentlich erweitern können. Solche Ansätze werden in der aktuellen Norm SIA 180 (SIA, 2014) zurzeit nicht direkt angesprochen. In der kürzlich erschienenen Wegleitung (SIA, 2022) hingegen, wird in den entsprechenden Kapiteln detailliert Bezug auf die Einflussfaktoren genommen.

3.3. Holzbau versus Massivbau

Eine grosse Frage stellt sich im Rahmen des sommerlichen Wärmeschutzes im Zusammenhang mit den Bauweisen. Leichte Konstruktionen werden diesbezüglich eher schlecht beurteilt. Fehlende Speichermasse und «Barackenklima» werden oft vorgehalten.

Nun stellt sich zu Recht die Frage, ob mit dem Fakt des Klimawandels bei länger werdenden Hitzeperioden diese Behauptungen noch standhalten. Dieser Fragestellung wurde bereits in einer Studie der TU Graz (Ferk et al., 2016) nachgegangen.

Temperaturverlauf im Vergleich unterschiedlicher Baukonstruktionen

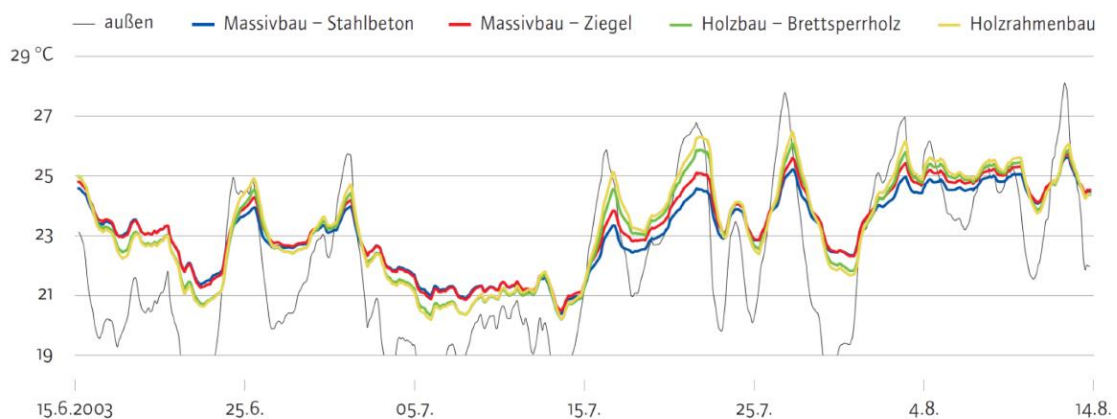


Diagramm 3-7: Gleitende 24h-Temperaturmittel im heissesten Raum für den Fall «base case»²

Darin konnte festgehalten werden, dass durch die begrenzte Speichermasse Konstruktionen in Holzbauweise schneller auf die Aussentemperatur reagieren. Dieser Effekt zeichnet sich einerseits bei der Aufheizphase während eines warmen Tages ab, aber umgekehrt auch während der Nachtauskühlung eines Gebäudes. Stehen Folge dessen längere Hitzewellen an, können Bauten in Leichtbauweise wie Holz die thermischen Lasten über eine Nachtauskühlung effizienter und schneller abführen, obschon über den Tag höhere Lasten eingebracht werden gegenüber einer Massivbauweise. Dieser Effekt konnte auch in vorliegender Studie tendenziell reproduziert werden.

Temperaturverlauf im Vergleich unterschiedlicher Baukonstruktionen

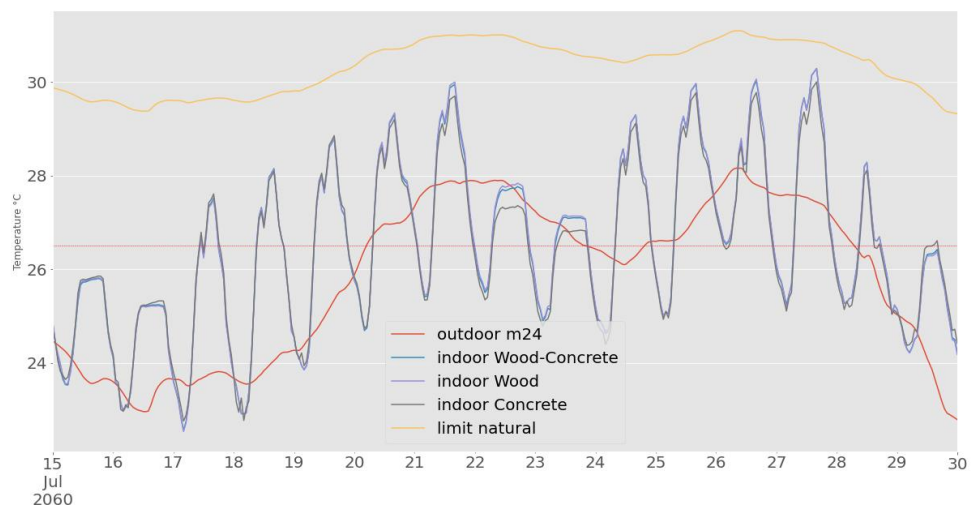


Diagramm 3-8: Temperaturverlauf 1. Stock Erweiterungsneubau Gymnasium Strandboden Biel mit Bautyp, Massiv, Holz-Betonverbund und Holzbau

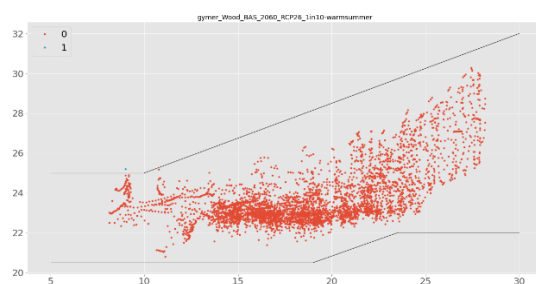
Anhand des Beispiels ist das Verhalten des Gebäudes Erweiterungsneubau Gymnasium Strandboden Biel mit in unterschiedlichen Konstruktionen (Holzbau, Holz-Betonverbund, Massivbau) während einer Hitzewelle im Juli 2060 für das Szenario RCP 2.6 1/10 summer (Raum im 1. Stock) aufgezeigt.

- i. Nach den strengen Kriterien «mechanical» der SIA 180 überhitzt das Gebäude (horizontale Linie bei 26.5 °C).
- ii. Nach den Kriterien «natural» für Gebäude, die weder mechanisch belüftet noch gekühlt werden, findet keine Überhitzung statt (gelbe Linie als Grenzwert).
- iii. Wenn die durchschnittliche Außentemperatur sinkt (Fall 15. bis 17. Juli), kühlt das Holzgebäude tendenziell etwas schneller ab. Dies führt schlussendlich zu einer Innentemperatur, welche tagsüber derjenigen von konventionellen Gebäuden entspricht.

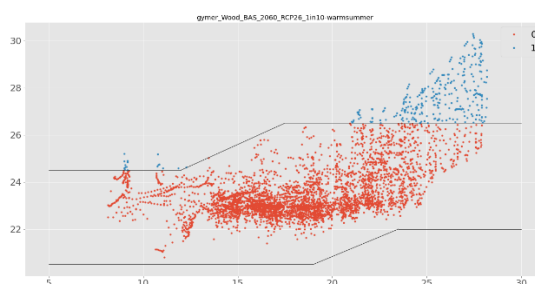
² Anmerkung: Weitere Ergebnisse und Analysen zur RIOPT Studie können dem att.zuschnitt-Arbeitsheft von pro:Holz Austria «Sommerlicher Wärmeschutz im Klimawandel» entnommen werden (frei erhältlich auf www.proholz.at).

- iv. Sobald die Außentemperatur in der Nacht nicht weiter sinkt, können die Gebäude in Holzbauweise die Wärme nicht mehr abführen und weisen höhere Innentemperaturen als Gebäude in Massivbauweise auf (Fall 21. bis 27. Juli). In diesem Fall schneidet die Holzbeton-Verbundkonstruktion marginal besser ab als die Leichtbaukonstruktion.
- v. Wenn die Temperatur wieder sinkt, kühlt sich die Holzbauweise wieder schneller ab als Gebäude in Massivbauweise (Fall 30. bis 31. Juli). Hier schneidet die Leichtbaukonstruktion marginal besser ab als eine Holzbeton-Verbundkonstruktion.
- vi. Die in der Nacht vom 18. Juli sichtbaren Schwankungen der operativen Temperatur sind typisch für das simulierte Verhalten eines natürlich belüfteten Gebäudes und werden durch den Regelalgorithmus verursacht.

Schematische Darstellung der Überhitzung Fall 1) und Fall 2) nach SIA 180



Grenzwerte «natural» nach SIA 180



Grenzwerte «mechanical» nach SIA 180

Abbildung 3-2: Schematische Darstellung von Überhitzungsstunden für zwei unterschiedliche Grenzbereiche der SIA 180 am Beispiel des Gymnasiums Strandboden Biel

Die Abbildung zeigt die Differenz zwischen natural und mechanical Kriterien für SIA 180 für das Gebäude Gymnasium Strandboden Biel im Jahr 2060 für das Szenario RCP 2.6 1/10 Extremfall für einen Raum im 1. Obergeschoss. Der Grenzbereich für mechanische Belüftung (mechanical) wird während 313 Stunden überschritten.

3.3.1. Fensteranteil

Der Fensteranteil ist eine massgebende Grösse für den sommerlichen Wärmeschutz. Durch die Fenster wird nicht nur der Tageslichtanteil gesteuert, sondern einhergehend auch der solare Energieeintrag. Der Fensteranteil wurde in den Berechnungen mit Anteilen von 25%, 35%, 45% und 55% berücksichtigt und pro Klimaszenario ausgewiesen. Als Fallbeispiel dient hier das abstrakte Modell nach Kapitel 2.3.1.

Überhitzungsstunden am abstrakten Modell Raum Süden

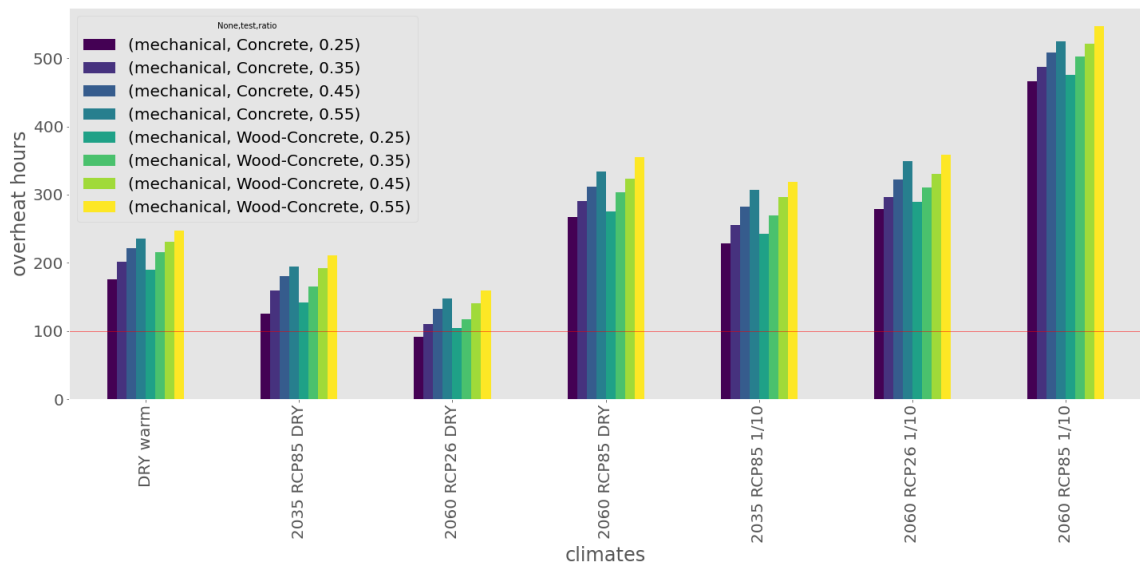


Diagramm 3-9: Gegen Süden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb und unterschiedlicher Konstruktionsweisen

Überhitzungsstunden am abstrakten Modell Raum Norden

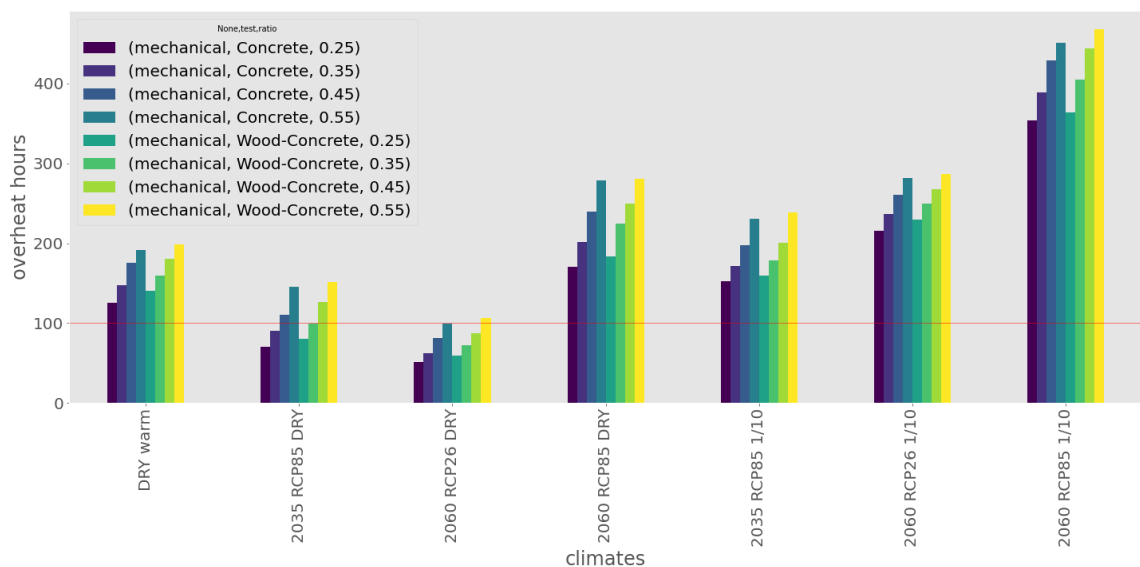


Diagramm 3-10: Gegen Norden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb

Das Verhalten von Gebäuden in Leichtbauweise ist grundsätzlich etwas schlechter als das von Gebäuden in Massivbauweise. Dieser Unterschied wird jedoch umso kleiner, je wärmer das Klima wird. Hingegen hat das Verhältnis Fenster zu Fassade einen deutlich größeren Einfluss als die Wahl der Bauweise.

Als Vergleich wurde dieselbe Situation gerechnet, jedoch ohne Nutzung während den Sommerferien (15. Juli bis 15. August).

Überhitzungsstunden am abstrakten Modell Raum Süden exkl. Sommerbetrieb

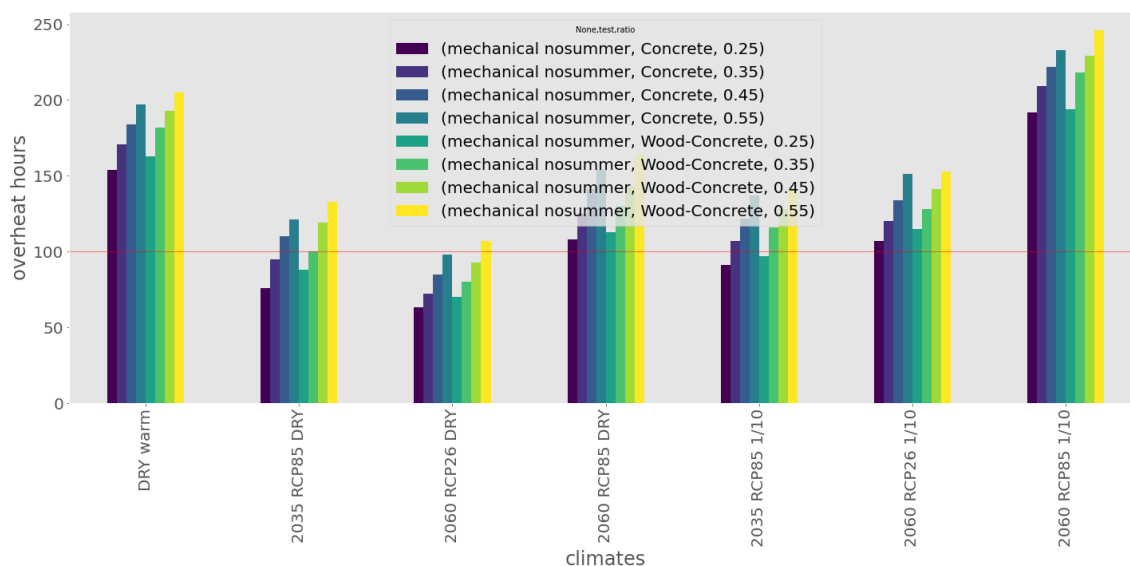


Diagramm 3-11: Gegen Süden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell exkl. Sommerbetrieb

Überhitzungsstunden am abstrakten Modell Raum Norden exkl. Sommerbetrieb

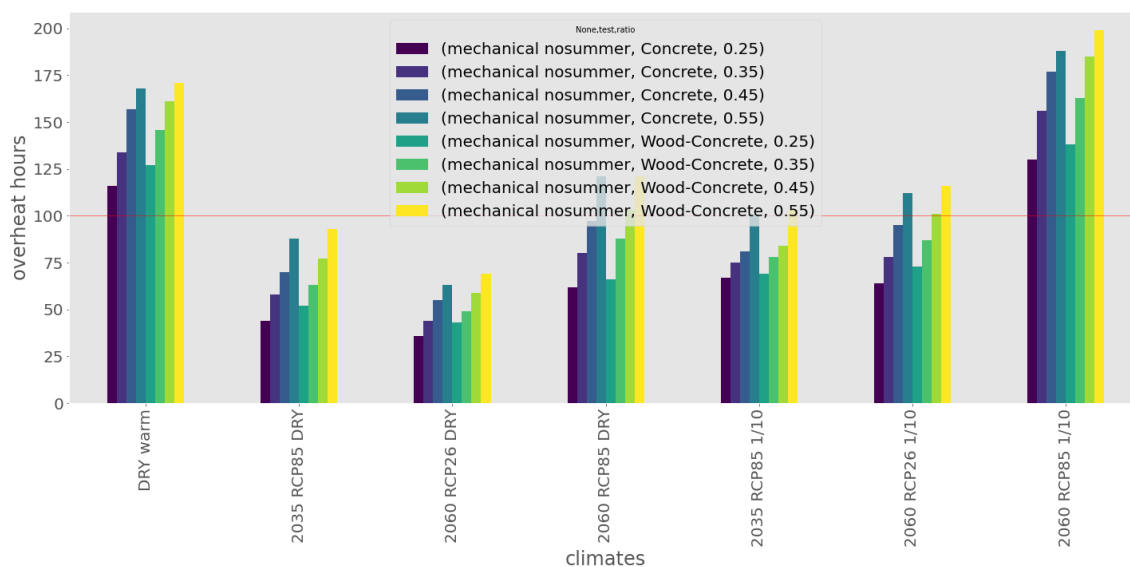


Diagramm 3-12: Gegen Norden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell exkl. Sommerbetrieb

Die Ausklammerung des Sommerbetriebes hat einen positiven Einfluss auf den Raumkomfort. Dies muss aber im Einzelfall geklärt werden, ob und wie dies Sinn macht. Gegen Süden gerichtete Räumen weisen ein höheres Risiko für Überhitzungsstunden auf, welches je nach Klimaszenario markanter oder weniger markanter ausfallen kann.

3.3.2. Fensterhöhe

Die Fensterhöhe kann auf den natürlichen Luftaustausch einen Einfluss ausüben und wird mit den Varianten 160 cm, 200 cm, 240 cm und 280 cm Fensterhöhe simuliert.

Nachfolgend sind die Ergebnisse für das abstrakte Modell dargestellt.

Überhitzungsstunden am abstrakten Modell Raum Süden

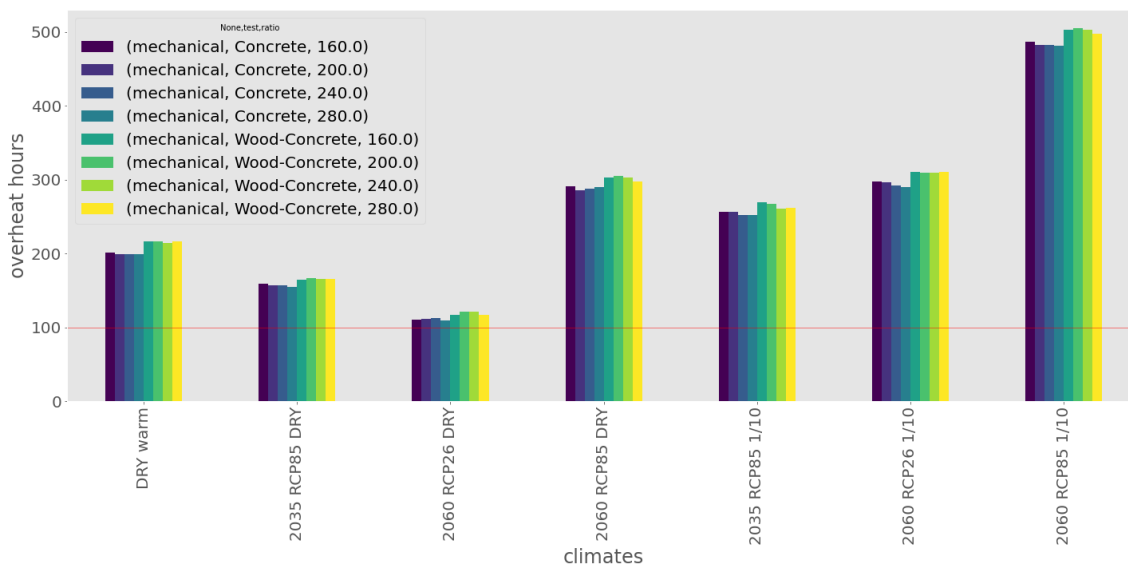


Diagramm 3-13: Gegen Süden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb

Überhitzungsstunden am abstrakten Modell Raum Norden exkl. Sommerbetrieb

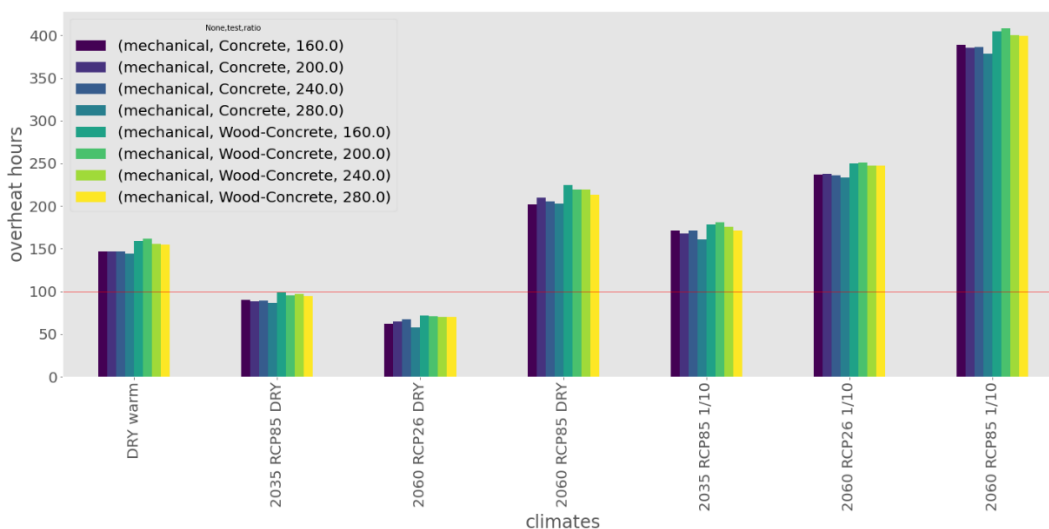


Diagramm 3-14: Gegen Norden ausgerichteter Raum am abstrakten Modell inkl. Sommerbetrieb

Es kann festgestellt werden, dass der Einfluss der Fensterhöhen als geringfügig eingestuft werden kann. Auch ist kein grosser Unterschied zwischen den Bauweisen erkennbar.

3.3.3. Erweiterungsneubau Gymnasium Stranboden Biel

Der Erweiterungsbau Gymnasium Stranboden Biel wurde 2015 als 3-geschossiger Holzbau erstellt mit der Zertifizierung Minergie-P-ECO. Bereits während der Planung wurden die Nachweise des sommerlichen Wärmeschutzes nach den Vorgaben erbracht. Entsprechend wurden daraufhin die baulichen Massnahmen definiert und umgesetzt. So besitzt das Gebäude u.a. eine mechanische Lüftung. Für die Studie ist dieses Fallbeispiel dahingehend von Interesse, da

anhand der Berechnungen mit Daten der Klimaszenarien das Ausmass künftiger Überhitzung quantifiziert werden kann. Dazu wurden drei Räume mit Südausrichtung gewählt.

Überhitzungsstunden Erdgeschoss (links), erster Stock (mitte), oberster Stock (rechts)

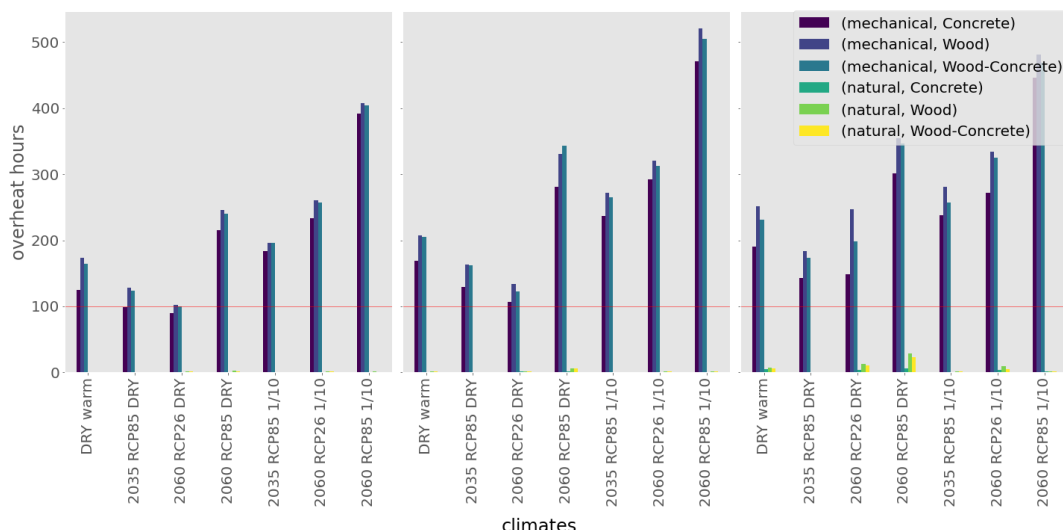


Diagramm 3-15: Überhitzungsstunden für alle Klimaszenarien für einen Raum gegen Süden ausgerichtet. Raum im Erdgeschoss (links), Raum im ersten Stock (Mitte), oberstes Stockwerk (rechts).

Das Überhitzungskriterium von 100 Stunden wird in praktisch allen Fällen überschritten, mit Ausnahme des Szenarios RCP 2.6 DRY 2060 für den unteren Raum, welcher über dem Kellergeschoss liegt. Weiter zeigt sich, dass eine rein mechanische Lüftung für den künftigen Raumkomfort nicht oder kaum genügen wird. Hierzu kann angefügt werden, dass die installierte mechanische Lüftung so ausgerüstet wurde, dass eine aktive Kühlung mittels Wärmepumpe durch Nutzung der naheliegenden Schüss erfolgen kann. Inwiefern diese Vorrichtung dem Raumklima 2060 entgegenwirkt, konnte im Rahmen dieser Studie nicht weiterverfolgt werden.

Es kann festgehalten werden, dass für den Fall des Erweiterungsneubau Gymnasium Strandboden Biel die aktive Kühlung über die mechanische Lüftung, sei es für eine Konstruktionsweise in Massivbau oder Holzbau, für das Raumklima im Jahr 2060 unerlässlich wird.

3.3.4. Aufstockung Primarschulhaus Orpund

Das bestehende Primarschulhaus II in Orpund soll nächstens aufgestockt werden. Aus statischen Gründen wird das neue Geschoss in Holzbauweise realisiert. Insgesamt finden neu zwei geschlossene Klassenräume Platz, welche situationsbedingt durch die bestehende Treppenanlage gegen Süden orientiert sind. Diese Situation stellt für den sommerlichen Wärmeschutz eine Extremlage dar und ist aus diesem Grund interessant für eine weitergehende Betrachtung.

Da sich das Projekt noch in der Planungsphase befindet, stellt sich die Frage, inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse der Berechnungen noch in das Projekt integrieren lassen. Momentan ist neben einem robusten Sonnenschutzsystem und der maximalen Aktivierung der

Nachtauskühlung nichts weiter vorgesehen. Die Berechnungen wurden jeweils so ausgeführt, dass sie die unterrichtsfreie Zeit (15. Juli bis 15. August) während den Sommerferien ausklammern.

Es ist ersichtlich, dass sich beide Räume ähnlich verhalten, was die Anzahl der Überhitzungsstunden anbelangt.

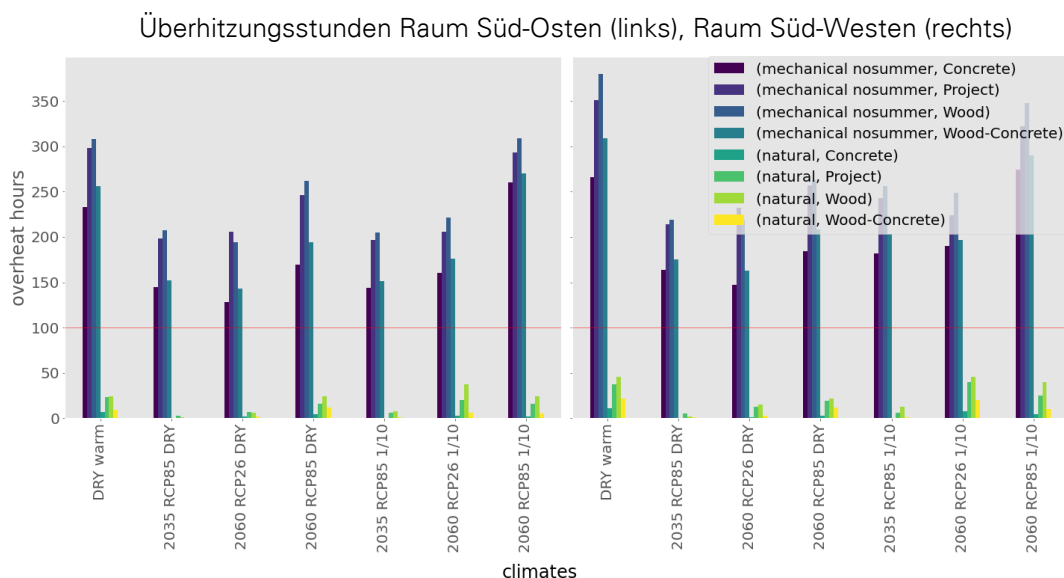


Diagramm 3-16: Überhitzungsstunden für alle Klimaszenarien für den exponierten Raum Aufstockung Süd-Osten (links) und Raum Süd-Westen (rechts).

Das Kriterium der natürlichen Lüftung (natural) wird praktisch in allen Szenarien überschritten. Die Massivbauweise (concrete) kann diese Überschreitungen noch kompensieren. Im Falle einer kontrollierten Lüftung und/oder Kühlung, sind die Grenzwerte für alle Bautypen erheblich überschritten. Somit liegt es auf der Hand, dass eine weitere Optimierung des Projekts Sinn macht, um den Raumkomfort im Jahr 2060 zu verbessern. Wäre eine mechanische Lüftung der Klassenräume geplant, so würden sich ähnliche Überlegungen einer aktiven Kühlung, wie im Beispiel Gymnasium Strandboden Biel aufdrängen.

Nach ersten Gesprächen mit dem Planungsbüro soll die Aufstockung dahingehend optimiert werden, dass die Querlüftung und Nachtauskühlung verbessert, der Anteil exponierter Fensterflächen reduziert, die Speichermasse erhöht und der Platzbedarf und Anschlussmöglichkeiten für eine künftige aktive solargesteuerte Kühlung (Solar Cooling) eingeplant werden soll.

Nachfolgend wird für den gleichen Raum nochmals die Auswirkung mit der Konstruktionswahl Massiv- vs. Holzbau vorgenommen. Der Temperaturverlauf zeigt ein Ausschnitt vom 2. bis 10. August.

Temperaturverlauf im Vergleich unterschiedlicher Baukonstruktionen

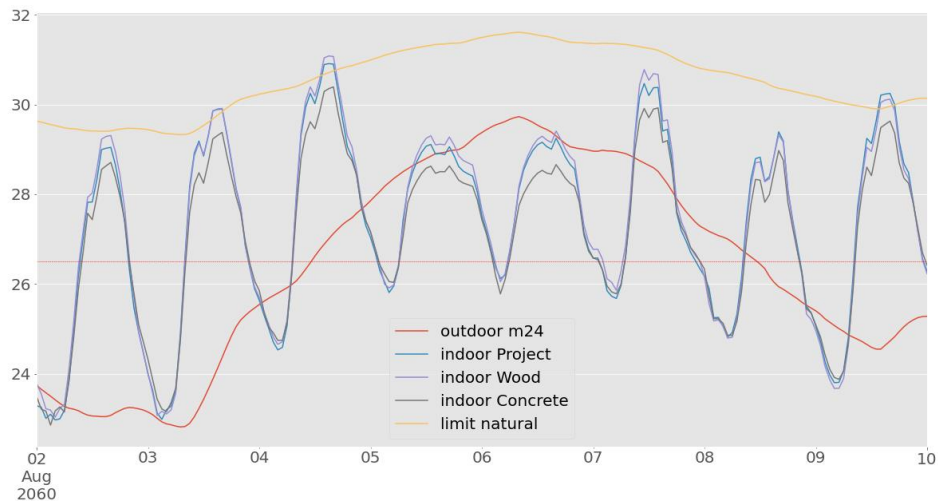


Diagramm 3-17: Temperaturverlauf in den Räumen der Aufstockung für das Klimaszenario 2060 RCP8.5 Extremfall 1/10

Während die Leichtbauweise am Tag zu höheren Innentemperaturen führt, kann sie während der Nacht die thermischen Lasten schneller bzw. effizienter abführen dank fehlender Speichermasse. Dieser Effekt konnte auch schon am abstrakten Modell in Kapitel 3.3 tendenziell festgehalten werden. Die rote horizontale Linie beschreibt den Grenzwert von 26.5°C welcher für mechanisch belüftete und/oder gekühlte Räume nicht überschritten werden darf. Die geplante Aufstockung wird vorerst keine mechanische Lüftung bzw. aktive Kühlung aufweisen.

In der folgenden Grafik wird weiter die Wirkung des Lüftungsöffnungsanteils aufgezeigt. Der Anteil bezieht sich dabei auf die gesamte transparente Fläche der jeweiligen Fassade (z.B. 0.2 = 20% Öffnung der jeweiligen transparenten Fassade). Wie erwartet, verhält sich die Raumtemperatur direktproportional dazu. Je grösser der Anteil an Öffnungen, umso geringer sind die Überhitzungsstunden, da die internen Lasten effizienter abgeführt werden können.

Überhitzungsstunden Raum Süd-Osten infolge Öffnungsanteil

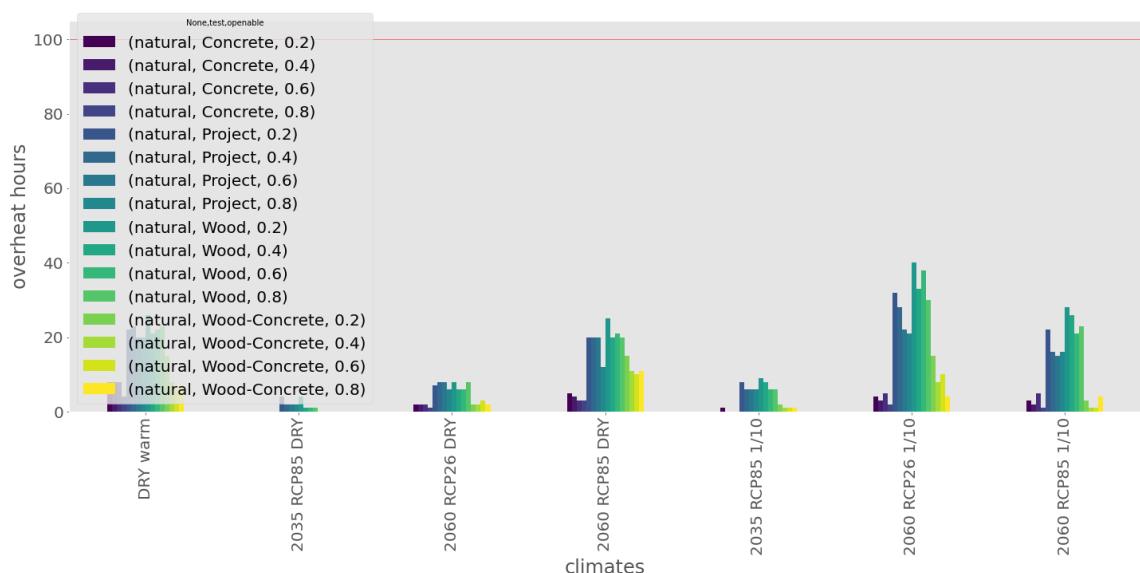


Diagramm 3-18: Überhitzungsstunden für alle Klimaszenarien für den exponierten Raum der Aufstockung Süd-Osten in Abhängigkeit des Öffnungsanteils.

Der ideale Öffnungsanteil der transparenten Fassade liegt offenbar bei rund 40 bis 50%, um eine möglichst effiziente Abführung der internen Lasten zu bekommen. Es ist dabei markant, dass diese Tatsache bei Konstruktionen in Holzbauweise viel markanter ausfällt als bei der Massivbauweise. Hier hat dieser Effekt eine viel geringere Bedeutung.

4. Fazit

4.1. Kernaussagen der Untersuchungen

4.1.1. Bauliche Massnahmen

Die vorliegende Studie konnte unmissverständlich aufzeigen, dass, um den Hitzeschutz dauerhaft und wirksam auch im Jahr 2060 zu gewährleisten, umfangreiche bauliche Massnahmen getroffen werden müssen. Weniger von Interesse ist dabei die Konstruktionsbauweise, ob Massiv oder Holz. Sondern viel mehr der Fensteranteil, deren Öffnungsanteil und die dadurch gegebene Möglichkeit der passiven Kühlung (Nachtauskühlung, Querlüftung) und Aktivierung der Speichermassen.

Gebäudehülle

Als Grundvoraussetzung gilt eine gute Wärmedämmung der Gebäudehülle. Im Winter beschränkt diese die Transmissionswärmeverluste auf ein Minimum und spart somit Heizenergie ein. Im Sommer hingegen schützt sie vor übermässigem Wärmeeintrag, welcher auf das Innenraumklima Einfluss nimmt.

Fenster- und Lüftungsanteile

Der Fensteranteil ist eine der elementaren Grössen bzw. Komponenten für die Steuerung des Innenraumklimas. Der Anteil steuert den solaren Eintrag und hat direkten Einfluss auf das Raumklima. Dies konnte im Kapitel 3.3.1 aufgezeigt werden. Die Autoren erachten hier den Anteil, zumindest auf den exponierten Seiten, von maximal 35% als realistisch. Mit diesem Anteil kann in der Regel auch der gesetzlich vorgegebene Tageslichtbedarf abgedeckt werden.

Für den Lüftungsöffnungsanteil sind 40 bis 50% insbesondere für Bauten in Holzbauweise vorzusehen. Je nach Lage und Ausrichtung könnten diese noch weiter reduziert werden. Es ist hier grundsätzlich zu beachten, dass eine maximale Querlüftung der Räume gewährleistet wird. Nur so kann das volle Potenzial der Nachtauskühlung optimal genutzt werden.

Die Fensterhöhe selbst spielt eine untergeordnete Rolle und kann vernachlässigt werden.

Aktivierung der Speichermasse

Eine grosse Speichermasse, wie sie etwa bei der Massivbauweise vorkommt, ist für den Klimakomfort im Jahr 2060 nicht zwingend besser. Die Holzbauweise hat gegenüber dem Massivbau den Vorteil, dass die Nachtauskühlung für diesen Bautyp effizienter umgesetzt werden kann. Mit zunehmend längeren Hitzewellen haben die Massivbauten wegen ihrer hohen thermischen Masse tendenziell Probleme die gespeicherten thermischen Lasten über die Nachtauskühlung kurzfristig abzuführen.

Die Berechnungen zum Einfluss der Speichermasse mit verschiedenen Konstruktionen haben zudem gezeigt, dass die Wirksamkeit auf Überhitzungsstunden nur gering ist. Andere bauliche Massnahmen wie der z.B. des Fensteranteils sind die effizienteren Massnahmen.

Passive vor aktiven Komponenten

Als passive Massnahme zählt in erster Linie ein robuster Sonnenschutz, sei es fest oder beweglich. Hier ist darauf zu achten, dass der g_{tot} Wert der Sonnenschutzeinrichtung höchstens 20% beträgt. Als passive Komponente kann auch ein Luft-Erdregister, Solar Cooling oder Ventilatoren gezählt werden. Die Systeme können die dezentral verfügbare Ressource oder die verfügbare erneuerbare Energie wie Photovoltaik nutzen.

Die Analyse der Klimadaten hat klar aufgezeigt, dass solche Systeme für das Raumklima im Jahr 2060 unerlässlich werden. Die nach heutigen Grundlagen zu dimensionierenden kontrollierten Lüftungen können das Komfortklima noch bis rund 2035 gewährleisten. Danach werden die maximal zulässigen Überschreitungsstunden von 100 h für jede Bauweise überschritten.

4.2. Fragestellung

- a) Welche baulichen Massnahmen für einen effektiven Sonnenschutz sind zu treffen?

Abgesehen davon, ob ein Sonnenschutz automatisiert oder manuell erfolgt, ist dafür zu sorgen, dass die Effektivität des Sonnenschutzes so hoch wie möglich sein soll. Systeme sollten ein g_{tot} von $\leq 20\%$ aufweisen. Der Fensteranteil auf den exponierten Seiten (Ost, Süd, west) ist dabei auf maximum 35% zu begrenzen.

- b) Wie schafft man es die natürliche Lüftung so zu gestalten, dass sie einen wesentlichen Effekt der Abkühlung mit sich bringt?

Die natürliche Lüftung wurde in der Studie mit der klassischen Fensterlüftung berücksichtigt mit der Variation des Öffnungsanteils. Dabei konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass beim Bautyp der Holzbauweise ein massgebendes Potenzial mit diesem Parameter besteht. Ein Öffnungsanteil von 40 bis 50% ist dabei günstig. Bei der Massivbauweise ist dieser Effekt nicht so gross und kann dort vernachlässigt werden.

- c) Wie ist die Nachtauskühlung in Gebäuden zu integrieren, um thermisch einen möglichst optimalen Nutzen zu bekommen?

Dieser Antwort kann im Rahmen der Studie nicht beantwortet werden. Die vor kurzem erschienene Wegleitung zur SIA Norm 180 (SIA, 2022) sind jedoch dazu wertvolle Hinweise in Kapitel 5.3.1 zu finden.

- d) Wie sehen die Behaglichkeitsgrenzen im Jahr 2060 genau aus?

Dieser Aspekt konnte leider nicht weiterführend untersucht werden. Den Autoren erscheint es jedoch plausibel, dass bei zunehmenden Hitzeperioden der menschliche Körper die Hitzetoleranz etwas ausweiten kann und dementsprechend auch eine Erweiterung der Behaglichkeit stattfindet. In welchem Masse diese stattfindet, wurde jedoch nicht untersucht bzw. ergründet. Gemäss Aussagen von Hanns-Christian Gunga, Physiologe und Experte für Extrembedingungen am Zentrum für Weltraummedizin der Berliner Charité kann sich der menschliche Körper an die Hitze gewöhnen (Schumann, 2019).

Die Autoren empfehlen diesen Aspekt genauer zu untersuchen, da er für die Berechnung eines Kühlbedarfes ebenso nachhaltig berücksichtigt werden könnte.

- e) Gibt es u. U. bautypische Unterschiede zu beachten für einen Holzbau bzw. Hybridbau im Vergleich zu Massivbau?

Die zwei Bautypen stehen im Sinne der Speichermasse grundsätzlich gegenteilig zueinander. Die Leichtbauweise kann thermische Lasten nicht/kaum puffern und die Raumtemperatur nimmt dadurch rasch zu. Bei Massivbauten dauert es länger bis zur «Hitzesättigung».

Nun ist die Betrachtung im Zusammenhang mit zunehmenden und länger andauernden Hitzewellen eine differenziertere: Massivbauten können in längeren Hitzeperioden eine Sättigung erfahren. Rein über die Nachtauskühlung können die thermischen Lasten nicht mehr vollständig oder langsamer abgeführt werden. Die Leichtbauweise in Holz kann die Temperaturen in der Regel besser bzw. schneller absenken. Das haben einerseits die Untersuchungen (Ferk et al., 2016) der RIOPT-Studie gezeigt und konnte ebenso in vorliegender Studie als Tendenz bestätigt werden. Die viel beschriebene Speichermasse bekommt unter dem Aspekt des Klimawandels eine neue Bedeutung zugeschrieben.

- f) Gibt es daraus Punkte, welche in der Normierung bereits heute vorgesehen werden müssen?

Der Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz wird in der SIA 180 behandelt. Die Grundlagen dazu, insbesondere die Klimadaten (Design Reference Year DRY), sind in der Norm SIA 2028 festgehalten. Mit der ergänzenden Publikation der «Anwendungsempfehlung zu den stündlichen Klimadatensätzen für die Zukunft» wird unter Kapitel 3 eine konkrete Empfehlung der Verwendung der neuen Klimadatensätze SIA CH2018 je nach Anwendungsfall abgegeben. Da eine Empfehlung jedoch keine rechtlich

bindende Planungspflicht ist, wird sich erst noch zeigen, ob diese Empfehlungen wirklich auch genutzt werden.

Besser wäre eine Pflicht zur Nutzung der neuen Klimadatenätze. So könnte z.B. die Verwendung dieser Datensätze im Rahmen von Wettbewerben/Ausschreibungen vorgeschrieben werden. Denkbar ist, dass öffentliche Bauherren mit diesem Beispiel voran gehen könnten.

Weiter gibt es den Punkt der Behaglichkeit, welche ebenso in der SIA 180 festgelegt ist. Diese ist für die gesamte Schweiz einheitlich geregelt. Die Autoren sind der Meinung, dass die Behaglichkeit je nach Klimastandort schwanken kann. Hier gibt es den Bezug zur bereits festgestellten Tatsache, dass sich der menschliche Körper an neue Rahmenbedingungen anpassen kann. Entsprechend wäre es denkbar, den definierten Behaglichkeitsbereich in Abhängigkeit verschiedener Klimastandorte zu setzen. Ergänzend können/sollten auch die positiven Einflussfaktoren zur Erweiterung der Behaglichkeit analog Diagramm 3-6: Building Bio-Climatic Comfort Chart (BBCC) der Industrieländer (de Siqueira, 2015) aufgeführt werden. Diese Erweiterung hat das Ziel, die unausweichlich notwendige aktive Kühlung auf ein Minimum zu reduzieren.

Eine ähnliche Betrachtung muss den Grenzwerten für mechanische Lüftung und natürliche Lüftung beigemessen werden. Diese zwei Szenarien sind zu strikt und lassen keine Hybridsysteme zu. Die Grenzbereiche können/sollten in Abhängigkeit der Klimastandorte gesetzt werden.

4.3. Ausblick und weiterführende Ergänzungen

Mit der Bearbeitung der vorliegenden Studie ist den Autoren bewusst geworden, wie wenig erforscht das untersuchte Gebiet noch ist. Das hat sich insbesondere darin gezeigt, dass erst vor Kurzem die neuen Klimadaten SIA CH2018 zur Verfügung gestellt wurden.

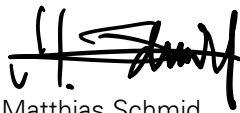
In der Analyse der Daten hat sich gezeigt, dass bestehende Grenzwerte und Definitionen von Klimakomfort mit den künftigen klimatischen Gegebenheiten vermutlich ungenügend korrespondieren. So sehen wir die Grenzen zwischen den natürlich belüfteten Räumen und solchen welche mechanisch gekühlt/beheizt werden als zu streng. Weiterführende Studien zum Klimakomfort (de Siqueira, 2015) zeigen hier z.B. weitere Möglichkeiten auf. So sind z.B. auch die Komforterweiterungen durch Nachtlüftung und Verdunstung wichtige Aspekte, welche zu berücksichtigen sind.

So sehen wir es gemäss heutigem Stand als gegeben, dass zu planende Gebäude mit den neuen Klimasätzen oder nach *DRY warm* berechnet bzw. dimensioniert werden. Weiter wäre es sinnvoll für Planende und öffentliche Bauherren eine Plattform zum Thema «Bauen im Klimawandel» o.ä. zur Verfügung zu stellen. Folgende Aspekte könnten abgebildet werden:

- Grundlagen für Wettbewerbe für den Umgang mit dem Klimawandel schaffen
- Bereitstellung der betreffenden klimarelevanten Normen (freie Verfügung)
- Bereitstellung von Tools (open Source)
- Best Practice Beispiele
- Performance Gap aufzeigen

Biel/Bienne, 20. Dezember 2022

Prona AG



Matthias Schmid

MSc., Dipl. Ingenieur FH / SIA / REG B

Executive MBA (SUPSI)

Fachbeirat Berufsgruppe Technik (bgt) der SIA

Mitwirkung

Dr. Julien Nembrini

Dr. Robotik, Dipl. Mathematik

Senior Researcher Universität Freiburg

Literaturverzeichnis

- Anpassung an den Klimawandel: Bundesrat verabschiedet Aktionsplan für 2020–2025.* (o. J.). Abgerufen 16. November 2020, von <https://scnat.ch/de/id/YCuuq>
- Brunner, C., Steinemann, U., & Nipkow, J. (2007). *Schlussbericht, Bauen wenn das Klima wärmer wird*. Bundesamt für Energie BFE. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21605351>
- Daten zum zukünftigen Klima (zu SIA 2028).* (o. J.). Abgerufen 27. November 2022, von <https://www.energytools.ch/index.php/de/downloads/datenbanken/download/4-datenbanken/78-2028-zukuenftiges-klima-d>
- de Siqueira, L. (2015). *Klimaadaptive Entwurfsmethodik* [Universität Hamburg]. <https://e-doc.sub.uni-hamburg.de/hcu/volltexte/2015/218/pdf/klade.pdf>
- EnergyPlus | EnergyPlus.* (o. J.). Abgerufen 18. November 2020, von <https://energyplus.net/>
- Explore—Datenportal BS.* (2020, November 16). <https://data.bs.ch/explore/?sort=modified>
- Ferk, H., Rüdissler, D., Riederer, G., & Majdanac, E. (2016). *Sommerlicher Wärmeschutz im Klimawandel Einfluss der Bauweise und weiterer Faktoren*. proHolz Austria.
- Home—Datenportal BS.* (o. J.). Abgerufen 15. Dezember 2022, von <https://data.bs.ch/pages/home/>
- KBOB, K. der B. L. der öffentlichen B. (2008). *Bauen, wenn das Klima wärmer wird*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiosf-jtortAhUBsXEKHe1iAoEQFjABegQIB-BAC&url=https%3A%2F%2Fwww.kbob.admin.ch%2Fdam%2Fkb>
- Klimadaten SIA 2028.* (o. J.). Abgerufen 27. November 2022, von <https://www.energytools.ch/index.php/de/downloads/grundlagenberichte/download/5-grundlagenberichte/47-klimadaten-sia-2028-de>
- NCCS, N. C. for C. S. (o. J.). *A.15 Aktuelle Klimadaten für Bauplanende*. Abgerufen 16. November 2020, von <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak/projekte-phase2/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel-cluster-umgang/-a-15-aktuelle-klimadaten-fuer-bauplanende.html>
- Ragonesi, M., Paulus, A., Plüss, I., Notter, G., Burkhardt, D., & Miloni, R. (2018). Wärmeschutz im Sommer. In *Bautechnik der Gebäudehülle* (3. Aufl.). vdf Hochschulverlag AG. <https://enbau-online.ch/bautechnik-der-gebaeudehuelle/2-3-waermeschutz-im-sommer/>
- Schumann, F. (2019, Juni 24). Anpassung an Extremtemperaturen: Das geheime Leben des Körpers in der Hitzewelle. *Der Tagesspiegel Online*. <https://www.tagesspiegel.de/wissen/das-geheime-leben-des-korpers-in-der-hitzewelle-5697952.html>
- SIA. (2014). *SIA 180 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein.
- SIA. (2022). *SIA 180 Wegleitung D4001*. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein.