

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFESektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 24. November 2021

ResCool: Klimaanpassung von Neu-, Umund bestehenden Wohnbauten – effiziente Kühlkonzepte



Lucerne University of Applied Sciences and Arts

HOCHSCHULE LUZERN

Technik & Architektur

Datum: 24. November 2021

Ort: Horw

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE Sektion Energieforschung und Cleantech CH-3003 Bern www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Bundesamt für Umwelt BAFU Sektion Klimaberichterstattung und -anpassung CH-3003 Bern www.bafu.admin.ch

Implenia Schweiz AG Industriestrasse 24 CH-8305 Dietlikon www.implenia.com

XtegraSol GmbH Gäbrisstrasse 46 CH-9056 Gais www.xtegrasol.ch

Subventionsempfänger/innen:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur Institut für Gebäudetechnik und Energie Technikumstrasse 21, 6048 Horw www.hslu.ch

Swiss Tropical and Public Health Institute Socinstrasse 57 CH-4002 Basel www.swisstph.ch



Autor/in:

Markus Koschenz, Hochschule Luzern T&A (IGE), markus.koschenz@hslu.ch Silvia Domingo-Irigoyen, Hochschule Luzern T&A (IGE), silvia.domingo@hslu.ch Mathias Niffeler, Hochschule T&A (IGE), mathias.niffeler@hslu.ch Martina Ragettli, Swiss Tropical and Public Health Institute, martina.ragettli@swisstph.ch Benjamin Flückiger, Swiss Tropical and Public Health Institute, benjamin.flueckiger@swisstph.ch Mladen Kafadar, Implenia Schweiz AG, mladen.kafadar@implenia.com Christian Widmer, Xtegrasol GmbH, cw@xtegrasol.ch Kathrin Wehrli, MeteoSchweiz, kathrin.wehrli@meteoswiss.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch Nadège Vetterli, nadege.vetterli@anex.ch

BAFU-Projektbegleitung:

Carla Gross, carla.gross@bafu.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501971-01 BAFU-Vertragsnummer: 19.0092.PJ

Begleitgruppe:

Carla Gross, carla.gross@bafu.admin.ch
Rolf Moser, rolf.moser@enerconom.ch
Martin Röösli, Swiss Tropical and Public Health Institute, martin.roosli@swisstph.ch
Lennart Bisgaard, Implenia Schweiz AG, Iennart.bisgaard@implenia.com
Christian Widmer, Xtegrasol GmbH, cw@xtegrasol.ch
Urs-Peter Menti, Hochschule Luzern T&A (IGE), urs-peter.menti@hslu.ch

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



Zusammenfassung

Die Untersuchung zeigt konkrete Lösungen auf, wie der Komfort für den Menschen in Neu-, Um- und bestehenden Wohnbauten unter dem Einfluss des Klimawandels in einem erträglichen Bereich gehalten werden kann. Dieser Frage wird sowohl aus epidemiologischer als auch aus technischer Sicht nachgegangen. Aus epidemiologischer Sicht wird geklärt, ob die in den Normen zulässigen Temperaturen mit den Erkenntnissen aus dem Zusammenhang zwischen Sterblichkeit und Innentemperatur und der nächtlichen Erholung übereinstimmen (Abschnitt 5). Aus technischer Sicht wird die Leistungsfähigkeit verschiedener Kühllösungen untersucht (Abschnitt 3.3 und 3.4). Dazu werden sechs zentrale Kälteerzeuger mit fünf Kälteabgabesystemen, zwei dezentrale raumweise und drei lokale Kühllösungen untersucht. Ein spezieller Fokus wird auf Kühllösungen gelegt, die in der Nähe oder direkt am Körper des Menschen wirken (Abschnitt 4). Die Kühllösungen werden in einen Neu- und einen sanierten Altbau integriert und umfassend bewertet. Die Bewertung erfolgt bezüglich ihrer Wirksamkeit (Überhitzungsstunden), der Kosten aus Erstellung, Betrieb und Rückbau, ihrer Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb, ihrer Akzeptanz und des Ausführungszeitpunkts ihrer baulichen Integration (Abschnitt 6). Eine Zuordnung zu den wesentlichen Anspruchsgruppen versucht den Brückenschlag in die Anwendung (Abschnitt 7). Da die Bewertung der Kühllösungen stark von den klimatischen Bedingungen abhängig ist, wurden zusammen mit MeteoSchweiz konsistente Klimadaten¹ für die Zeitperiode 2045-2074 identifiziert (Abschnitt 3.1).

Der Klimawandel hat eingesetzt und die Temperaturen steigen. In dieser Untersuchung wird davon ausgegangen, dass die mittlere Sommertemperatur im Zeitraum 2045-2074 gegenüber der Periode 1981-2010 um weitere 2.5°C (genannt Medianjahr 2060) bis 4.1°C (genannt heisses Jahr 2060, Häufigkeit alle 5-10 Jahre) ansteigt. Bezüglich der mittleren Sommertemperatur entspricht das Medianjahr 2060 dem Jahr 2018, das heisse Jahr 2060 dem Jahr 2003. Extremjahre wie 2003 und 2018 werden zum Standard und beeinflussen den Komfort des Menschen im Gebäude und im Aussenraum zunehmend negativ.

Wie aus der epidemiologischen Untersuchung hervorgeht, reagiert der Mensch bezüglich Wohlbefinden, Erholung und Gesundheit auf hohe Innentemperaturen ausgesprochen sensitiv, speziell die ältere Bevölkerung. Bei maximalen Temperaturen über 21°C während der Nacht und maximalen Temperaturen über 24°C am Tag steigt die Sterblichkeit an. Jüngere Personen können Abweichungen von der optimalen Temperatur besser kompensieren. Die in der Norm SIA 180 (1) beschriebenen maximal zulässigen Innentemperaturen am Tag und in der Nacht von 26.5°C für gekühlte Wohnbauten und über 29°C² für ungekühlte Wohnbauten sind, gemessen an den Gesundheitsrisiken, zu hoch angesetzt. Es wird empfohlen, die Temperaturanforderungen sowohl für den Tag als auch für die Nacht (Schlafräume) anzupassen. Mit Blick auf den Grossteil der Bevölkerung wird für die Bewertung der Kühllösungen in dieser Untersuchung von einer maximalen Innentemperatur von 26°C am Tag (Wohnzimmer) und 24°C in der Nacht (Schlafzimmer) ausgegangen.

Über 60% der Detailmassnahmen zu den goldenen Regeln für Hitzetage des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) (2) stehen im direkten Zusammenhang mit der Temperaturentwicklung im Gebäude und der Kühlung des Menschen. Dies verdeutlicht die Bedeutung eines auf den Klimawandel ausgerichteten Gebäudeparks.

Das volle Ausmass des Klimawandels auf den Komfort im Gebäude wird erst in (naher) Zukunft umfassend spürbar. Die Einhaltung einer akzeptierbaren Innentemperatur während dem Sommer kann ein Kriterium für die Vermietbarkeit von Liegenschaften werden. Zukünftig ist eine Mieterfluktuation bei zu hohen Temperaturen wahrscheinlich. Mit steuerlichen Anreizen, einem Förderprogramm oder Nut-

¹ Die verwendeten Klimadaten wurden in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz für das Projekt ResCool festgelegt. Sie repräsentieren das Emissionsszenario RCP8.5 (siehe Abschnitt 3.1).

² Maximale Innentemperaturen über 29°C sind gemäss SIA 180 ab einem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden von 21.5°C für natürlich belüftete Räume zulässig (siehe Abschnitt 3.2).



zungsboni im Bewilligungsverfahren könnten bereits heute innovative Konzepte zu einem umfassenden sommerlichen Wärmeschutz – der den Aussenraum in Ergänzung zur normativen Regelung mit einbezieht – für Neu- und bestehende Bauten gefördert werden. Der umfassende sommerliche Wärmeschutz sollte in der frühen Planungsphase noch prioritär behandelt werden, weil er die Innentemperatur und den Kühlbedarf stark beeinflusst. Wegen der langen Lebensdauer der Gebäude ist es sinnvoll, sie bereits heute auf das Klima 2060 auszurichten. Dies bedingt eine langfristige Entwicklungsund Baustrategie der Immobilieninvestoren und -besitzenden, aber auch der öffentlichen Hand.

Die Fensterlüftung ist weiterhin die wichtigste Kühllösung. Bei einer gegenüber der SIA 180 verschärften Temperaturanforderung von maximal 24°C am Tag und 21°C während der Nacht kann die Fensterlüftung den Komfort während 20%, bei maximal 26°C am Tag und 24°C in der Nacht während 70% der Belegungszeit sicherstellen (Standort Basel-Binningen). An wärmeren Standorten werden diese Zeiten reduziert. Eine Kompensation einer höheren Innentemperatur, durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Person durch die Fensterlüftung, wird nicht berücksichtigt (Abbildung 16). Die Optimierung ihrer Effizienz soll während der Konzeptphase sowohl auf Stufe Gebäude als auch auf Stufe Aussenraum berücksichtigt werden. Zu beachten ist, dass nicht an allen Gebäudestandorten und in allen Geschossen eine Fensterlüftung möglich ist.

In Ergänzung zur Fensterlüftung stehen für bestehende Gebäude noch keine dezentralen Alternativen zu mobilen Kühlgeräten und Split-Kühlgeräten zur Verfügung – ausser der Kühlung über die Fussbodenheizung (zentrale Lösung). Werden mobile Kühlgeräte oder Split-Kühlgeräte eingesetzt, sollen sie mit einem natürlichen Kältemittel ausgestattet sein und eine hohe Leistungszahl aufweisen. Die Bettenkühlung, bei der mit einer Wassertemperatur von 30°C der individuelle Komfort während der Nacht sichergestellt werden kann, auf dem Körper tragbare Kühlelemente und kühlende Textilien verfügen über das ökologische und das ökonomische Potential, sich als zukünftige Kühllösungen zu etablieren. Diese Technologien sind noch in der Entwicklung und bedingen eine Kollaboration zwischen Industrie und Forschung. Der Standventilator führt zu einer örtlichen Temperaturreduktion vor allem am Tag.

Für Neu- und Umbauten stehen effiziente kombinierte Heiz-/Kühlsysteme (multifunktional³) in Verbindung mit einer flächenintegrierten Kälteabgabe zur Verfügung. Zu berücksichtigen ist, dass Innentemperaturen unter 24°C in der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären, wegen der limitierenden Temperatur der Kälteabgabe (Taupunkt, Quellentemperatur) nicht erreichbar sind. Die mit einem Kälteerzeuger ergänzte Fussbodenheizung eignet sich vor allem auch in bestehenden Bauten zur Kühlung des Schlafzimmers und zur Abkühlung des Wohnzimmers. Die Treibhausgasemissionen für die Erstellung der Kühllösung können mit deren Wahl – ausgehend vom Mittelwert der untersuchten Lösungen – halbiert oder verdoppelt werden. Bei Neu- und Umbauten wird empfohlen, die zentrale Kühllösung zum Zeitpunkt der Bautätigkeit vollständig zu integrieren. Minimal sollte das Leitungssystem für die Raumkühlung zentral in die Wohnungen geführt und für einen späteren Anschluss vorbereitet werden.

Die benötigte Nutzenergie zum Kühlen ist stark von der Kühlwirkung der Fensterlüftung und der akzeptierbaren Innentemperatur abhängig. Sie liegt für die untersuchten Kühllösungen und Bauten am Standort Basel-Binningen bei einer maximalen Innentemperatur am Tag von 26°C und in der Nacht von 24°C zwischen 4 kWh/(m²_{EBF} a) für das Medianjahr 2060 und 6 kWh/(m²_{EBF} a) für das heisse Jahr 2060. Bei einer maximalen Innentemperatur von 24°C Tag und Nacht zwischen 10 kWh/(m²_{EBF} a) für das Medianjahr 2060 und 12 kWh/(m²_{EBF} a) für das heisse Jahr 2060.

Der daraus resultierende Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb sind, wegen den hohen Leistungszahlen der Kälteerzeugung (ausser bei den mobilen Kühl- und Splitgeräten) im Vergleich zu den Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, von untergeordneter Bedeutung. Bei der Auswahl der Kühllösungen rücken die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung in den Vordergrund. Für die Dimensionierung des Kälteerzeugers und der Kälteabgabe soll sowohl die

³ Multifunktionale Systeme sind Kühllösungen, die sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen eingesetzt werden. Damit wird eine hohe Nutzungsdauer (Volllaststunden) erreicht und der eingesetzte Materialverbrauch, der für die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung verantwortlich ist, ist im Verhältnis zur Nutzenergie geringer.



Kühl- als auch die Heizleistung ermittelt und der höhere Wert für die Systemauslegung verwendet werden.

Die Empfehlungen an eine Auswahl von Anspruchsgruppen, wie Investoren und Immobilienbesitzende, ArchitektInnen und Planende, Behörden, Normengremien und Mietende (Abschnitt 7) zeigen, dass das Gelingen eines klimagerechten Bauens vom Handeln einer Vielzahl von Akteuren abhängt. Mit über zwanzig Empfehlungen für Massnahmen wird versucht, den Brückenschlag zwischen den Erkenntnissen der Untersuchung und der praktischen Anwendung zu erreichen.



Résumé

L'étude présente des solutions concrètes pour maintenir le confort thermique dans les bâtiments résidentiels neufs, assainis et existants en vue du changement climatique dans une plage de températures tolérables. Cette étude examine la question tant d'un point de vue épidémiologique que technique. D'un point de vue épidémiologique, il s'agit de clarifier si les températures admises dans les normes sont en accord avec les résultats sur la relation entre la mortalité et la température intérieure et la récupération nocturne (section 5). D'un point de vue technique, les performances des différentes solutions de refroidissement sont étudiées (sections 3.3 et 3.4). À cette fin, six climatiseurs centraux avec cinq systèmes de distribution de froid, deux systèmes décentralisés pièce par pièce et trois solutions de refroidissement local sont analysés. Une attention particulière est accordée aux solutions de refroidissement qui agissent à proximité ou directement sur le corps humain (section 4). Les solutions de refroidissement sont intégrées dans un bâtiment neuf et un bâtiment ancien et font l'objet d'une évaluation complète. L'évaluation s'effectue sur leur efficacité (heures de surchauffe), les coûts de construction, d'exploitation et de démantèlement, leurs émissions de gaz à effet de serre dues à la construction et à l'exploitation, leur acceptation et le moment de mise en œuvre de leur intégration structurelle (section 6). Une différentiation par groupe tente de préciser l'écart entre les résultats de l'étude et la pratique (section 7). Comme l'évaluation des solutions de refroidissement dépend fortement des conditions climatiques, des données climatiques cohérentes pour la période 2045-2074 ont été identifiées avec MétéoSuisse (section 3.1).

Le changement climatique est en cours et les températures augmentent. Cette étude⁴ part du principe que la température estivale moyenne durant la période 2045-2074 augmentera encore de 2,5°C (appelée année médiane 2060), voire 4,1°C (appelée année chaude 2060, fréquence tous les 5-10 ans) par rapport à la période 1981-2010. En termes de température estivale moyenne, l'année médiane 2060 correspond à l'année 2018, et l'année chaude 2060 correspond à l'année 2003. Des années extrêmes telles que 2003 et 2018 deviennent la norme et ont un impact de plus en plus négatif sur le confort humain dans les bâtiments et à l'extérieur.

Comme le montre l'étude épidémiologique, les gens, notamment les personnes âgées, sont extrêmement sensibles aux températures intérieures élevées en termes de confort, de loisirs et de santé. Lorsque les températures maximales dépassent 21°C la nuit et 24°C le jour, le taux de mortalité augmente. Les personnes plus jeunes supportent mieux les écarts par rapport à la température optimale. Les températures intérieures admissibles le jour et la nuit de 26,5°C pour les bâtiments résidentiels rafraîchis et de plus de 29°C⁵ pour les bâtiments résidentiels non rafraîchis décrites dans la norme SIA 180 (1) sont jugées trop élevées par rapport aux risques sanitaires qui en résultent. Il est recommandé d'ajuster les exigences de température pour le jour et la nuit (chambres à coucher). S'orientant à la majorité de la population, une température intérieure maximale de 26°C le jour (salon) et de 24°C la nuit (chambre à coucher) est supposée dans cette étude pour évaluer les solutions de refroidissement.

Plus de 60% des mesures détaillées définies dans les règles d'or de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) (2) pour les journées de canicule sont directement liés à l'évolution de la température dans les bâtiments et au refroidissement des personnes. Cela illustre l'importance d'un parc immobilier adapté au changement climatique.

L'impact du changement climatique sur le confort dans les bâtiments ne se fera sentir que pleinement dans un avenir (proche). Le maintien d'une température intérieure acceptable pendant l'été peut devenir un critère de location immobilière. À l'avenir, une fluctuation des locataires est probable si les températures sont trop élevées. Grâce à des incitations fiscales, à un programme de subventions ou à

⁴ Les données climatiques utilisées ont été déterminées en collaboration avec MétéoSuisse dans le cadre du projet ResCool. Ils représentent le scénario d'émission RCP8.5 (voir section 3.1).

⁵ Des températures intérieures supérieures à 29°C sont admissibles pour les locaux à ventilation naturelle selon la norme SIA 180 à partir d'une valeur moyenne glissante de la température extérieure sur 48 heures de 21,5°C. (voir section 3.2).



des bonus d'utilisation dans la procédure d'autorisation, des concepts innovants pour une protection globale contre la chaleur estivale – qui inclut en plus de la réglementation normative l'espace extérieur – pourraient déjà être encouragés pour les bâtiments neufs et existants. Une protection thermique estivale complète doit néanmoins être privilégiée dès la phase de planification, car elle exerce une forte influence sur la température intérieure et les besoins en refroidissement. En raison de la longue durée de vie des bâtiments, il est judicieux de les adapter dès aujourd'hui au climat de 2060. Cela nécessite une stratégie de développement et de construction à long terme de la part des investisseurs et des propriétaires immobiliers, mais aussi du secteur public.

La ventilation par fenêtre reste la solution de refroidissement la plus importante. Avec une exigence de température plus stricte par rapport à la norme SIA 180 d'un maximum de 24°C le jour et 21°C la nuit, la ventilation par les fenêtres peut assurer le confort pendant 20% du temps d'occupation, et à un maximum de 26°C le jour et 24°C la nuit pendant 70% du temps d'occupation (site de Bâle-Binningen). Dans les endroits plus chauds, cette durée est réduite. La compensation d'une température intérieure plus élevée, due à une vitesse d'air accrue au niveau de la personne en raison de la fenêtre ouverte, n'a pas été prise en compte (Figure 16). L'optimisation de leur efficacité doit être prise en compte lors de la phase de conception, tant au niveau du bâtiment qu'au niveau de l'espace extérieur. Il convient de noter que la ventilation par fenêtre n'est pas possible à tous les emplacements du bâtiment et à tous les étages.

Outre la ventilation par fenêtre il n'existe pas encore d'alternative décentralisée aux climatiseurs mobiles ou split pour les bâtiments existants – à l'exception du refroidissement par chauffage au sol (solution centrale). Si des unités de refroidissement mobiles sont utilisées, elles doivent être équipées d'un réfrigérant naturel et avoir un coefficient de performance élevé. Le refroidissement des lits, où une température de l'eau de 30°C peut assurer le confort individuel pendant la nuit, et les éléments de refroidissement qui peuvent être portés sur le corps et les textiles de refroidissement ont un gros potentiel écologique et économique pour s'imposer comme solution de refroidissement du futur. Ces technologies sont encore en cours de développement et nécessitent une collaboration entre l'industrie et la recherche. Le ventilateur sur pied entraîne une réduction locale de la température, en particulier pendant la journée.

Des systèmes efficaces de chauffage et de refroidissement combinés (multifonctionnels⁶), associés à un système de distribution par surface, sont disponibles pour les nouveaux bâtiments et les bâtiments assainis. Il faut tenir compte du fait que les températures internes en dessous de 24°C la nuit, qui seraient appropriées pour les groupes à risque, ne sont difficilement, voire pas réalisables en raison de la température limite de distribution de froid (point de condensation, température de la source). Le chauffage au sol complété par une unité de froid est également adapté aux bâtiments existants pour le refroidissement de la chambre à coucher et celui du salon. En fonction du choix du système, les émissions de gaz à effet de serre pour la construction de l'installation de refroidissement peuvent être – sur la base de la valeur moyenne des solutions examinées – divisées ou multipliées par deux. Pour les nouveaux bâtiments et les rénovations, il est recommandé que l'installation de refroidissement central soit entièrement intégrée au moment de la construction. Au minimum, le système de tuyauterie pour le refroidissement des locaux doit être acheminé au centre des appartements et préparé pour un raccordement ultérieur.

L'énergie utile supplémentaire requise pour le refroidissement dépend fortement de l'impact du refroidissement de la ventilation par fenêtre et de la température intérieure jugée confortable. Pour les solutions de refroidissement et les bâtiments étudiés sur le site de Bâle-Binningen, il se situe entre 4 kWh/(m²_{SRE} a) pour l'année médiane 2060 et 6 kWh/(m²_{SRE} a) pour l'année chaude 2060 pour une température intérieure maximale de 26°C le jour et 24°C la nuit. Pour une température intérieure

⁶ Les systèmes multifonctionnels sont des solutions de refroidissement qui sont utilisées à la fois pour le chauffage et le refroidissement. Cela signifie qu'une longue durée d'utilisation (heures de pleine charge) est atteinte et que la consommation de matériaux utilisés, qui est responsable des émissions de gaz à effet de serre de la construction, est plus faible par rapport à l'énergie utile.



maximale de 24°C le jour et la nuit, il se situe entre 10 kWh/(m²_{SRE} a) pour l'année médiane 2060 et 12 kWh/(m²_{SRE} a) pour l'année chaude 2060.

En raison des performances élevées de la production de froid, le besoin en énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre résultant de l'exploitation sont d'une importance mineure par rapport aux émissions de gaz à effet de serre liés à la construction. Pour le dimensionnement du climatiseur et la conception du système de distribution, il faut déterminer à la fois la puissance frigorifique et la puissance calorifique et utiliser la valeur la plus élevée.

Les recommandations adressées à une sélection de parties prenantes, telles que les investisseurs et les propriétaires immobiliers, les architectes et les planificateurs, les autorités, les organismes de normalisation et les locataires (section 7), montrent que le succès des bâtiments respectueux du climat dépend des actions d'un grand nombre d'acteurs. Avec plus de vingt recommandations sur des mesures à prendre, les lacunes entre les résultats théoriques de cette étude et l'application dans la pratique tentent d'être comblées.



Summary

The study shows practical solutions for keeping human comfort in new, retrofitted, and existing residential buildings within a tolerable range under the influence of climate change. This question is examined from both an epidemiological and a technical perspective. From an epidemiological perspective, it is clarified whether the temperatures allowed in the standards are consistent with the findings from the relationship between mortality and indoor temperature and nighttime recovery (Section 5). From a technical perspective, the performance of different cooling solutions is investigated (Sections 3.3 and 3.4). For this purpose, six centralized cooling production systems with five cooling supply systems, two decentralized room-wise and three local cooling solutions are investigated. A special focus is placed on cooling solutions that work close to or directly on the human body (Section 4). The cooling solutions are integrated into a new and an old, retrofitted building and comprehensively evaluated. They are evaluated in terms of their effectiveness (overheating hours), construction, operation, and deconstruction costs, their greenhouse gas emissions from construction and operation, their user acceptability, and the implementation timing for their building integration (Section 6). A mapping to key stakeholder groups attempts to bridge the gap to application (Section 7). Since the evaluation of cooling solutions is highly dependent on climatic conditions, consistent climate data for the time period 2045-2074 were identified together with MeteoSwiss (Section 3.1).

Climate change has started, and temperatures are rising. In this study, it is assumed that the mean summer temperature during the period 2045-2074 will increase by an additional 2.5°C (called median year 2060) to 4.1°C (called hot year 2060, frequency every 5-10 years) compared to the period 1981-2010. In terms of mean summer temperature, the median year 2060 corresponds to 2018, and the hot year 2060 corresponds to 2003. Extreme warm years such as 2003 and 2018 are becoming the norm and are having an increasingly negative impact on human comfort indoors and outdoors.

As shown in the epidemiological study, humans are extremely sensitive to high indoor temperatures in terms of well-being, recreation and health, especially the elderly population. At maximum temperatures above 21°C during the night and maximum temperatures above 24°C during the day, mortality increases. Younger people can better compensate for deviations from the optimal temperature. The maximum permissible indoor temperatures during the day and night of 26.5°C for chilled residential buildings and above 29°C8 for naturally ventilated residential buildings, as described in the SIA 180 standard (1), are set too high when measured against the health risks. It is recommended that the temperature requirements be adjusted for both daytime and nighttime (bedrooms). In view of the majority of the population, a maximum indoor temperature of 26°C during the day (living room) and 24°C at night (bedroom) is assumed for the evaluation of the cooling solutions in this study.

More than 60% of the detailed measures for the golden rules for heat days of the Federal Office of Health (FOPH) (2) are directly related to the temperature development in the building and the cooling of people. This illustrates the importance of a building stock aligned to climate change.

The full impact of climate change on building comfort will only be fully felt in the (near) future. Maintaining an acceptable indoor temperature during the summer may become a criterion for the rentability of properties. In the future, tenant turnover is likely if indoor temperatures are too high. With tax incentives, a subsidy program or usage bonuses in the approval process, innovative concepts for comprehensive summer heat protection – which includes the outdoor space in addition to the normative regulation – could already be promoted for new and existing buildings. Comprehensive summer thermal protection should still be prioritized in the early planning phase because it strongly influences the indoor temperature and cooling demand. Because of the long lifetime of buildings, it makes sense to

⁷ The climate data used were determined in collaboration with MeteoSwiss for the ResCool project. They represent the emission scenario RCP8.5 (see Section 3.1).

⁸ Indoor temperatures above 29°C are permissible according to SIA 180 from a moving average of the outdoor temperature over 48 hours of 21.5°C for naturally ventilated rooms (see Section 3.2).



design them today for the climate of 2060. This requires a long-term development and construction strategy by real estate investors and owners, but also by the public sector.

Natural ventilation (through windows) remains the most important cooling solution. With a more stringent temperature requirement compared to SIA 180 of a maximum of 24°C during the day and 21°C during the night, natural ventilation can ensure comfort during 20% of the occupancy time, and at a maximum of 26°C during the day and 24°C at night during 70% of the occupancy time (Basel-Binningen site). At warmer locations, these times are reduced. Compensation of a higher indoor temperature, due to an increased air velocity at the person caused by the open window, were not considered (figure 16). Optimization of its efficiency should be considered during the conceptual phase, both at the building level and at the outdoor space level. It should be noted that natural ventilation is not possible at all building locations and on all floors.

In addition to natural ventilation, no decentralized alternatives to mobile cooling units and split cooling units are yet available for existing buildings – except for cooling via the underfloor heating system (central solution). If mobile cooling units or split cooling units are used, they should be equipped with a natural refrigerant and have a high coefficient of performance. Bed cooling, with which individual comfort during the night can be ensured with a water temperature of 30°C, cooling elements that can be worn on the body (wearable) and cooling textiles have the ecological and economic potential to establish themselves as future cooling solutions. These technologies are still under development and require collaboration between industry and research. The stand fan leads to a local temperature reduction, especially during the day.

For new buildings and retrofits, efficient combined heating/cooling systems (multifunctional⁹) are available in connection with a surface-integrated cooling supply system. It must be considered that indoor temperatures below 24°C at night, as would be appropriate for vulnerable people, are not achievable due to the limiting temperature of the cooling system (dew point, source temperature). Floor heating systems supplemented with a cooling unit are particularly suitable in existing buildings for cooling the bedroom and living room. The greenhouse gas emissions to manufacture the cooling solution can be halved or doubled with its choice – based on the average value of the examined solutions. For new buildings and refurbishments, it is recommended to fully integrate the central cooling system at the time of building construction. At least, the piping system for room cooling should be installed centrally to the apartments and prepared for later connection.

The useful energy required for cooling is strongly dependent on the cooling effect of natural ventilation and the acceptable indoor temperature. For the investigated cooling solutions and buildings at the Basel-Binningen site, it is between 4 kWh/(m^2_{EBF} a) for the median year 2060 and 6 kWh/(m^2_{EBF} a) for the hot year 2060 at a maximum indoor temperature of 26°C during the day and 24°C at night. At a maximum indoor temperature of 24°C during the day and night, it is between 10 kWh/(m^2_{EBF} a) for the median year 2060 and 12 kWh/(m^2_{EBF} a) for the hot year 2060.

The resulting primary energy demand and the greenhouse gas emissions from operation are of minor importance compared to the greenhouse gas emissions from manufacturing due to the high coefficient of performance of the cooling generation (except for the mobile cooling and split units). In the selection of cooling solutions, the greenhouse gas emissions from the manufacturing move into the center of attention. Both cooling and heating loads should be determined for sizing the cooling generator and the cooling delivery systems, and the higher value should be used for system sizing.

The recommendations to a selection of stakeholders, such as investors and property owners, architects and planners, authorities, standardization bodies and tenants (Section 7) show that the success of climate-adapted building construction depends on the actions of a large number of stakeholders. With over twenty recommendations for action, an attempt is made to bridge the gap between the findings of the study and the implementation into the practice.

⁹ Multifunctional systems are cooling solutions that are used for both heating and cooling. With such systems, a high useful life (full load hours) is achieved, and the material consumption used, which is responsible for the greenhouse gas emissions from the construction, is lower in relation to the useful energy.



Take-home message

- Die in der Norm SIA 180 beschriebenen ganztägig zulässigen maximalen Innentemperaturen sind, gemessen an den Gesundheitsrisiken, zu hoch angesetzt. Es wird dringend empfohlen, sie auf akzeptierbare Temperaturen während dem Tag und für Schlafräume während der Nacht anzupassen.
- Die Fensterlüftung ist weiterhin die wichtigste Kühllösung. Bei einer gegenüber der SIA 180 verschärften maximalen Temperatur von 24°C am Tag und 21°C während der Nacht kann die Fensterlüftung den Komfort während 20%, bei 26°C am Tag und 24°C in der Nacht während 70% der Belegungszeit sicherstellen (Standort Basel-Binningen).
- Die Bettenkühlung kann mit Wassertemperaturen von 30°C den individuellen Komfort während der Nacht sicherstellen. Die Entwicklung entsprechender Produkte soll initiiert werden.
- Die massgebenden Treibhausgasemissionen von Kühllösungen entstehen während der Erstellung, was bei der Systemwahl berücksichtigt werden soll.
- Les températures intérieures admissibles toute la journée décrites dans la norme SIA 180 sont trop élevées par rapport aux risques liés à la santé. Il est fortement recommandé de les adapter à des températures acceptables pendant la journée et, pour les chambres à coucher, pendant la nuit.
- La ventilation par fenêtre reste la solution de refroidissement la plus importante. Avec une exigence de température plus stricte par rapport à la norme SIA 180 d'un maximum de 24°C le jour et 21°C la nuit, la ventilation par les fenêtres peut assurer le confort pendant 20% du temps d'occupation, et à un maximum de 26°C le jour et 24°C la nuit pendant 70% du temps d'occupation (site de Bâle-Binningen).
- Le refroidissement du lit peut assurer le confort individuel pendant la nuit avec des températures d'eau de 30°C. Le développement de produits correspondants devrait être initié.
- Les solutions de refroidissement émettent la majorité des gaz à effet de serre lors de la fabrication. Cet aspect doit être pris en compte lors du choix du système.
- The maximum all-day indoor temperatures described in the SIA 180 standard are set too high in terms of health risks. It is strongly recommended to adjust them to acceptable temperatures during the day and for bedrooms during the night.
- Natural ventilation (through windows) remains the main cooling solution. With a more stringent temperature requirement compared to SIA 180 of a maximum of 24°C during the day and 21°C during the night, natural ventilation can ensure comfort during 20% of the occupancy time, and at a maximum of 26°C during the day and 24°C at night during 70% of the occupancy time (Basel-Binningen site).
- Bed cooling with water temperatures of 30°C can ensure personal comfort during the night. The
 development of appropriate products should be initiated.
- The most significant greenhouse gas emissions of cooling solutions occur during manufacturing, which should be considered in the choice of system.



Inhaltsverzeichnis

Zusan	nmenfassung	4
Résur	né	7
Sumn	nary	10
Take-	home message	12
Inhalt	sverzeichnis	13
Abküı	zungen und Begriffe	17
1	Einleitung	19
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	19
1.1.1	Innentemperatur steigt ohne Massnahmen zu stark an	19
1.1.2	Partielle Raumkühlung für Risiko- und Nichtrisikogruppen wird zukünftig nötig sein	19
1.1.3	Der Mensch im Zentrum	20
1.1.4	Adaption des Menschen	20
1.1.5	Die Wärme draussen halten	21
1.1.6	Abtransport der Wärme	23
1.2	Motivation des Projektes	24
1.2.1	Verträgliche Massnahmen unter Berücksichtigung von Komfort und Energie	24
1.2.2	Verbreitung von energie- und umweltbelastenden Lösungen vermeiden	24
1.3	Projektziele	24
1.3.1	Konkrete Kühllösungen für Neu-, Um- und bestehende Wohnbauten	24
1.3.2	Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten erarbeiten	25
2	Vorgehen und Methode	26
2.1	Auswahl der Kühllösungen	26
2.1.1	Kälteerzeugung	28
2.1.2	Kälteverteilung	29
2.2	Auswahl der Gebäude	29
2.3	Bewertungskriterien der Kühllösungen	30
2.4	Bewertungstemperaturen und Anlagenleistung	30
2.5	Personenbezogene Kühlung, Potential und technische Lösung	31
2.6	Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten	31
2.7	Empfehlungen für Anspruchsgruppen	31
3	Ergebnisse und Diskussion	32
3.1	Klimatische Bedingungen im Aussenraum	32
3.2	Zulässige Temperatur in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen nach SIA 180	34
3.2.1	Stundenverteilung der Aussentemperatur	34
3.2.2	Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur	34
3.2.3	Adaptives Komfortmodell	35



3.3	Kühllösungen Altbau	36
3.3.1	Fensterlüftung Überhitzungsstunden, Temperaturen	36
3.3.2	Dezentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen	39
3.3.3	Dezentrale Systeme Kosten	39
3.3.4	Dezentrale Systeme Treibhausgasemissionen	40
3.3.5	Zentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen	41
3.3.6	Zentrale Systeme Kosten	42
3.3.7	Zentrale Systeme Treibhausgasemissionen	43
3.3.8	Zentrale Systeme Energie	43
3.4	Kühllösungen Neubau	44
3.4.1	Fensterlüftung Überhitzungsstunden, Temperaturen	44
3.4.2	Dezentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen	46
3.4.3	Dezentrale Systeme Kosten	47
3.4.4	Dezentrale Systeme Treibhausgasemissionen	47
3.4.5	Zentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen	47
3.4.6	Zentrale Systeme Kosten	48
3.4.7	Zentrale Systeme Treibhausgasemissionen	49
3.4.8	Zentrale Systeme Energie	49
3.5	Anlagendimensionierung	50
3.6	Ergänzende Angaben zu den Auswertungen Alt-/Neubau	51
4	Personenbezogene Kühlung, Potential und technische Lösungen	56
4.1	Ventilatoren im Nahbereich der Person	56
4.2	Auf dem Körper tragbare Kühlflächen	59
4.3	Grossflächige personenbezogene Kühlflächen	62
4.3.1	Kühlgerät mit Peltier-Technologie und wasserdurchflossener Matratzenauflage	62
4.3.2	Kapillarrohrsystem zur Körperkühlung	64
4.3.3	Schlafsack mit flexiblem Rohrsystem zur Körperkühlung	66
4.3.4	Direktkühlung mit Frischwasser	66
4.3.5	Weiterentwicklung der Bettenkühlung	67
4.4	Kühlende Textilien	68
4.4.1	Wärmestrahlung von der Haut an die Umgebung	60
	Warniestraniung von der Haut an die Onigebung	00
4.4.2	Verdunstungseffekt nutzen	
		69
4.5	Verdunstungseffekt nutzen	69 70
4.5 5	Verdunstungseffekt nutzen	69 70 71
4.5 5 5.1	Verdunstungseffekt nutzen Potential personenbezogene Kühlung Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten	69 70 71 72
4.5 5 5.1 5.2	Verdunstungseffekt nutzen Potential personenbezogene Kühlung Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten Zusammenhang zwischen Temperatur und Sterblichkeit	69 70 71 72 74
4.4.2 4.5 5 5.1 5.2 5.3 5.3.1	Verdunstungseffekt nutzen Potential personenbezogene Kühlung Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten Zusammenhang zwischen Temperatur und Sterblichkeit Methodik zur Ermittlung der Sterblichkeit in Funktion der Aussen- und Innentemperatur	69 70 71 72 74



5.4	Abhängigkeit der Schlafqualität von der Innentemperatur	84
6	Bauliche Integration	85
6.1	Nutzung der Fussbodenheizung zur Kühlung	85
6.1.1	Kälteabgabe	85
6.1.2	Bauliche Massnahmen	85
6.1.3	Kosten bauliche Massnahmen	86
6.1.4	Kälteverteilung	86
6.1.5	Steigzone	86
6.2	Deckenkühlsysteme einbauen	86
6.2.1	Kälteabgabe	86
6.2.2	Verlegeart	86
6.2.3	Nasssystem	87
6.2.4	Trockenbausystem	87
6.2.5	Bauliche Massnahmen	88
6.2.6	Kosten Kälteabgabe und bauliche Massnahmen	88
6.3	Kälteverteilung installieren	89
6.3.1	Kosten Kälteverteilung	89
6.4	Kälteverteiler nachrüsten	90
6.4.1	Kosten Erweiterung Kälteverteiler	90
6.5	Kühlenergie verrechnen	90
6.6	Kälteerzeugung	91
6.7	Lösung im Neubau	91
6.7.1	Kühlsystem im Boden oder der Decke einbauen	91
6.7.2	Vor- und Rücklauf für Frischwasser	91
6.7.3	Kälteanschluss vorsehen	91
7	Empfehlungen für Anspruchsgruppen	92
7.1	Investoren und Immobilienbesitzende	92
7.2	ArchitektInnen und Planende	93
7.3	Behörden	94
7.4	Normengremien	95
7.5	Mietende	95
7.6	Schlüsselerkenntnisse	96
8	Schlussfolgerung und Fazit	97
9	Ausblick und zukünftige Umsetzung	106
10	Nationale und internationale Zusammenarbeit	107
11	Kommunikation	107
12	Publikationen	107
13	l iteraturverzeichnis	108



14	Anhang	111
14.1	Verwendete Klimadaten für die Zukunftsprognosen	111
14.2	Verfeinertes Modell zur Abschätzung der Aussentemperatur	113
14.2.1	Methodik	113
14.2.2	Validierung	113
14.3	Gebäudekennwerte und -bauteile	115
14.3.1	Basisgebäude Alt- und Neubau	115
14.3.2	Flächen Alt- und Neubau	116
14.3.3	Aufbau der Bauteile Altbau	116
14.3.4	Aufbau der Bauteile Neubau	118
14.3.5	Interne Wärmelasten	120
14.3.6	Kühlbedarf Kühllösung (ergänzend zur Fensterlüftung) Alt- und Neubau	120
14.4	Leistungswerte der Kühllösungen	121
14.4.1	Fensterlüftung	121
14.4.2	Wearables (Embr Wave)	121
14.4.3	Bettenkühlung	122
14.4.4	Standventilator	122
14.4.5	Mobiles Kühlgerät (mobiles Kompaktgerät)	122
14.4.6	Kältemaschine mit Hybridkühler, Hybridkühler	124
14.4.7	Multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe	124
14.4.8	Erdwärmesonden	124
14.4.9	Grundwasser	125
14.4.10	Fernkälte	125
14.4.11	Fussbodenheizung, thermoaktives Bauteilsystem und Kapillarrohrmatte	125
14.4.12	? Metallkühldecke	128
14.4.13	Radiator	128
14.5	Kosten der Kälteerzeugungs- und Kälteabgabesysteme	129
14.6	Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb der Kälteerzeugungs- und Kälteabgabesysteme	131
14.7	Berechnungsmodell für die Dimensionierung von Kapillarrohrmatten	132
14.8	Raummodell für die Ermittlung der Innentemperatur	135



Abkürzungen und Begriffe

AIC	Akaike-Informationskriterium. Statistisches Kriterium für die Modellauswahl.		
BAG	Bundesamt für Gesundheit		
Multifunktional	Der Kälteerzeuger und/oder die Kälteabgabe wird sowohl für das Kühlen als auch für das Heizen eingesetzt.		
CH2018	CH2018 – Schweizer Klimaszenarien mit Herausgabe 2018. Beschreibt die zukünftige Entwicklung des Klimas in der Schweiz bis Mitte und Ende des Jahrhunderts.		
clo	Mass für den thermischen Widerstand der Bekleidung.1 clo (clothing) = 0.155 m² K/W, dies entspricht dem thermischen Widerstand einer Bekleidung, die eine Person mit sitzender Tätigkeit bei 21°C, 0.1 m/s Luftgeschwindigkeit und 50% relativer Feuchte als thermisch komfortabel erachtet.		
CO ₂ -eq CO ₂ -Äquivalente sind eine Masseinheit zur Vereinheitlichung der Klima von unterschiedlichen Treibhausgasen. Neben dem wichtigsten Treibhausdase Wie beispielsweise Mole verschiedenen Gase tragen nicht in gleichem Masse zum Treibhausdase und verbleiben unterschiedlich lange in der Atmosphäre. Um die Wittereinhausgase vergleichbar zu machen, hat das Expertengremium der Vereinten Nationen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCO genannte «Globale Erwärmungspotenzial» (Global Warming Potential, definiert.			
СР	Corrective Power. Ist eine Temperaturdifferenz, die die Fähigkeit eines thermischen Systems angibt, die gefühlte Temperatur in Richtung der neutralen Temperatur zu korrigieren.		
DLNM	Distributed lag Non-linear Models. Modelle, die den zeitabhängigen Zusammenhang zwischen Exposition und Reaktion beschreiben.		
Duvet	Der Begriff wird synonym für Bettdecke verwendet		
Elektrochromes Glas	Tönbare Verglasung, die sich anhand einer Wärmequelle, wie zum Beispiel elektrischem Strom oder der Sonneneinstrahlung, verfärbt.		
Erstellung	Der Begriff wird synonym auch für Herstellung oder Produktion verwendet.		
EWS	Erdwärmesonden		
FBH	Fussbodenheizung		
Fensterlüftung	Der Begriff wird synonym für das Kühlen des Raumes mit kalter Aussenluft, die durch die Fensteröffnung strömt, genutzt.		
GW	Grundwasser		
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad. Summe aus der Strahlungstransmission und der sekundären Wärmeabgabe nach Innen.		
GWP Der GWP Index (Global Warming Potential) drückt die Erwärmungswirkubestimmten Menge eines Treibhausgases über einen festgelegten Zeitrau (meist 100 Jahre) im Vergleich zu derjenigen von CO ₂ aus.			
KM	Kältemaschine		



LW	Luft-/Wasser in Verbindung mit der Wärmepumpe WP	
met	Mass für den energetischen Grundumsatz des Körpers als Funktion der physischen Aktivität. 1 met (metabolic rate) = 58 W/m², was der metabolischen Wärmeentwicklung einer sitzenden, entspannten Person pro m² Körperoberfläche entspricht.	
Monofunktional	Der Kälteerzeuger und/oder die Kälteabgabe wird nur zum Kühlen eingesetzt.	
OR	Odds Ratio. Die OR ist ein statistisches Mass zur Beurteilung der Stärke des Zusammenhangs zwischen Temperaturexposition und Sterberate und entspricht ungefähr dem relativen Risiko.	
PCS	Personal Cooling System	
PMV	Predicted Mean Vote. Zu erwartende mittlere Komfortbewertung	
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied. Vorhergesagter Prozentsatz an Unzufriedenen	
RCP8.5	Repräsentativer Konzentrationspfad. Die Zahl 8.5 beschreibt den Strahlungsantrieb im Jahr 2100 in Watt/m².	
RR	Relatives Risiko (Relative Risk) der täglichen Sterblichkeit.	
SNC	Swiss National Cohort	
TABS	Thermoaktive Bauteilsysteme	
TAT	Thermisch adaptive Textilien	
TEC	Thermoelectric cooling	
WC	Wassergefüllte Matratzenauflage (Water cushion)	
WP	Wärmepumpe Water pipe (Abschnitt 4.3.1)	
1	Wirksamkeit: Überhitzungsstunden	
€	Kosten: Investitions-, Betriebs- und Rückbaukosten	
	Treibhausgasemissionen: Erstellung, Betrieb und Rückbau	
	Akzeptanz	
*	Ausführungszeitpunkt	



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

1.1.1 Innentemperatur steigt ohne Massnahmen zu stark an

Der Klimawandel führt zu einer globalen Erwärmung der erdnahen Atmosphäre und der Meere. Diese globale Erwärmung liegt heute im weltweiten Durchschnitt um ca. 1°C (3) über der Temperatur der vorindustriellen Zeit. In der Schweiz, mit ihrer topologischen Beschaffenheit, beträgt der Anstieg im selben Zeitraum bereits 2°C (4). Ziel ist, die globale Erwärmung auf 1.5°C zu stabilisieren. Dies bedingt eine drastische Trendwende im weltweiten Treibhausgasausstoss, um ab dem Jahr 2050 eine netto-negative Bilanz (Abbildung 1) zu erreichen. Wird die Umsetzung verzögert oder werden die gesteckten Ziele nicht erreicht, resultiert eine weit höhere Erwärmung. Diese Temperaturerhöhung wird weitreichende Folgen für den Menschen in Gebäuden haben.

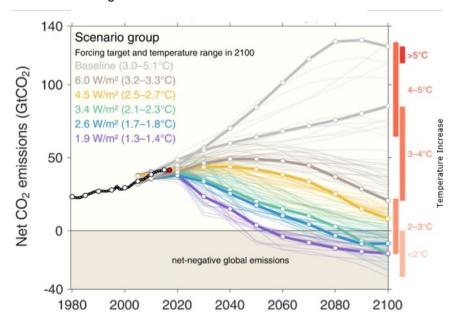


Abbildung 1: Weltweiter CO₂-Ausstoss und Absenkszenarien gemäss Shared Socioeconomic Pathways (5).

Die Untersuchungen des Projektes ClimaBau (6) zeigen für die nächsten Jahrzehnte eine starke Erhöhung der Innentemperatur. Dies führt dazu, dass die Raumnutzer die Räume vermehrt kühlen werden.

Ragettli et al. zeigt in (7), dass die Sterblichkeit ab 24°C (24 h Mittel der Aussentemperatur) rapide zunimmt. Zukünftig muss mit höheren Aussentemperaturen gerechnet werden, wie sie auch im Hitzesommer 2003 mit den bekannten Folgen auftraten. Eine mindestens partielle Raumkonditionierung wird daher zukünftig sowohl für Risiko- als auch für Nichtrisikogruppen unerlässlich sein.



1.1.3 Der Mensch im Zentrum

Der Mensch hält sich zu 80-90% der Zeit in Innenräumen auf. Damit dieser Aufenthalt so komfortabel wie möglich ist, muss genügend Tages- und Kunstlicht ohne Blendung, keine Schallbelästigung, eine Innentemperatur im Komfortbereich und frische Luft vorhanden sein. Diese Merkmale sind in Abbildung 2 als «Anforderung Mensch» gekennzeichnet. Aus Sicht der thermischen Energieflüsse und dem damit verbundenen Kühlbedarf, wäre ein Element mit einer 100%igen Lichttransmission ohne Wärmestrahlung sowie eine Gebäudehülle und eine Frischluftzufuhr ohne Wärmeeintrag in das Gebäude ideal.



Abbildung 2: Kühlen, von den Anforderungen des Menschen zu den Lösungsmöglichkeiten.

Unter der Überschrift «Realisierbare Lösungen» (Abbildung 2) sind sowohl Verhaltensmassnahmen als auch bauliche und technische Lösungen zur Sicherstellung des thermischen Komforts aufgeführt.

1.1.4 Adaption des Menschen

Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) hat drei goldene Regeln für Hitzetage festgelegt (2). Diese sind in Tabelle 1 dargestellt.

1	Körperliche Anstrengungen vermeiden
1.1	Die körperliche Aktivität während der heissesten Tageszeit möglichst beschränken und schattige Orte bevorzugen
2	Hitze fernhalten – Körper kühlen
2.1 2.2	Tagsüber Fenster schliessen und Sonne fernhalten (Vorhänge zuziehen, Fensterläden schliessen) Nachts lüften
2.3	Leichte Kleidung
2.4	Körper kühlen mit Duschen, kalten Tüchern auf Stirn und Nacken, kalten Fuss- und Handbädern
3	Viel trinken – leicht essen
3.1	Regelmässig trinken (mind. 1.5 l/Tag), auch ohne Durstgefühl
3.2	Kalte, erfrischende Speisen: Früchte, Salate, Gemüse, Milchprodukte
3.3	Auf ausreichende Versorgung mit Salz achten

Tabelle 1: Drei Goldene Regeln für Hitzetage des Bundesamtes für Gesundheit (BAG). Darstellung in Anlehnung an (2). Mehr als 60% der Regeln stehen im direkten Zusammenhang mit der Innentemperatur im Gebäude und der Kühlung des Menschen

Von den acht Detailmassnahmen der drei goldenen Regeln stehen fünf, also über 60%, im direkten Zusammenhang mit der Innentemperatur im Gebäude sowie der Kühlung des Menschen.



Die Themen sind: «1.1 Körperliche Aktivität, 2.1 Fenster und Beschattung schliessen, 2.2 nachts Lüften, 2.3 leichte Kleidung und 2.4 Körper kühlen».

Die Untersuchungen von Fanger (8) zeigen den Zusammenhang zwischen der Bekleidung, der Tätigkeit und der benötigten empfundenen Temperatur auf, bei der sich eine Person thermisch wohl fühlt (siehe Abbildung 30), Für eine sommerlich leichte Bekleidung mit einem thermischen Widerstand zwischen 0.25-0.50 clo (2.3 leichte Kleidung) und einer sitzenden Tätigkeit mit einem Aktivitätsgrad von 1.0 met (1.1 Körperliche Aktivität beschränken) liegt die optimale empfundene Temperatur bei 26-27°C (+/- 1.5°C), für eine stehende Tätigkeit (2.0 met) bei 21-24°C (+/- 2°C). Der Unterschied zwischen einer behaglichen sitzenden Tätigkeit und Hausarbeit beträgt demnach 3-5°C. Durch die Anpassung der Aktivität kann auf hohe Innentemperatur, mindestens in einem beschränkten Zeitraum am Tag, reagiert werden. Die Untersuchungen von Fanger wurden in einer Klimakammer unter stationären Bedingungen durchgeführt. Sie untersuchen hauptsächlich den Zusammenhang zwischen der Bekleidung und der Tätigkeit auf die optimale empfundene Temperatur. Die Wahl der Bekleidung in Abhängigkeit der Aussenbedingungen geht in die Betrachtung nicht ein. De Dear et al. (9) und Nicol et al. (10) entwickelten basierend auf Befragungen und statistischen Auswertungen adaptive Temperaturmodelle, die das dynamische Verhalten der Personen besser abbilden (siehe Abschnitt 3.2.3). Die Einflussnahme während der Nacht ist geringer, weil der Aktivitätsgrad nicht verändert werden kann und die Innentemperatur durch die herrschenden Aussentemperaturen massgeblich bestimmt wird. Die Adaptionsfähigkeit ist also eingeschränkt.

Unter dem Thema «2. Hitze fernhalten – Körper kühlen» sind einerseits die baulichen Massnahmen (siehe Abschnitt 1.1.5) und andererseits die vorgeschlagenen Kühlkonzepte (siehe Abschnitt 2.1) umzusetzen. Die Detailmassnahme «2.4 Körper kühlen» lässt sich gut mit der personenbezogenen Kühlung (siehe Abschnitt 4) ergänzen.

1.1.5 Die Wärme draussen halten

Um den Kühlbedarf so niedrig wie möglich zu halten, müssen die Wärmeströme in das Gebäude minimiert werden. Ein wichtiger Beitrag leistet eine angepasste Fenstergrössen (< 50% der Fassadenfläche) und eine effiziente bauliche Verschattung durch schattenspendende Fassadenelemente. Der grösste Wärmeeintrag in das Gebäude erfolgt durch die transparenten Flächen. Diese Flächen müssen mit einem effizienten Sonnenschutz geschützt werden (Rafflamellenstoren, Roll- und Schiebeläden, Fassadenmarkisen). Die Herausforderung besteht darin, dass diese Verschattungselemente frühzeitig und während der Hitzeperioden auch auf nicht besonnten Flächen (nur diffuse Strahlung) geschlossen werden. An einem sonnigen Tag, mit einer Globalstrahlung von 600 W/m² und einem Anteil von 250 W/m² diffuser Strahlung, gelangt in den von der direkten Strahlung abgewandten Raum - mit offenem Sonnenschutz - beinahe der gleiche Wärmestrom, wie in den direkt besonnten Raum mit geschlossenem Sonnenschutz. Hält sich eine Person in einem Raum auf, ist ein vollständiges Schliessen des Sonnenschutzes, wegen des fehlenden Aussenbezugs, meist nicht möglich. Dieser Aussenbezug wird mit einem höheren Wärmeeintrag erkauft. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Situation sind elektrochrome Verglasungen, die ihre Transparenz und damit den Wärmeeintrag verändern. Der Aussenbezug bleibt länger erhalten. Eine solche Verglasungen 10 erreicht im Zustand Hell eine Lichttransmission von 54% bei einem g-Wert von 0.36, mit der ersten Verdunkelungsstufe 16% bei 0.09, mit der zweiten Verdunkelungsstufe 5% bei 0.05 und im Zustand dunkel 1% bei 0.03. Durch das gezielte Positionieren von Räumen auf der sonnenarmen Gebäudeseite und durch luftoffene Bauten lässt sich der Kühlbedarf reduzieren. Die Farbe einer Fassade hat, wegen den unterschiedlichen Absorptions- und Reflexionswerten, ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf das Gebäude selbst und den Aussenraum. Helle Farben reduzieren die Wärmelast. Büttner et al. untersucht in (11) die baulichen Möglichkeiten detailliert.

¹⁰ Angaben für SageGlas Climatop Classic Ug 0.6.



Durch eine Begrünung der Umgebungsflächen mit Wiesen und Bäumen wird ein übermässiger Temperaturanstieg vermindert. Die Grünflächen und Bäume verdunsten Wasser. Um die Verdunstung anzutreiben, wird Energie benötigt, die der Umgebung entzogen wird. Dadurch entsteht eine Kühlwirkung. Bei intensiver Sonneneinstrahlung am Tag ist vor allem die Beschattungswirkung von Bäumen wichtig. Sie stellen sicher, dass das Quartierklima erträglich bleibt und sich die Umgebungsflächen weniger aufheizen. Neben den Umgebungsflächen kann auch die Gebäudefassade und das Dach begrünt werden. Gemäss den Untersuchungen von Radic et al. (12) hält die Begrünung die direkte Sonnenstrahlung von der dahinterliegenden Fassade fern, verändert durch die Verdunstung auf der Grünfläche das Mikroklima im Bereich der Fassade und reduziert so den Wärmetransport ins Innere. Diese Wirkung hat vor allem eine Reduktion der Temperatur am Tag zur Folge. Ascione et al. (13) hat die Reduktion der Innenlufttemperatur durch Living Walls und Green Facades aus verschiedenen Quellen zusammengestellt. Green Facades bestehen aus Kletterpflanzen an der Fassade, die ungeführt oder durch ein Seilsystem geführt sind. Bei Living Walls ist die Vegetationsschicht in die Fassade integriert. Die Temperaturreduktion bei der Living Wall beträgt gemäss den untersuchten Studien 3.5 K (+/- 1.1 K), für die Green Wall 1 K (nur ein Datensatz). Auf Quartier- und Stadtmassstab ist auf eine gute Durchströmung der Siedlungen durch eine strömungsoptimierte Anordnung der Bauten in Verbindung mit Wald- und Grünflächen zu achten (14). Alle Massnahmen, die das Aufheizen der Umgebung am Tag reduzieren (Hitzeinseln), wirken sich auch positiv auf die Lufttemperaturen in der Nacht aus. Diese sind für das Funktionieren der nächtigen Raumkühlung mit der Fensterlüftung zentral. Die Kühlung des Raumes durch kalte Aussenluft, die durch das Fenster strömt, leistet einen beachtlichen Beitrag zur Sicherstellung des Komforts im Wohn- und Schlafzimmer. Dieser Beitrag beträgt, je nach der maximal akzeptierbaren Innentemperatur, zwischen 20-70% der Belegungszeit. Die Fensterlüftung ist aber auch das Kühlsystem, das am meisten von den erhöhten Temperaturen durch den Klimawandel betroffen ist. Die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen wird durch die Klimaerwärmung verringert und gleichzeitig auch der Luftvolumenstrom durch das Fenster, da dieser durch die reduzierte Temperaturdifferenz weniger stark angetrieben wird. Bei einer Halbierung der Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen reduziert sich die Kühlleistung der Aussenluft auf 35%. Die Querlüftung durch verschiedene Räume ist die effizienteste Massnahme, den Luftaustausch stark zu erhöhen. Die konzeptionellen Überlegungen dazu müssen schon während dem architektonischen Entwurf angestellt werden. Zu beachten ist, dass nicht an allen Gebäudestandorten und in allen Geschossen des Gebäues eine Kühlung über Fensterlüftung möglich ist (Einbruchsicherheit, Schallimmissionen).

Ein weiterer zentraler Aspekt zur Sicherstellung des für den Menschen akzeptablen Raumkomforts ist die thermisch aktive Masse des Gebäudes. Die ankommende Wärmeleistung gelangt so nicht direkt in die Luft und erwärmt diese stark, sondern wird im Bauteil mit einer viel geringeren Erwärmung gespeichert. Der Temperaturanstieg hängt dabei von der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität des Materials ab. Gut wärmeleitende Boden- und Deckenbeläge sind dabei ausschlaggebend. Gemäss den Untersuchungen von Koschenz, Lehmann (15) (Fig. 7-9) reduziert sich die aufnehmbare Wärmeleistung bei einem Parkett von 12 mm um 10% und bei einem Teppich von 14 mm um beinahe 20% im Vergleich mit dem Boden ohne Bodenbelag. Gelingt es, die am Tag erwärmten Bauteile in der Nacht wieder abzukühlen, kann das Gebäude in einem stabilen Temperaturbereich gehalten werden. Treten lange Hitzeperioden mit hohen Nachttemperaturen auf, gelingt die Abkühlung nicht mehr und das Gebäude erwärmt sich von Tag zu Tag. Es ist also sowohl die Aussentemperatur als auch die Länge der Hitzeperioden von Bedeutung (siehe auch Abschnitt 3.1). Die aufgeführten Massnahmen zeigen, wie vielfältig die Möglichkeiten sind, um die Wärme vom Aufenthaltsbereich des Menschen fernzuhalten. Diese müssen auf jeden Fall maximal ausgeschöpft werden, um den Technikeinsatz für eine mechanische Kühlung zu minimieren. Eine umfassende Übersicht zum Zusammenspiel zwischen Wohlbefinden, Energie und Architektur ist in Roulet (16) zu finden.



1.1.6 Abtransport der Wärme

Kann mit baulichen Massnahmen am Gebäude eine Überhitzung des Aufenthaltsbereichs des Menschen nicht vollumfänglich verhindert werden, sind zusätzliche Lösungen nötig. Diese starten mit der Fensterlüftung und erweitern sich durch den zusätzlichen Einsatz von elektrischer Energie bis zu Kältemaschinen. Zusätzlich zur Kälteerzeugung ist bei dezentralen Kühllösungen ein Kälteabgabesystem nötig. Sowohl die Kälteerzeugung als auch die Kälteabgabe benötigen für ihre Herstellung Energie und emittieren Treibhausgase, was den Klimawandel weiter vorantreibt. Gleiches gilt für den Betrieb. Es soll deshalb sichergestellt werden, dass der Einsatz solcher Lösungen auf ein Minimum reduziert wird. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Kühllösungen im Detail untersucht.



1.2 Motivation des Projektes

1.2.1 Verträgliche Massnahmen unter Berücksichtigung von Komfort und Energie

Es stellt sich die Frage, wie Neu-, Um- und bestehende Wohnbauten, unter Berücksichtigung der Ziele der Energiestrategie 2050 und dem Hitzewellen-Massnahmenkatalog (17) des Bundes, heute für die Bewältigung der Klimaanpassung am effizientesten vorbereitet, beziehungsweise ausgerüstet werden müssen. Heutige Entscheide zur technischen Gebäudeausrüstung müssen den Anforderungen bis mindestens 2050 gerecht werden, solche bezüglich der Gebäudestruktur über 2080 hinaus. Ziel des Projektes ist es, dass effiziente Kühlmethoden ausgeschöpft und die Kühlung räumlich/lokal eingegrenzt wird (so nahe an der Person wie möglich).

1.2.2 Verbreitung von energie- und umweltbelastenden Lösungen vermeiden

Ebenso soll verhindert werden, dass sich ineffiziente und umweltschädliche Lösungen für die Gebäudekühlung verbreiten.

1.3 Projektziele

1.3.1 Konkrete Kühllösungen für Neu-, Um- und bestehende Wohnbauten

Das Forschungsprojekt zeigt konkrete Lösungen auf, wie der Komfort für den Menschen in Neu-, Umund bestehenden Wohnbauten während der Lebensdauer der Gebäude in einem erträglichen Bereich
gehalten werden kann. Der Energieverbrauch für die Kühlung soll so tief wie möglich gehalten werden, damit die aus dem verminderten Wärmebedarf durch die Klimaerwärmung resultierende Energieeinsparung (20-30% (6)) maximal erhalten bleibt. Die Kühlung erfolgt, wenn möglich mit einer Fensterlüftung. Für die verbleibenden Tage mit hohen/höchsten Temperaturen sollen Kühllösungen mit einer
hohen Kühleffizienz und auf Basis erneuerbarer Quellen zum Einsatz kommen.

Der Fokus liegt auf den drei Schwerpunkten:

Bedarfsreduktion

- Sonnenschutz, partielle Raumkühlung anstelle der Kühlung des Gesamtgebäudes
- Angepasster Raumsollwert, welcher den Tagesgang berücksichtigt

Energieeffizienz

direkter Wärmeabtransport beim, beziehungsweise am Menschen

Einsatz erneuerbarer Energien

• Aussenluft, Erdreich, See- und Grundwasser, erneuerbarer Strom

Untersucht werden zentrale, raumweise und insbesondere lokale Kühlkonzepte sowie «tragbare Kühllösungen», auch Wearables genannt. Kühlflächen, die die Oberfläche des Menschen berühren, können mit einer Temperatur des Kühlmediums von bis zu 30°C, anstelle der üblichen 17-18°C, betrieben werden. Dies reduziert den Energieeinsatz. Die technischen Lösungen werden bezüglich Wirksamkeit, Akzeptanz, Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb, Ausrüstungszeitpunkt und Kosten bewertet. Die betrachteten Klimaszenarien umfassen ein «Medianjahr 2060» sowie ein «heisses Jahr 2060» (siehe Anmerkung in Kapitel 3.1) am Standort Basel-Binningen.

Die Ergebnisse bezüglich Wirksamkeit, Akzeptanz, Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb, Ausrüstungszeitpunkt und Kosten werden in konkrete Empfehlungen für Investoren, Mieter sowie für Behörden überführt. Dies ermöglicht den Investoren eine präzise Bestellung und die Sicherheit, dass die effizienteste Kühllösung zum richtigen Zeitpunkt umgesetzt wird. Die Ergebnisse werden

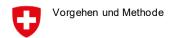


an Veranstaltungen für die Ansprechgruppen präsentiert. Aus den Untersuchungen zur direkten Personenkühlung können neue, effiziente Produkte hervorgehen.

1.3.2 Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten erarbeiten

Aus den Untersuchungen von Ragettli et al. (7) geht hervor, dass die temperaturbedingte Belastung des Menschen nicht nur von der momentanen Temperatur abhängt, sondern Korrelation sowohl mit der Tageshöchst- als auch mit der Nachtminimumtemperatur und dem Tagesmittelwert beobachtet wurden. Dies weist darauf hin, dass nicht nur die momentane Temperatur, sondern auch die Temperaturentwicklung während des gesamten Tagesgangs von Bedeutung ist (Tag/Nacht)¹¹. Dies wurde bisher noch nicht untersucht. Der Sachverhalt lässt sich auch auf das Rauminnere übertragen. Der Bedarf an Kühlung wird aber anhand der momentanen Temperatur, wie in den Normen definiert, bewertet und berücksichtigt den Tagesgang, insbesondere die Nachttemperaturen nur ungenügend. Basierend auf den Untersuchungen von Ragettli et al. (7) wird mit Hilfe der Daten der Schweizerischen Nationalen Kohortenstudie empirisch ein Temperaturkriterium und -niveau ermittelt, das die Belastung und Erholung des Menschen berücksichtigt. Die Untersuchung soll zeigen, ob die Temperaturanforderungen zukünftig angepasst werden müssen.

¹¹ Der menschliche K\u00f6rper verkraftet mehr, wenn sich die Temperatur nach einem heissen Tag in der Nacht auf ein angenehmes Niveau abk\u00fchlt. Erste Auswertungen der Untersuchungen von ClimaBau (6) zeigen, dass der 24h Mittelwert der empfundenen Temperatur eine ad\u00e4quate Bewertungstemperatur sein k\u00f6nnte. Eine weitere M\u00f6glichkeit w\u00e4re die minimale Nachttemperatur in der Bewertung zu ber\u00fccksichtigen.



2 Vorgehen und Methode

2.1 Auswahl der Kühllösungen

Im Rahmen einer Literaturrecherche und mehrerer Workshops mit den Industriepartnern, sowie in Absprache mit der Begleitgruppe, wurden die zu untersuchenden Kühllösungen identifiziert. Die ausgewählten Konfigurationen sind nachfolgend beschrieben.

Die für die Kühlung in Wohnbauten einsetzbaren Kühllösungen werden aus funktionaler, ökologischer und wirtschaftlicher Sicht bewertet. Dies bedingt einerseits die Untersuchung einer breiten Palette von Kälteerzeugern und Kälteabgabesystemen und andererseits die Fokussierung auf aussagekräftige Lösungen, damit eine überblickbare Bewertung möglich ist. Die Kühllösungen werden in die drei Kategorien «Aussenseitig», «Zentral», «Dezentral raumweise» und «Lokal» unterteilt.

In der Kategorie Aussenseitig wird die Fassadenbegrünung qualitativ bewertet (siehe 1.1.5, zweiter Absatz).

Die zentralen Kühllösungen umfassen zwei Typen von Anlagen. Solche ohne Kältemittel (Hybridkühler) und solche mit Kältemittel (Kältemaschine und Wärmepumpe). Auf die Untersuchung eines Trockenkühlers in Ergänzung zum Hybridkühler wurde verzichtet, da bei den hohen Aussentemperaturen im Sommer die benötigte Kühlwassertemperatur nicht erreicht wird. Bei den Wärmepumpen werden die Lösungen weiter unterteilt. In eine Lösung, wo die Luft-/Wasserwärmepumpe als Kältemaschine und zwei Lösungen, wo die Energiequelle der Wärmepumpe im Sommer für die Kühlung eingesetzt wird (Erdwärmesonden und Grundwasser). Als Fernkälte wird eine direkte Kühlung mit Seewasser vorausgesetzt.

Die dezentralen raumweisen Kühllösungen umfassen die Fensterlüftung und das mobile Klimagerät. Das Split Klimagerät entspricht bezüglich den Überhitzungsstunden dem mobilen Klimagerät. Der Kosteneinfluss und die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb werden für ein Gerät, bestehend aus einer Innen- und Ausseneinheit, in Abschnitt 3.3.3 respektive Abschnitt 3.3.4 exemplarisch beschrieben. Für die Kühlung einer Vielzahl von Räumen, wie sie in dieser Untersuchung vorausgesetzt wird, eignen sich einzelne Split Klimageräte nicht. Jede Inneneinheit benötigt eine Einheit im Aussenbereich. Dies ist sowohl aus architektonischer Sicht, bezüglich Lärmbelastung und dem Ressourcenverbrauch nicht wünschenswert. Alternativ wären Multi Split Systeme anwendbar. Multi Split Systeme fassen mehrere Inneneinheiten durch kältemittelgefüllte Leitungen zusammen. Dies ist aus Sicht der entstehenden Treibhausgasemissionen bei einem Kältemittelverlust problematisch. In solchen Fällen wäre eine zentrale, wasserbasierte Kühllösung angebracht. Aus diesem Grund ist in den Abbildung 11 bis Abbildung 14 nur das mobile Kühlgerät dargestellt.

Die Fensterlüftung ist in allen untersuchten Kühllösungen als Basisvariante enthalten. Beim mobilen Kühlgerät wird in Ergänzung zur thermischen Funktionalität die Frage der Auswirkung eines Kältemittelverlusts auf den Treibhausgasausstoss untersucht.

Die lokalen Kühllösungen umfassen tragbare Kühlelemente, die Wearables, die Bettenkühlung, den Standventilator und kühlende Textilien. Die lokalen Kühllösungen sind hauptsächlich neuere Entwicklungen und werden detailliert in Abschnitt 4 untersucht. Die kühlenden Textilien werden im Sinne einer Übersicht zu ihren Möglichkeiten behandelt, in den Auswertungen der Kühllösungen (Abschnitt 3.3 und Abschnitt 3.4) aber nicht weiter vertieft.

Die zentralen Kälteerzeuger benötigen eine Kälteabgabe. Die Auswahl wurde so gewählt, dass sie Lösungen für den Bestand und den Neubau abdecken. Neben den in die Gebäudestruktur integrierten Systemen, wie die Nutzung der Fussbodenheizung, thermoaktive Bauteilsysteme und Kapillarrohmatten, wird auch die Metallkühldecke untersucht. Mit letzterer soll der Einfluss einer materialintensiven Konstruktion auf die Kosten und die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung untersucht werden. Da in vielen bestehenden Bauten Radiatoren für die Beheizung der Räume vorhanden sind, wird das Kühlpotential der Radiatoren für den Altbau ermittelt.



In Tabelle 2 sind die untersuchten Kühllösungen und ihre Anwendbarkeit in Neubauten, Umbauten und bestehenden Bauten grafisch dargestellt (Kennzeichnung mit Buchstaben x). Der schwarze Buchstaben x entspricht der Zuordnung der Kälteerzeuger, der graue Buchstaben x der Zuordnung der Kälteabgabe zum Gebäudetyp. Die mit eckigen Klammern markierten Kühllösungen können nur dann zum Einsatz kommen, wenn die Infrastruktur für die Kühlung auch vorhanden ist.

Position	Kälteerzeugung	Kälteabgabe	Nen	Umbau	Bestehend
Aussenseitig	Fassadenbegrünung (qualitativ)		Х	х	Х
	Kältemaschine + Hybridkühler ¹²	Fussbodenheizung	X X	x x	x [x]
	Hybridkühler ¹²	Thermoaktive Bauteilsystem	X X	х	х
Zentral	Wärmepumpe Luft/Wasser	Radiator	х	X	[x] ×
	(Wärmepumpe) ¹³ Erdwärmesonden	Metallkühldecke	[x] ×	[x] x	[x]
	(Wärmepumpe) ¹³ Grundwasser	Kapillarrohrmatte	[x] ×	[x] ×	[x] ×
	Fernkälte		[x]	[x]	[x]
Dezentral raumweise	Fensterlüftung ¹⁴ Mobiles Kühlgerät		x x	x x	x x
Lokal	Wearables: Embr Wave Bettenkühlung		x x	x x	x x
	Standventilatoren Kühlende Textilien (nur Übersicht)		x x	x x	x x

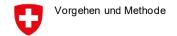
Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Kühllösungen und ihre Anwendbarkeit in Neubauten, Umbauten und bestehenden Bauten. [x] = wenn vorhanden

Erwartungsgemäss ist die Vielfalt der einsetzbaren zentralen Kühllösungen im Neu- und Umbau am grössten. Im Bestand ist der Einsatz eingeschränkt, da die nötige Infrastruktur teilweise nicht vorhanden und die Anzahl von Kälteabgabesystemen reduziert ist. Gut erkennbar ist, dass sowohl die dezentralen raumweisen als auch die lokalen Kühllösungen unabhängig vom Gebäudetyp angewendet werden können.

¹² Mit Wasser besprühter Wärmetauscher. Damit kann der Verdunstungseffekt des Wassers genutzt werden, was zu tieferen Kühlwassertemperaturen führt. Anstelle der Lufttemperatur ist die Feuchtkugeltemperatur für die Wirkung massgebend.

¹³ Energieerzeuger bestehend aus Wärmepumpe und Erdwärmesonden bzw. Grundwasser. Während der Kühlperiode werden die Erdwärmesonden (Regeneration) und das Grundwasser als Kühlquelle genutzt.

¹⁴ Die Fensterlüftung ist in allen Kühllösungen als Basisvariante berücksichtigt.



2.1.1 Kälteerzeugung

In Tabelle 3 sind für die untersuchten Kälteerzeuger, die Nutzungsart und die während der Kühlphase in Betrieb stehenden Anlagenelemente dargestellt. Die Nutzungsart «Monofunktional» bedeutet, dass die Kühllösung nur zum Kühlen eingesetzt wird. Die Nutzungsart «Multifunktional» lässt sowohl das Kühlen als auch das Heizen zu. Die Nutzungsart ist für die Zuordnung der Erstellungskosten auf den Heiz- und Kühlbetrieb von Bedeutung. Bei multifunktionalen Systemen werden in dieser Untersuchung 33% der Erstellungskosten der Kühlung zugewiesen. Der Grund für diese Aufteilung basiert auf der Annahme, dass mit zunehmendem Kältebedarf die Systemwahl nicht mehr ausschliesslich mit Blick auf das Heizen gefällt wird. So kann beispielsweise die Kühlung über Erdwärmesonden nur dann erfolgen, wenn zum Heizen eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonden eingesetzt wird. Die Kälteerzeugung trägt somit ihren Anteil an den gesamten Erstellungskosten. Das gleiche Verfahren wird für die Aufteilung der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung angewendet.

Kälteerzeugung	Nutzungsart	Betrieb während der Kühlphase	Bezeichnung in Abbildung 11 bis Abbildung 14	Technische Details im Abschnitt
Fensterlüftung	Monofunktional	Fensterlüftung im Kühlmodus	Fensterlüftung	14.4.1
Wearable (Embr Wave)	Monofunktional	Wearable im Kühlmodus	Wearable (Embr Wave)	14.4.2
Bettenkühlung	Monofunktional	Bettenkühlung im Kühlmodus	Bettenkühlung	14.4.3
Standventilator	Monofunktional	Standventilator im Luftbetrieb	Standventilator	14.4.4
Mobiles Kühlgerät	Monofunktional	Kühlaggregat	Mobiles Kühlgerät	14.4.5
Fernkälte	Multifunktional	Direktkühlbetrieb (Seewasser)	Fernkälte	14.4.10
Hybridkühler	Monofunktional	Hybridkühler (Feuchtbetrieb)	Hybridkühler	14.4.6
Kältemaschine mit Hybridkühler	Monofunktional	Kältemaschine und Hybridkühler (Feuchtbetrieb)	KM mit Hybridkühler	14.4.6
Luft- /Wasserwärmepumpe als Kältemaschine	Multifunktional	Luft-/Wasserwärmepumpe als Kältemaschine	WP LW	14.4.7
Wasser- /Wasserwärmepumpe mit Erdwärmesonden	Multifunktional	Erdwärmesonden im Regenerationsbetrieb	(WP) EWS	14.4.8
Wasser- /Wasserwärmepumpe mit Grundwasser	Multifunktional	Grundwasserbrunnen im Direktkühlbetrieb	(WP) GW	14.4.9

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Kälteerzeuger mit ihrer Nutzungsart, der Betriebsweise während der Kühlphase, der Bezeichnung in den Auswertungen der Simulationsberechnungen und den Abschnittsverweisen zu den physikalischen Kennwerten, Regelparametern und der Nutzungsdauer. Die Bezeichnung WP in Klammern () bedeutet, dass die Wärmepumpe während der Kühlphase nicht betrieben wird aber als Teil der gesamten Infrastruktur für das Heizen- und Kühlen vorhanden sein muss.

Zusätzlich sind in der Tabelle 3 die in den Auswertungen der Simulationsberechnungen verwendeten Bezeichnungen (Abbildung 11 bis Abbildung 14) und die Abschnittsverweise zu den technischen Details der Kälteerzeuger aufgelistet.



2.1.2 Kälteverteilung

In Tabelle 4 sind für die untersuchten Kälteabgabesysteme die Nutzungsarten und der während der Kühlphase genutzte Betriebsmodus dargestellt. Die Nutzungsart «Monofunktional» bedeutet, dass das Kälteabgabesystem nur zum Kühlen eingesetzt wird. Mit der Nutzungsart «Multifunktional» wird das Kälteabgabesystem sowohl für das Kühlen als auch für das Heizen verwendet. Die Erstellungskosten und die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung werden dem Heiz- und Kühlbetrieb in gleicher Weise wie für die Kälteerzeugung (Abschnitt 2.1.1) zugeordnet.

Kälteabgabe	Nutzungsart	Betrieb während der Kühlphase	Bezeichnung in Abbildung 11 bis Abbildung 14	Technische Details im Abschnitt
Fussbodenheizung	Multifunktional	Kühlmodus	FBH	14.4.11
Thermoaktives Bauteilsystem	Multifunktional	Kühlmodus	TABS	14.4.11
Radiator	Multifunktional	Kühlmodus	Radiator (nur in Abbildung 11 und Abbildung 13)	14.4.13
Metallkühldecke	Multifunktional Monofunktional	Kühlmodus	Kühldecke	14.4.12
Kapillarrohrmatte	Multifunktional Monofunktional	Kühlmodus	Kapillarrohrmatte	14.4.11

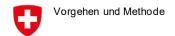
Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Kälteabgabe mit ihrer Nutzungsart, der Betriebsweise während der Kühlphase, der Bezeichnung in den Auswertungen der Simulationsberechnungen und den Abschnittsverweisen zu den physikalischen Kennwerten.

Zusätzlich sind in der Tabelle 4 die in den Auswertungen der Simulationsberechnungen verwendeten Bezeichnungen (Abbildung 11 bis Abbildung 14) und die Abschnittsverweise zu den technischen Details der Kälteerzeuger aufgelistet.

2.2 Auswahl der Gebäude

Die Kühllösungen werden in einen Neubau (massive Bauweise, Baujahr 2016) mit einem Fensteranteil von 50% und in einen Altbau (Umbau/bestehend) (massive Bauweise, Baujahr 1954) mit einem Fensteranteil von 31% integriert. Sowohl der Neu- als auch der Altbau weisen eine Ost-/Westausrichtung auf. Die Bewertung des thermischen Verhaltens der Gebäude in Kombination mit den Kühllösungen erfolgt mit thermischen Simulationsberechnungen. Als Berechnungsprogramm kommt IDA ICE zum Einsatz. Der Unterschied zwischen dem Um- und bestehenden Bau besteht darin, dass beim bestehenden Bau nur Lösungen ohne grosse strukturelle Eingriffstiefe umgesetzt werden. Der betrachtete Altbau wurde letztmalig im Jahr 1998 saniert.

Die detaillierten Angaben zum Gebäude, der Gebäudekonstruktion, der Verglasung, dem Sonnenschutz sowie den internen Wärmelasten sind in Abschnitt 14.3 zu finden.



2.3 Bewertungskriterien der Kühllösungen

Die Bewertung der Kühllösungen (Abschnitt 3) basiert auf dem folgenden Verfahren:

Wirksamkeit

Die Berechnung der Überhitzungsstunden für die verschiedenen Kühllösungen erfolgt anhand der maximal akzeptierbaren Innentemperatur.

Akzeptanz

Die Abschätzung der Akzeptanz basiert auf Umfragen im Projektteam und an Veranstaltungen, wo das Projekt vorgestellt wurde.

Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb

Die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb werden mit den Treibhausgasemissionsfaktoren gemäss KBOB/eco-bau/IPB 2009/1:2016 berechnet. Die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung basiert ebenfalls auf der Grundlage KBOB/eco-bau/IPB 2009/1:2016 und wird durch eigene Berechnungen ergänzt. Die Datengrundlage ist in Abschnitt 14.6 beschrieben.

Erstellungs-, Betriebs- und Rückbaukosten

Die Erstellungs- und Rückbaukosten basieren auf Kostenkalkulationen der Industriepartner Implenia und Xtegrasol. Die Betriebskosten werden aus dem Energieverbrauch und den spezifischen Kosten der Energieträger ermittelt. Die Datengrundlagen sind in Abschnitt 6 (mit Schwerpunkt Umbau) und in Abschnitt 14.5 beschrieben.

Ausführungszeitpunkt

Die Festlegung des Ausführungszeitpunktes basiert auf den Erfahrungen der Industriepartner.

2.4 Bewertungstemperaturen und Anlagenleistung

Mit einer Kältemaschine oder einem Fernkältesystem kann grundsätzlich fast jede Innentemperatur erreicht werden. Die Kälteerzeugung und das Kälteabgabesystem im Raum müssen lediglich genügend gross gewählt werden und die Vorlauftemperatur muss einen genügenden Abstand zum Taupunkt aufweisen. Im Sinne der rationellen Energienutzung, der Vermeidung von Treibhausgasemissionen und der Reduktion von Kosten, kann das aber nicht das Ziel sein. Die Dimensionierung der untersuchten Lösungen folgt deshalb folgenden Grundsätzen:

Maximale Innentemperaturen

In Wohnzimmer wird eine maximale Innentemperatur von 26°C, im Schlafzimmer von 24°C für die Bewertung der Kühllösungen herangezogen. Die gewählten Temperaturbedingungen basieren auf den Erkenntnissen der Untersuchungen aus Abschnitt 5.3.2 und Abschnitt 5.4 mit Blick auf den Grossteil der Bevölkerung.

Basis Heizleistungsbedarf

Luft-/Wasserwärmepumpen, Erdwärmesonden und Grundwasserbrunnen, die für den Heiz-/Kühlbetrieb genutzt werden, sind mit einer maximalen Heizleistung gemäss SIA 382/2 (Kapitel 3.1.1.2) mit den Vorgaben des SIA MB 2044 ausgelegt. Die Auslegung der Fussbodenheizung und der Radiatoren basiert auf dem Heizleistungsbedarf.

Maximale Kühlleistung

Der Leistungsbedarf für die Kältemaschine und den Fernkälteanschluss basiert auf einem um 20% reduzierten Spitzenkühlleistungsbedarf des Gebäudes für das Medianjahr 2060. Dieser Spitzenkühlleistungsbedarf wurde mit Simulationsberechnungen ermittelt. Die Reduktion der Spitzenkühlleistung ist deshalb gerechtfertigt, weil sich eine kurzfristige Minderleistung – durch den dämpfenden Effekt der



Gebäudemasse – nicht in einem sofortigen Temperaturanstieg im Raum äussert. Damit kann die Anlagengrösse verkleinert, die Laufzeit erhöht und der Materialaufwand (Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen aus der Erstellung) reduziert werden. Ebenso werden die Kosten gesenkt. Die Kälteabgabe (metallische Kühldecke, Kapillarrohrmatte) wird ebenfalls mit dieser reduzierten Leistung dimensioniert. Die Auslegung der Fussbodenheizung basiert auf dem Heizleistungsbedarf.

Minimale Vorlauftemperatur

Um das Kondensieren der Luft an den Kühlflächen der zentralen Kühllösungen zu verhindern, wird die Vorlauftemperatur auf minimal 18°C begrenzt.

2.5 Personenbezogene Kühlung, Potential und technische Lösung

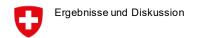
Abschnitt 4 beschreibt die Untersuchungen zur personenbezogenen Kühlung. Die untersuchten Lösungen umfassen einen Ventilator im Nahbereich der Person, auf dem Körper tragbare Kühlelemente (als Wearables bezeichnet) und grossflächige personenbezogene Kühlflächen (Bettenkühlung). Im Sinne einer Übersicht wird das Kühlpotential von kühlenden Textilien zusammengefasst. Als Basis für die Untersuchung der personenbezogenen Kühlung wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt und ausgewertet. Die wesentlichen Publikationen sind referenziert und im Literaturverzeichnis (Abschnitt 13) zu finden. Für die Ermittlung des Potentials der Bettenkühlung werden Modellrechnungen durchgeführt (Berechnungsmodell Abschnitt 14.7) und zwei Prototypen entwickelt. Einer davon, ein auf einen Stoffträger aufgenähtes Kapillarrohrsystem, wurde im Labor messtechnisch untersucht.

2.6 Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten

Abschnitt 5 beschreibt die Untersuchung zu den Temperaturkriterien und -anforderungen für Wohnbauten aus Sicht der Sterblichkeit. Für die Festlegung der Temperaturkriterien im Innenraum muss der Zusammenhang zwischen der Sterblichkeit und der Innentemperatur bekannt sein. Dieser Zusammenhang wird bis anhin in epidemiologischen Untersuchungen kaum berücksichtigt. Deshalb analysiert das Swiss TPH in dieser Untersuchung die Sterblichkeit in Funktion der Innentemperatur auf Basis der Swiss national cohort (SNC) nach dem Case-Crossover-Design. Die grosse Anzahl der zu untersuchenden Todesfälle (301'437) bedingt ein schnell rechnendes Gebäudemodell für die Ermittlung der Innentemperatur auf Basis der baulichen und klimatischen Randbedingungen. Deshalb wird ein vereinfachtes Berechnungsmodell entwickelt und die erreichbare Genauigkeit durch den Vergleich mit IDA ICE bestimmt (siehe Abschnitt 14.8). Da nicht genügend Messstation von MeteoSchweiz für die Bestimmung der klimatischen Bedingungen im Aussenraum vorliegen (vor allem in Städten), wird durch das Swiss TPH ein eigens entwickeltes, hochauflösendes Temperaturmodell (100x100m) eingesetzt (siehe Abschnitt 14.2). Ebenso wird der Zusammenhang zwischen der Innentemperatur und der Schlafqualität untersucht. Dazu wird eine Literaturrecherche (Abschnitt 5.4) durchgeführt und es werden Expertenmeinungen eingeholt.

2.7 Empfehlungen für Anspruchsgruppen

Die Sicherstellung eines auf den Klimawandel ausgerichteten Gebäudeparks betrifft verschiedene am Bau beteiligte Anspruchsgruppen. In Abschnitt 7 wird versucht, einen Brückenschlag zwischen den Resultaten und den Anspruchsgruppen zu erreichen.



3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Klimatische Bedingungen im Aussenraum

Die für die Bewertung der Kühllösungen verwendeten Klimadaten der Zukunft haben einen bedeutenden Einfluss auf das Resultat. In der Studie ClimaBau (6) (Kapitel 4.1.7. Relevante Jahre) wurde zum Beispiel die «Modellkette MPI ECHAM5 des Jahres 2068 für extrem warme Werte» für die Berechnungen verwendet. Diese Modellketten basieren auf den Schweizer Klimaszenarien CH2011 (18). Der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) hat im Jahr 2020 das Projekt «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» im Rahmen des BAFU-Programms «Anpassung an den Klimawandel» lanciert. Das Projekt hat zum Ziel, die Klimadaten für die Planung von Gebäuden und Anlagen basierend auf den aktuellen Schweizer Klimaszenarien CH2018 bereitzustellen.

Da dieses Projekt erst nach der Publikation von ResCool abgeschlossen wird, wurden für die Berechnungen im Projekt ResCool in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz passende und konsistente zukünftige Klimadaten identifiziert. Die Untersuchungen sind in Abschnitt 14.1 detailliert beschrieben. Gemäss diesen Untersuchungen kann für die Zeitperiode von 2045 bis 2075, bezüglich der mittleren Sommertemperatur, das Jahr 2018 als zukünftiges Medianjahr und das Jahr 2003 als zukünftig heisses Jahr (Häufigkeit alle 5 bis 10 Jahre) verwendet werden. Zu beachten ist, dass Hitzeperioden in den beiden Klimadatensätzen ausserordentlich lang sind und ungefähr einer 50-jährlichen Häufigkeit entsprechen. Die für die Auswahl der Klimadaten verwendeten Klimamodelle basieren auf dem Emissionsszenario RCP8.5. In den nachfolgenden Texten und Grafiken werden die Bezeichnungen «Medianjahr 2060» und «heisses Jahr 2060» für die Unterscheidung der Klimadaten verwendet. Die Simulationsberechnungen in Abschnitt 3.3 und 3.4 erfolgen für die Station Basel-Binningen.

Entwicklung der mittleren Sommertemperatur

Zur Beschreibung der Temperaturänderung durch den Klimawandel wird häufig der Temperaturanstieg seit dem vorindustriellen Zeitalter bis zu einem bestimmten (zukünftigen) Zeitpunkt herangezogen.

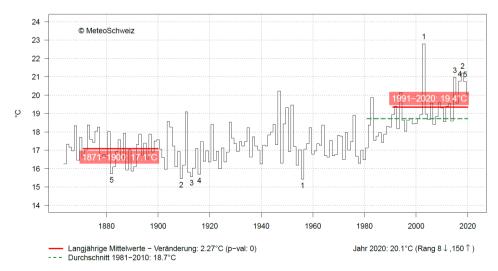


Abbildung 3: Temperaturentwicklung (Quartals-Temperatur) zwischen 1864 und 2020 für die Messtation Basel-Binningen. Quelle: MeteoSchweiz.

Bezüglich der Entwicklung der Temperatur stellt sich die Frage, wie gross diese Temperaturerhöhung bis heute ist und welcher weitere Temperaturanstieg zukünftig erwartet werden muss. Diese schrittweise Sicht soll helfen, die weiteren Erwärmungen einordnen zu können.



In Abbildung 3 ist die Temperaturentwicklung während der vergangenen 156 Jahre dargestellt. Daraus lässt sich der stetige Temperaturanstieg ab den 1980 Jahren gut erkennen. Nachfolgend wird diese Temperaturentwicklung in den Kontext mit den zukünftig zu erwartenden Temperaturen gestellt.

Abbildung 4 stellt die mittlere Sommertemperatur für die Periode 1864-2020, das Medianjahr 2060 (entspricht dem Jahr 2018) sowie das heisse Jahr 2060 (entspricht dem Jahr 2003) dar.

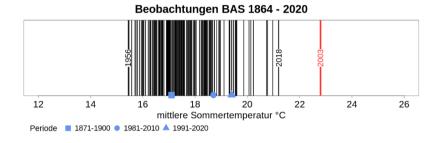


Abbildung 4: Mittlere Sommertemperatur (1. Juni-31. August) aus der homogenisierten Messreihe für die Periode 1864-2020 für die Station Basel-Binningen. Hervorgehoben ist das Jahr mit dem kältesten Sommer (1956), sowie die zwei wärmsten Sommer aus 2018 (entspricht dem «Medianjahr 2060») und 2003 (entspricht dem «heissen Jahr 2060»). Ebenso sind die mittleren Sommertemperaturen für die Perioden 1871-1900 (vorindustriell) 17.1°C, 1981-2010 18.7°C und 1991-2020 19.4°C dargestellt.

Der Auswertung ist zu entnehmen, dass sich die mittlere Sommertemperatur von 17.1°C (1871-1900, vorindustriell) um 1.6 K auf 18.7°C im Zeitraum 1981-2010 erhöht hat. Im Vergleich zur Referenzperiode 1991-2020 beträgt der Anstieg sogar mehr als 2°C. Das Medianjahr 2060 (bzw. das Jahr 2018) zeigt eine mittlere Sommertemperatur von 21.2°C, also 2.5°C über der heutigen Referenzperiode 1981-2010. Mit 22.8°C liegt das heisse Jahr 2060 (2003) 4.1°C über der heutigen Referenzperiode.

Zusammengefasst lässt sich daraus schliessen, dass in der heutigen Referenz (1981-2010) die mittlere Sommertemperatur bereits 1.6°C wärmer ist als im vorindustriellen Zeitalter. Zudem wird für diese Untersuchung von einem zusätzlichen Anstieg der Sommertemperatur um 2.5 K (Medianjahr 2060) und mit einer Häufigkeit alle 5-10 Jahre sogar um 4.1°C (heisses Jahr 2060) ausgegangen. Die in der SIA 2028 (19) verwendete Zeitperiode umfasst den Zeitraum 1984-2003 und kann näherungsweise mit der ausgewerteten Periode 1981-2010 verglichen werden.

3.2 Zulässige Temperatur in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen nach SIA 180

3.2.1 Stundenverteilung der Aussentemperatur

In Abbildung 5 ist die Verteilung der Stunden auf Basis des gleitenden Mittelwertes der Aussentemperatur über 48 Stunden für die Klimadaten SIA 2028 und die im vorangegangenen Abschnitt 3.1 beschriebenen Jahre «Medianjahr 2060» und «heisses Jahr 2060» abgebildet.

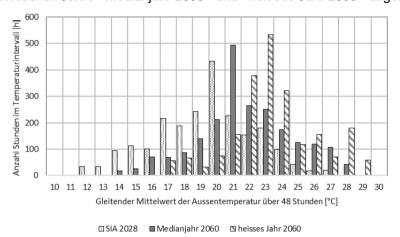


Abbildung 5: Verteilung der Anzahl Stunden im Temperaturintervall der Aussentemperatur (gleitender Mittelwert über 48 Stunden) für die Klimadaten SIA 2028, Medianjahr 2060 und heisses Jahr 2060 (Periode 01.06-31.08).

Die Auswertung zeigt, dass sich der gleitende Mittelwert der Aussentemperaturen zwischen der Periode 1984-2003 (SIA 2028) und dem Medianjahr 2060 um 1°C bis 2°C und zum heissen Jahr 2060 um 3°C bis 5°C verschiebt.

3.2.2 Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur

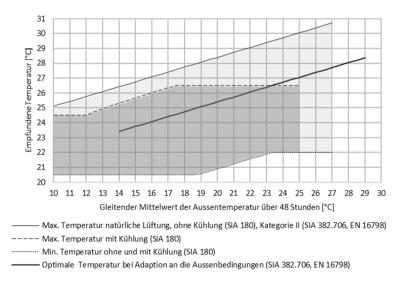


Abbildung 6: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Räumen mit natürlicher Lüftung, die weder beheizt noch gekühlt sind und in Räumen die beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind, je nach dem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur während 48 Stunden (SIA 180:2014). Die dargestellte optimale Temperatur gilt für Räume mit natürlicher Lüftung, wenn die thermischen Bedingungen durch die Nutzenden durch Öffnen und Schliessen der Fenster beeinflusst werden können. Die Adaption der Kleidung an das Aussenklima ist bereits berücksichtigt (SIA 382.706, EN 16798-1:2019).



Die Temperaturverteilung der Aussentemperatur hat einen Einfluss auf die zulässige maximale Innentemperatur gemäss SIA 180 (1). Sie regelt die Anforderungen an Räume mit natürlicher Lüftung, während diese weder beheizt noch gekühlt werden und für Räume, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind. Der zulässige Bereich der empfundenen Temperatur ist für beide Fälle in Abbildung 6 dargestellt. Aus dem Vergleich der Abbildung 5 und Abbildung 6 wird ersichtlich, dass für Räume mit natürlicher Lüftung ohne Kühlung eine maximale empfundene Temperatur von 29°C (Medianjahr 2060) und über 29°C (heisses Jahr 2060) zulässig werden 15. Bei den höchsten zu erwartenden Aussentemperaturen erhöht sich die maximal zulässige empfundene Temperatur in den Räumen bis über 31°C.

Diese hohen maximal zulässigen empfundenen Temperaturen führen dazu, dass verschiedene Studien, die für die Bewertung des Komforts die maximal zulässigen Temperaturen für Räume mit natürlicher Lüftung aus der SIA 180 heranziehen, auch für die zukünftigen klimatischen Bedingungen keinen Bedarf für eine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung ausweisen, obwohl in den Räumen die optimalen empfundenen Temperaturen (siehe Gleichung 3.2.3-1) bereits stark überschritten werden.

3.2.3 Adaptives Komfortmodell

Untersuchungen von de Dear et al. (9) und Nicol et al. (10) zeigen, dass die Nutzenden breitere Temperaturschwankungen akzeptieren, wenn sie die Temperatur aktiv beeinflussen können (Öffnen und Schliessen von Fenstern). Um dieses Verhalten abzubilden, wurden adaptive Komfortmodelle entwickelt und in die Standards aufgenommen (1), (20), (21). Die optimale empfundene Temperatur in Abhängigkeit der Aussentemperatur wird durch die Gleichung (21) (EN 16798)

$$\theta_i = 0.33 \ \theta_{rm} + 18.8$$
 (3.2.3-1)

beschrieben (θ_i = empfundene Temperatur, θ_{rm} = gleitender Mittelwert der Aussentemperatur).

In Abhängigkeit des Prozentsatzes der Unzufriedenen weichen die Temperaturen von der optimalen Temperatur ab. In Tabelle 5 sind die zulässigen maximalen respektive minimalen Temperaturen für verschiedene Komfortanforderungen dargestellt.

Kategorie	PPD [%]	Beschreibung	Maximal, minimal zulässige empfundene Temperatur
I	< 6	hohes Mass an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z.B. Personen mit Beeinträchtigungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen	$\theta_{i max} = 0.33 \; \theta_{rm} + 18.8 + 2$ $\theta_{i min} = 0.33 \; \theta_{rm} + 18.8 - 3$
II	< 10	normales Mass an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude	$\theta_{i max} = 0.33 \ \theta_{rm} + 18.8 + 3$ $\theta_{i min} = 0.33 \ \theta_{rm} + 18.8 - 4$
III	< 15	annehmbares, moderates Mass an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden	$\theta_{i max} = 0.33 \ \theta_{rm} + 18.8 + 4$ $\theta_{i min} = 0.33 \ \theta_{rm} + 18.8 - 5$

Tabelle 5: Anwendbarkeit der Kategorien für verschiedene Komfortansprüche, zu erwartende Unzufriedene und Gleichung zur Berechnung der maximal und minimal zulässigen empfundenen Temperatur für Räume mit natürlicher Lüftung (EN 16798).

In Abbildung 6 ist sowohl die optimale empfundene Temperatur als auch die maximal zulässige Temperatur für Räume mit natürlicher Lüftung der Kategorie II, die weder beheizt noch gekühlt sind, dargestellt. Es stellt sich die Frage, ob eine zulässige Temperaturabweichung von +3°C (Kategorie II) sinnvoll ist. Welche Temperaturen aus Sicht der Gesundheit und der Erholung des Menschen erforderlich sind, wir in Abschnitt 5 untersucht.

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, beträgt die für die Bewertung der Kühllösungen in dieser Untersuchung festgelegte maximal akzeptierbare Innentemperatur am Tag 26°C (Wohnzimmer) und während der Nacht 24°C (Schlafzimmer).

¹⁵ Temperaturen jeweils beim Temperaturintervall mit der höchsten Anzahl Stunden für die betrachteten Klimadaten abgelesen.

3.3 Kühllösungen Altbau

Die Abbildung 11 (Medianjahr 2060) und Abbildung 13 (heisses Jahr 2060) stellen für den Altbau die Überhitzungsstunden, die maximale Innentemperatur im Wohn- und Schlafzimmer, die Investitions-, Betriebs- und Rückbaukosten und die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, dem Betrieb und dem Rückbau für die untersuchten Kühllösungen dar.

3.3.1 Fensterlüftung Überhitzungsstunden, Temperaturen

Die Auswertung für die Kühlung mit der Fensterlüftung zeigt für das Medianjahr 2060 im Wohnzimmer 285 (Basis 26°C) und im Schlafzimmer 114 Überhitzungsstunden (Basis 24°C) auf, die maximale Innentemperatur beträgt dabei 30.0°C respektive 28.0°C. Im heissen Jahr 2060 steigen die Überhitzungsstunden im Wohnzimmer auf 426 Stunden und im Schlafzimmer auf 204 Stunden an, die maximale Innentemperatur beträgt 30.4°C respektive 28.3°C. Die Anzahl der Überhitzungsstunden verändert sich somit vom Medianjahr 2060 zum heissen Jahr 2060 im Wohnzimmer um ca. 50%, im Schlafzimmer um fast 80%. Die maximale Innentemperatur ändert sich dabei wenig, aber die viel höhere Anzahl der Überhitzungsstunden wirkt sich negativ auf den Komfort aus. Führt man die Berechnungen mit den Klimadaten SIA 2028 (19) durch, die aus der Periode 1984-2003¹⁶ gebildet werden, resultieren keine Überhitzungsstunden (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

Wie in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt, wird mit der Fensterlüftung die geforderte Innentemperatur von 26°C am Tag im Wohnzimmer und 24°C in der Nacht im Schlafzimmer (siehe Abschnitt 5.3 und 5.4) im Medianjahr 2060 während 19% beziehungsweise 15% und im heissen Jahr 2060 während 29% beziehungsweise 28% der Belegungszeit überschritten. Die Fensterlüftung leistet somit einen beachtlichen Beitrag zur Erreichung des Komforts während 70-80% der Belegungszeit. Allein kann sie den Komfort nicht zu 100% sicherstellen. Eine Kompensation einer höheren Innentemperatur, durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Person, wird nicht berücksichtigt (Abbildung 16).

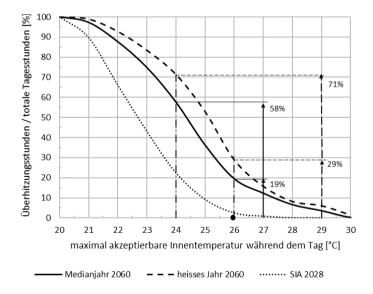


Abbildung 7: Abhängigkeit des Bedarfs einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung von der maximal akzeptierbaren Innentemperatur (Altbau, Wohnzimmer, Tag) für das Medianjahr 2060, das heisse Jahr 2060 und die Periode 1984-2003 gemäss SIA 2028. Periode 01. Juni bis 31. August, Total 1472 Tagesstunden.

¹⁶ Die Klimadaten für das Design Reference Year (DRY) werden aus Monatswerte der Periode 1984-2003 basierend auf Norm SN EN SO 15927-4 ermittelt. Das sehr heisse Jahr 2003 wurde, für die in den Berechnungen gewählte Station Basel-Binningen, nicht in das DRY aufgenommen. Damit entspricht das Klima dem Zustand vor den sich häufenden Ereignissen mit hohen Temperaturen und langen Hitzeperioden.



Zu beachten ist, dass nicht an allen Gebäudestandorten eine Kühlung über Fensterlüftung möglich ist (Einbruchsicherheit, Schallimmissionen). Ebenso verändert die geforderte Innentemperatur das Kühlvermögen der Fensterlüftung markant. Bei einer maximalen Temperatur von 24°C am Tag reduziert sich das Kühlvermögen auf 29% bzw. 42% der Tagesstunden (siehe Abbildung 7), bei 21°C in der Nacht auf 21% bzw. 37% der Nachtstunden (siehe Abbildung 8). Die erste Prozentzahl entspricht dem heissen Jahr 2060, die zweite Prozentzahl dem Medianjahr 2060.

In Tabelle 6 ist die nötige Betriebsdauer, für eine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung, in Abhängigkeit der maximal akzeptierbaren Innentemperatur ausgewertet.

Maximal akzeptierbare Temperatur	Grundlage des Temperaturniveaus	Betriebsdauer der zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung während dem Tag	
		Medianjahr 2060	heisses Jahr 2060
[°C]		[%, h]	[%, h]
24°C	(+/- 2.0°C) gemäss EN7730 als Mittelwert für eine sitzende und stehende Tätigkeit (0.38 clo, 1.5 met) und den Resultaten aus der epidemiologischen Untersuchung in Abschnitt 5.3.2 (Tmax)	58% 847 h	71% 1052 h
26.5°C	SIA 180 für gekühlte Räume	16% 236 h	22% 324 h
≥ 29°C	SIA 180 für Räume mit natürlicher Lüftung. Temperaturen von 29°C und höher sind ab einem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden von 21.5°C zulässig. Während den heissen Perioden ist diese Bedingung erfüllt.	4% 52 h	6% 90h

Tabelle 6: Abhängigkeit der Betriebsdauer, einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung, für unterschiedliche maximal akzeptierbare Innentemperaturen während dem Tag (Altbau). Periode 01. Juni bis 31. August, Total 1472 Tagesstunden.

Tabelle 6 zeigt, dass bei einer maximal akzeptierbaren Innentemperatur von 24°C – wie sie aus der epidemiologischen Untersuchung hervorgeht (siehe Abschnitt 5.3.2) – die zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung während 58% (Medianjahr 2060) beziehungsweise während 71% (heisses Jahr 2060) des Tages betrieben werden muss. Bei einer maximal akzeptierbaren Temperatur von 26.5°C, wie sie die SIA 180 für gekühlte Räume fordert, reduziert sich die Betriebsdauer auf 16% im Medianjahr 2060 und auf 22% im heisses Jahr 2060. Mit der Temperaturanforderung gemäss SIA 180 für natürlich belüftete Räume ist, unter Berücksichtigung von 50-90 Überhitzungsstunden, keine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung nötig. Der Vergleich mit dem zulässigen Temperaturniveau aus der epidemiologischen Untersuchung zeigt jedoch, dass die zulässige maximale Temperatur für natürlich belüftete Räume zu hoch angesetzt ist.

Ergebnisse und Diskussion



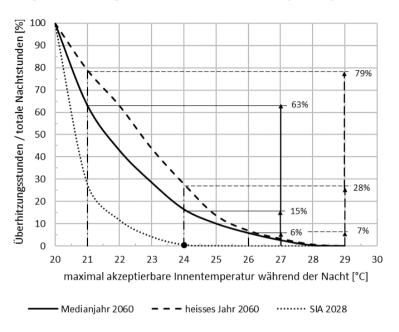


Abbildung 8: Abhängigkeit des Bedarfs einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung von der maximal akzeptierbaren Innentemperatur (Altbau, Schlafzimmer, Nacht) für das Medianjahr 2060, das heisse Jahr 2060 und die Periode 1984-2003 gemäss SIA 2028. Periode 01. Juni bis 31. August, Total 736 Nachtstunden.

In Tabelle 7 ist die nötige Betriebsdauer, für eine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung, in Abhängigkeit der maximal akzeptierbaren Innentemperatur ausgewertet.

Maximal akzeptierbare Temperatur	Grundlage des Temperatumiveaus	Betriebsdauer der zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung während der Nacht	
		Medianjahr 2060	heisses Jahr 2060
[°C]		[%, h]	[%, h]
21°C	(+/- 2.5°C) gemäss EN7730 für eine liegende, bedeckte Person (2.1 clo, 0.6 met) und den Resultaten aus der epidemiologischen Untersuchung in Abschnitt 5.3.2	63% 466 h	79% 582 h
24°C	maximal akzeptierbare Schlaftemperatur gemäss Abschnitt 5.4, Wert leicht höher als 21°C + 2.5°C (EN7730)	15% 110 h	28% 206 h
26.5°C	SIA 180 für gekühlte Räume	4% 29 h	5% 37 h
≥ 29°C	SIA 180 für Räume mit natürlicher Lüftung. Temperaturen von 29°C und höher sind ab einem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden von 21.5°C zulässig. Während den heissen Perioden ist diese Bedingung erfüllt.	0% 0	0% 0

Tabelle 7: Abhängigkeit der Betriebsdauer, einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung, für unterschiedliche maximal akzeptierbare Innentemperaturen während der Nacht (Altbau). Periode 01. Juni bis 31. August, Total 736 Nachtstunden.

Tabelle 7 zeigt, dass bei einer maximal akzeptierbaren Innentemperatur von 21°C – wie sie aus der epidemiologischen Untersuchung hervorgeht (siehe Abschnitt 5.3.2) – die zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung während 63% (Medianjahr 2060) beziehungsweise während 79% (heisses Jahr 2060) der Nacht betrieben werden muss. Bei einer maximal akzeptierbaren Temperatur von 24°C, wie sie für Schlafräume gemäss Abschnitt 5.4 resultiert, reduziert sich die Betriebsdauer auf 15% im Medianjahr 2060 und auf 28% im heisses Jahr 2060. Bei einer maximal akzeptierbaren Temperatur von 26.5°C, wie sie die SIA 180 für gekühlte Räume fordert, reduziert sich die Betriebsdauer auf 4%



im Medianjahr 2060 und 5% im heisses Jahr 2060. Mit der Temperaturanforderung gemäss SIA 180 für natürlich belüftete Räume ist keine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung nötig. Der Vergleich mit dem zulässigen Temperaturniveau aus der epidemiologischen Untersuchung (Abschnitt 5.3.2) und den Untersuchungen zu den maximal akzeptierbaren Schlaftemperaturen (Abschnitt 5.4) zeigt jedoch, dass die zulässige maximale Temperatur für natürlich belüftete Räume zu hoch angesetzt ist.

3.3.2 Dezentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen

In der nachfolgenden Tabelle 8 sind diejenigen dezentralen Kühllösungen dargestellt, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können.

Nutzung	Medianjahr 2060	heisses Jahr 2060
Bestehende Gebäude und Umbau Unterstützend zur Fensterlüftung		
Wohnzimmer und Schlafzimmer	Mobiles Kühlgerät ¹⁷ (mittlere Leistungszahl 2.4)	Mobiles Kühlgerät ¹⁷ (Mittlere Leistungszahl 2.4)
Schlafzimmer	Bettenkühlung Wearable (Embr Wave)	Bettenkühlung Wearable (Embr Wave)

Tabelle 8: Übersicht der dezentralen Kühllösungen für den Altbau, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können

Der Standventilator führt zu einer örtlichen Temperaturreduktion von 2-3°C am Tag. In der Nacht ist die Wirkungsweise, wegen des hohen Bedeckungsgrades von 60-70% des Menschen (Anteil der durch das Duvet bedeckten Körperfläche) stark eingeschränkt (siehe Abbildung 30).

Mobile Kühlgeräte und Split Kühlgeräte sind grundsätzlich in der Lage, auch Innentemperaturen unter 24°C während der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären, zu erreichen. Es muss beachtet werden, dass die Luft bei der Abkühlung entfeuchtet wird (Umluftbetrieb), was möglicherweise zu gesundheitlichen Problemen führen kann. Die Bettenkühlung kann ein Bettenklima herstellen, wie es bei tieferen Innentemperaturen herrscht. Die Asymmetrie zur effektiven Innentemperatur darf aber nicht zu gross sein (Abschnitt 4.5).

3.3.3 Dezentrale Systeme Kosten

Die Investitionskosten für die Bettenkühlung und das am Handgelenk tragbare Kühlelement sind ungefähr doppelt so hoch wie für das mobile Kühlgerät. Zu beachten ist, dass der Preis für die Bettenkühlung zurzeit noch schwer abschätzbar ist. Am Markt ist noch keine vollständig funktionierende Systemlösung verfügbar (siehe Abschnitt 4.3).

Die Betriebskosten des mobilen Kühlgerätes während 10 Jahren sind gleich hoch wie seine Investitionskosten. Die Betriebskosten für das am Handgelenk tragbare Kühlelement und die Bettenkühlung mit Trinkwasseranschluss können im Vergleich zu den Investitionskosten vernachlässigt werden. Vergleicht man die Gesamtkosten für die Bettenkühlung, das am Handgelenk tragbare Kühlelement und das mobile Kühlgerät, zeigt sich, dass diese – unter Berücksichtigung der jeweiligen Geräteanzahl im Gebäude – für die drei Kühllösungen beinahe identisch sind.

Setzt man anstelle eines mobilen Kühlgerätes ein Spilt Kühlgerät¹⁸ ein, erhöhen sich die Investitionskosten um ungefähr das Vier- bis Fünffache. Gleichzeitig reduzieren sich die Betriebskosten, wegen

¹⁷ Die Abgabe der Kondensationswärme der Kältemaschine oder der multifunktionalen Wärmepumpe an die Umgebungsluft wirkt sich negativ auf das Mikroklima im Aussenraum aus und unterstützt den Hitzeinseleffekt. Dieser führt wiederum zu einem höheren Kältebedarf. Die Betriebszeit der Anlage soll auf ein absolutes Minimum beschränkt und wo möglich, soll die Abwärme gespeichert und wiederverwendet werden. Gemäss den Untersuchungen von Salamanca et al. (53) ist in der Nacht eine Erhöhung der Lufttemperatur von 1°C auf 2 m Höhe in urbanen Gebieten durch die Abwärme von Kühlgeräten nachweisbar.

¹⁸ CTA, Fujitsu ASYG09KGTB (Inneneinheit), AOYG09KGCA (Ausseneinheit), 900 CHF/kW, SEER 8.5, Kältemittel R32, Kältemittelmenge 0.8 kg, Gewicht 40 kg.

der höheren Leistungszahl, auf ein Viertel. Daraus resultieren Mehrkosten in der Grössenordnung des 2.5-fachen im Vergleich zum mobilen Kühlgerät.

Die Erstellungskosten, die in Abbildung 11 und Abbildung 13 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [CHF/(m² EBF a)]. Müssen Geräte während dieser Dauer ersetzt werden, wird dies in der Berechnung berücksichtigt.

3.3.4 Dezentrale Systeme Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen des mobilen Kühlgerätes setzen sich zu ca. 40% aus der Herstellung und zu 60% aus dem Betrieb zusammen. Dieser hohe Anteil aus dem Betrieb ist vor allem der tiefen Leistungszahl solcher Geräte geschuldet. Die Höhe der Treibhausgasemissionen, aus dem Verbrauch von Elektrizität, basiert auf dem CH-Verbrauchermix mit 0.102 kg CO₂-eq/kWh. Durch das Entweichen von Kältemitteln in die Atmosphäre tragen Kühlgeräte stark zur Klimaerwärmung bei. Die Schädlichkeit ist vom Global Warming Potential (GWP) abhängig. Das Kältemittel R410A weist ein GWP100 von 2088, R290 (Propan) von 3 und CO₂ von 1 auf. Tabelle 9 zeigt, wie viele Betriebsstunden das Kühlgerät betrieben werden kann, bis es die äquivalenten Treibhausgasemissionen eines vollständigen Kältemittelverlust verursacht.

Kältemittel mobiles Kühlgerät	Treibhausgasemission bei Kältemittelverlust	Äquivalente Vollbetriebsstunden im Vergleich z Kältemittelverlust	
	GWP100	CH-Verbrauchermix	Photovoltaik am Standort
	[kg CO ₂ -eq/ (kg Kältemittel)]	[h]	[h]
R410A (seit 01.01.2020 nicht mehr erlaubt)	2088	9825	12373
R32	675	3176	4000
R290	3	14	18
CO ₂	1	5	6

Tabelle 9: Äquivalente Vollbetriebsstunden für ein mobiles Kühlgerät im Vergleich zum Kältemittelverlust. (Treibhausgasemission aus Stromproduktion: CH-Verbrauchermix 0.102 kg CO₂-eq/kWh, Photovoltaik am Standort erzeugt 0.081 kg CO₂-eq/kWh; Geräteleistung 2.5 kW; Kältemittelinhalt 0.5 kg; Leistungszahl 2.4).

Die Auswertung der Resultate aus Tabelle 9 zeigt, dass bei dem in mobilen Kühlgeräten eingesetzten und seit dem 01. Januar 2020 verbotenen Kältemittel R410A ein Kältemittelverlust einer Betriebsdauer von 10'000-12'000 Stunden entgegensteht. Das umweltschädigende Potential solcher Geräte geht vom Kältemittel aus. Solche Geräte sollen fachmännisch entsorgt und wenn nötig durch ein Gerät mit einem natürlichen Kältemittel ersetzt werden. Der Einfluss eines möglichen Kältemittelverlustes bei einem Gerät mit dem Kältemittel R290 wird schon nach wenigen Betriebsstunden durch die Treibhausgasemissionen aus der Stromproduktion überschritten. Das umweltschädigende Potential solcher Geräte geht von der Energiequelle für die Stromerzeugung aus. Vergleicht man die Treibhausgasemissionen des mobilen Kühlgerätes in Abbildung 11 und Abbildung 13 mit den zentralen Kühllösungen, zeigen sich um 20-80% höhere Treibhausgasemissionen des mobilen Kühlgerätes. Aus diesem Grund können solche Geräte nur in bestehenden Bauten ohne Kühlalternative eingesetzt werden (siehe auch Domingo et al. (22) und Fitzner et al. (23)).

Setzt man anstelle eines mobilen Kühlgerätes ein Split Kühlgerät ein, erhöhen sich die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung wegen des höheren Gewichtes um circa 25%. Die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb können durch die höhere Leistungszahl bis annähernd auf ein Viertel verringert werden. Daraus resultiert eine Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum mobilen Kühlgerät in der Grössenordnung von 25%. Split Kühlgeräte werden meist mit R32 als Kältemittel mit einem GWP100 von 675 betrieben. Die Treibhausgasemissionen aus einem Kältemittelverlust mit R32 würden, in Analogie zur Berechnung in Tabelle 9 mit einem Kältemittelinhalt von 0.8 kg und einer Leistungszahl von 8.5, einer Betriebsdauer von 18'000-22'700 Stunden entsprechen. Für die Kühlung einer grossen Anzahl von Räumen eignen sich einzelne Split Kühlgeräte nicht. Es müsste ein Multi Split System eingesetzt werden, das wegen den grossen Kältemittelmengen nicht unproblematisch ist.



Für die Bettenkühlung wurden die Treibhausgasemissionen anhand der Materialisierung des entwickelten Funktionsmuster ermittelt.

Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, die in Abbildung 11 und Abbildung 13 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [kg CO₂-eq/(m² EBF a)]. Müssen Geräte während dieser Dauer ersetzt werden, wird dies in der Berechnung berücksichtigt.

3.3.5 Zentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen

In Tabelle 10 sind diejenigen zentralen Kühllösungen dargestellt, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können.

Nutzung	Medianjahr 2060	heisses Jahr 2060			
Umbau Unterstützend zur Fensterlüftung					
Wohnzimmer und Schlafzimmer	Kälteerzeugung: Fernkälte, Kältemaschine mit Hybridkühler ¹⁷ , Luft-/Wasserwärmepumpe ¹⁷ , Erdwärmesonden und Grundwasser Kälteabgabe: Kühldecke oder Kapillarrohrmatte	Kälteerzeugung: Fernkälte, Kältemaschine mit Hybridkühler ¹⁷ , Luft-/Wasserwärmepumpe ¹⁷ , Erdwärmesonden und Grundwasser Kälteabgabe: Kühldecke oder Kapillarrohrmatte			
Nur Schlafzimmer	Kälteerzeugung: Wie oben Kälteabgabe: Fussbodenheizung	Kälteerzeugung: Wie oben Kälteabgabe: Fussbodenheizung			

Tabelle 10: Übersicht der Kombinationen aus Kälteerzeugung und Kälteabgabe für den Altbau, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können.

Die in Abbildung 11 und Abbildung 13 dargestellten Resultate zeigen, dass Systeme mit einer erneuerbaren Energiequelle wie Seewasser (Fernkälte), Geocooling (Regeneration von Erdwärmesonden) und Grundwasser die Innentemperatur in Kombination mit einem effizienten Kälteabgabesystem (Metallische Kühldecke oder Kapillarrohrmatte) sowohl im Wohn- als auch im Schlafzimmer unterhalb der Marke von 100 Überhitzungsstunden halten können. Dies gilt sowohl für das Medianjahr 2060 als auch für das heisse Jahr 2060.

Die maximale Innentemperatur im Wohnzimmer beträgt 26.3-26.9°C, im Schlafzimmer 24.9-25.2°C für das Medianjahr 2060 und 26.3-27.1°C (Wohnzimmer) beziehungsweise 24.6-25.0°C (Schlafzimmer) für das heisse Jahr 2060. Gleich verhalten sich mechanische Kühlanlagen, wie die Kältemaschine mit Hybridkühler und die als Kältemaschine eingesetzte Luft-/Wasserwärmepumpe. Der Nachteil der zwei letztgenannten Anlagentypen ist, dass die dem Raum entzogene Kühlenergie und die für den Kompressorbetrieb benötigte Elektrizität in Form von Wärme an die äussere Umgebung abgegebene wird. Dadurch wird die Umgebung erwärmt, was zu mehr Kühlbedarf und einem wiederum erhöhten Wärmetransport in die Umgebung führt. Das System schaukelt sich auf und es können Hitzeinseln entstehen.

Mit der Kälteabgabe über die Fussbodenheizung werden die Überhitzungsstunden im Vergleich zur reinen Fensterlüftung um 40-50% reduziert. Damit kann die Marke von 100 Überhitzungsstunden nur im Schlafzimmer erreicht werden. Eine Erhöhung des Wassermassenstroms, die Reduktion des Abstandes zwischen den Rohren und ein gut wärmeleitender Bodenbelag kann Abhilfe schaffen. Das Potential der Kühlung über Radiatoren reicht für keine der Systemlösungen aus.

Wegen dem starken Einfluss der Aussentemperatur auf die Funktionsweise des Hybridkühlers, kann dieses System die benötigte Kühlleistung nicht erbringen.

Die untersuchten zentralen Kühllösungen sind nicht in der Lage, Innentemperaturen weit unter 24°C während der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären (z.B. 21°C), zu erreichen. Die Kühlleistung ist entweder durch den nötigen Abstand der Kühlwassertemperatur zum Taupunkt der Luft oder durch die erreichbare Kühlwassertemperatur aus der Kühlguelle limitiert.

In Tabelle 11 sind die in den Berechnungen verwendeten mittleren Leistungszahlen summarisch zusammengefasst.

System	Medianjahr 2060	heisses Jahr 2060	
	[-]	[-]	
Fernkälte	7.0	7.0	
Kältemaschine mit Hybridkühler ¹⁷	7.2	7.3	
Luft-/Wasserwärmepumpe ¹⁷	5.9	5.6	
Erdwärmesonden	36.0	36.0	
Grundwasser	36.0	36.0	

Tabelle 11: Übersicht der mittleren Leistungszahlen während der Kühlperiode.

3.3.6 Zentrale Systeme Kosten

Bei multifunktionalen Kühllösungen werden 33% der Erstellungskosten der Kühlung zugewiesen.

Bei bestehenden Bauten sind zentrale Systeme, die nur für die Kühlung eingesetzt werden (monofunktional), nicht sinnvoll. Eine Ausnahme bietet die Nutzung der Fussbodenheizung zur Kälteabgabe. Trotz der eingeschränkten Leistungsfähigkeit (unterschreitet die 100 h Marke nur im Schlafzimmer) kann dieses System eine kostengünstige Lösung bei fehlender Fensterlüftung sein. Bei Umbauten können zentrale Systeme integriert werden. Die höchsten Kosten (Material, Montage, Unterhalt und Rückbau) für die Kälteerzeugung weist die Kältemaschine mit Hybridkühler auf. Die Kältemaschine wird nur zur Kühlung verwendet, womit die Kosten nicht auf das Heizen und Kühlen aufgeteilt werden können. Multifunktionale Systeme sind erwartungsgemäss günstiger, bedingen aber eine umfassende Sanierung des Altbaus. Die kostengünstigste Lösung ist der Anschluss an ein Fernkältenetz. Das System Luft-/Wasserwärmepumpe hat einen leichten Kostenvorteil gegenüber einer Kühllösung mit Erdwärmesonden oder der Nutzung von Grundwasser als Kühlquelle. Bei einem betriebsbedingten Bedarf zur Regeneration der Erdwärmesonden im Sommer – speziell bei grossen Sondenfeldern – kann eine Reduktion der zugewiesenen Kosten zu dieser Kühllösung ins Auge gefasst werden.

Das teuerste Kälteabgabesystem ist die metallische Kühldecke, gefolgt von der Kapillarrohrmatte und der Fussbodenheizung. Metallische Kühldecken und Kapillarrohrmatten sind ökonomisch nur sinnvoll, wenn sie nach einer Sanierung in Kombination mit einem multifunktionalen Heiz-/Kühlsystem eingesetzt werden können.

Die Betriebskosten aller zentralen Systeme sind im Vergleich zu den Investitionskosten gering. Der Grund liegt in den hohen Leistungszahlen der untersuchten Kälteerzeuger, der geringen jährlichen Betriebszeit und den günstigen Energiepreisen.

Vergleicht man im Altbau die Gesamtkosten der Kälteerzeuger Fernkälte, multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe, Erdwärmesonde und Grundwasser in Verbindung mit der Kälteabgabe über die metallische Kühldecke, erhält man eine Schwankungsbreite von -17% bis +12% vom Mittelwert, für die Kälteabgabe über die Kapillarrohrmatte -21% bis +16%. Durch die hohen Kosten der metallischen Kühldecke dominiert sie die Gesamtkosten mehr, was zu einer geringeren Differenz zwischen den Kühllösungen führt. Die Kühllösung multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe bildet den Mittelwert am nächsten ab.

Die Erstellungskosten, die in Abbildung 11 und Abbildung 13 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [CHF/(m² EBF a)].



3.3.7 Zentrale Systeme Treibhausgasemissionen

Bei multifunktionalen Kühllösungen werden 33% der Treibhausgasemissionen, die für die Erstellung aufgewendet werden, der Kühlung zugewiesen.

Die höchsten Treibhausgasemissionen, bezogen auf die Nutzenergie, weist – wegen der ausschliesslichen Nutzung zur Kühlung – die Kältemaschine mit Hybridkühler auf. Die tiefsten Treibhausgasemissionen resultieren aus der Kühlung mit Fernkälte, Luft-/Wasserwärmepumpe und Grundwasser. Bei der Fernkälte werden die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung der Infrastruktur bis zum Hausanschluss nicht berücksichtigt. Die energetisch aufwendigen Bohrungen der Lösung mit Erdwärmesonden verschlechtert die Bilanz der grauen Treibhausgasemissionen. Bei einem betriebsbedingten Bedarf zur Regeneration der Erdwärmesonden im Sommer – speziell bei grossen Sondenfeldern – kann eine Reduktion der zugewiesenen Treibhausgasemissionen zu dieser Kühllösung ins Auge gefasst werden. Die höchsten Treibhausgasemissionen des Kälteabgabesystems weist die metallische Kühldecke auf, die geringsten die Fussbodenheizung.

Die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb sind für alle zentralen Systeme wegen der hohen Leistungszahlen und der geringen Betriebszeit von untergeordneter Bedeutung. Es wird von einer sachgemässen Wartung der zentralen Systeme ausgegangen und kein Kältemittelverlust berücksichtigt.

Vergleicht man im Altbau die Treibhausgasemissionen der Kälteerzeuger Fernkälte, multifunktionale Luft-/ Wasserwärmepumpe, Erdwärmesonde und Grundwasser in Verbindung mit der Kälteabgabe über die metallische Kühldecke, erhält man eine Schwankungsbreite von -20% bis +44% vom Mittelwert, für die Kälteabgabe über die Kapillarrohrmatte -44% bis +93%. Durch den hohen Anteil der Treibhausgasemissionen der metallischen Kühldecke am Gesamtausstoss, dominiert sie das Ergebnis mehr, was zu einer geringeren Differenz zwischen den Kühllösungen führt. Die grosse Schwankungsbreite wird auch durch die Treibhausgasemissionen bei der Erstellung der zahlreichen Erdwärmesonden ausgelöst. Die Kühllösung multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe bildet den Mittelwert am nächsten ab. Die Wahl der Kühllösung hat einen grossen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen.

Die Treibhausgasemissionen aus dem Verbrauch der Elektrizität basiert auf dem CH-Verbrauchermix mit 0.102 kg CO₂-eq/kWh.

Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, die in Abbildung 11 und Abbildung 13 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [kg CO₂-eq/(m² EBF a].

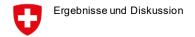
3.3.8 Zentrale Systeme Energie

Der Kühlenergiebedarf (Nutzenergie) der Kühllösungen in Kombination mit der Fensterlüftung ist stark von der maximal akzeptierbaren Innentemperatur abhängig. Aus Tabelle 12 können die Werte für das Medianjahr 2060 und das heisse Jahr 2060 abgelesen werden.

Maximal akzeptierbare Innentemperatur [°C]	Nutzenergie Medianjahr 2060 [kWh/(m² _{EBF} a)]	Nutzenergie heisses Jahr 2060 [kWh/(m² _{EBF} a)]
30°C am Tag (Wohnzimmer), 28°C in der Nacht (Schlafzimmer)	0	0
26°C am Tag (Wohnzimmer), 24°C in der Nacht (Schlafzimmer)	5	6
24°C am Tag (Wohnzimmer), 24°C in der Nacht (Schlafzimmer)	11	12

Tabelle 12: Kühlenergiebedarf (Nutzenergie) der zentralen Kühllösungen in Kombination mit der Fensterlüftung, Standort Basel-Binningen. Mittelwert aus den Kühllösungen (WP) EWS + Kapillarrohrmatte und KM mit Hybridkühler + Kühldecke.

Der Primärenergiebedarf und die daraus entstehenden Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb sind im Vergleich zu den Treibhausgasemissionen aus der Erstellung geringer (siehe Abbildung 11 und Abbildung 13).



3.4 Kühllösungen Neubau

Die Abbildung 12 (Medianjahr 2060) und Abbildung 14 (heisses Jahr 2060) stellen für den Neubau die Überhitzungsstunden, die maximale Innentemperatur im Wohn- und Schlafzimmer, die Investitions-, Betriebs- und Rückbaukosten und die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, dem Betrieb und dem Rückbau für die untersuchten Kühllösungen dar.

3.4.1 Fensterlüftung Überhitzungsstunden, Temperaturen

Die Auswertung für die Kühlung mit der Fensterlüftung zeigt für das Medianjahr 2060 im Wohnzimmer 237 (Basis 26°C) und im Schlafzimmer 149 Überhitzungsstunden (Basis 24°C) auf, die maximale Innentemperatur beträgt dabei 29.6°C respektive 28.4°C. Im heissen Jahr 2060 steigen die Überhitzungsstunden im Wohnzimmer auf 330 Stunden und im Schlafzimmer auf 232 Stunden an, die maximale Innentemperatur beträgt 29.5°C respektive 28.7°C. Die Anzahl der Überhitzungsstunden verändert sich somit vom Medianjahr 2060 zum heissen Jahr 2060 im Wohnzimmer um 39%, im Schlafzimmer um fast 56%. Die maximale Innentemperatur ändern sich dabei wenig, aber die höhere Anzahl der Überhitzungsstunden wirkts sich negativ auf den Komfort aus. Führt man die Berechnungen mit den Klimadaten SIA 2028 (19) durch, die aus der Periode 1984-2003¹6 gebildet werden, resultieren keine Überhitzungsstunden (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10).

Wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt, wird mit der Fensterlüftung die geforderte Innentemperatur von 26°C am Tag (Wohnzimmer) und 24°C in der Nacht (Schlafzimmer) (siehe Abschnitt 5.3 und 5.4) im Medianjahr 2060 während 16% beziehungsweise 20% und im heissen Jahr 2060 während 22% beziehungsweise 32% der Belegungszeit überschritten. Die Fensterlüftung leistet somit einen beachtlichen Beitrag zur Erreichung des Komforts während 70-80% der Belegungszeit. Allein kann sie den Komfort nicht zu 100% sicherstellen. Eine Kompensation einer höheren Innentemperatur, durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Person, wird nicht berücksichtigt (Abbildung 16). Zu beachten ist, dass nicht an allen Gebäudestandorten eine Kühlung über Fensterlüftung möglich ist (Einbruchsicherheit, Schallimmissionen). Ebenso verändert die geforderte Innentemperatur das Kühlvermögen der Fensterlüftung markant. Bei einer maximalen Temperatur von 24°C am Tag reduziert sich das Kühlvermögen auf 33% bzw. 52% der Tagesstunden (siehe Abbildung 9), bei 21°C in der Nacht auf 13% bzw. 26% der Nachtstunden (siehe Abbildung 10). Die erste Prozentzahl entspricht dem heissen Jahr 2060, die zweite Zahl dem Medianjahr 2060.

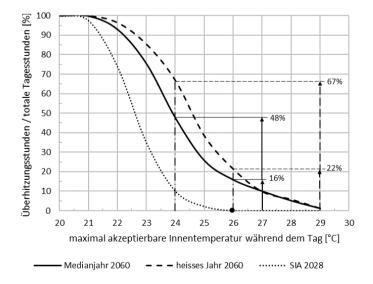


Abbildung 9: Abhängigkeit des Bedarfs einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung von der maximal akzeptierbaren Innentemperatur (Neubau, Wohnzimmer, Tag) für das Medianjahr 2060, das heisse Jahr 2060 und die Periode 1984-2003 gemäss SIA 2028. Periode 01. Juni bis 31. August, Total 1472 Tagesstunden.



In Tabelle 13 ist die nötige Betriebsdauer, für eine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung, in Abhängigkeit der maximal akzeptierbaren Innentemperatur ausgewertet.

Maximal akzeptierbare Temperatur	Grundlage des Temperaturniveaus	Betriebsdauer der zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung während dem Tag	
[°C]		Medianjahr 2060 [%, h]	heisses Jahr 2060 [%, h]
24°C	(+/- 2.0°C) gemäss EN7730 als Mittelwert für eine sitzende und stehende Tätigkeit (0.38 clo, 1.5 met) und den Resultaten aus der epidemiologischen Untersuchung in Abschnitt 5.3.2 (Tmax)	48% 699 h	67% 983 h
26.5°C	SIA 180 fürgekühlte Räume	13% 191 h	15% 221 h
≥ 29°C	SIA 180 für Räume mit natürlicher Lüftung. Temperaturen von 29°C und höher sind ab einem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden von 21.5°C zulässig. Während den heissen Perioden ist diese Bedingung erfüllt.	0% 0 h	0% 0h

Tabelle 13: Abhängigkeit der Betriebsdauer, einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung, für unterschiedliche maximal akzeptierbare Innentemperaturen während dem Tag (Neubau). Periode 01. Juni bis 31. August, Total 1472 Tagesstunden.

Tabelle 13 zeigt, dass bei einer maximal akzeptierbaren Innentemperatur von 24°C – wie sie aus der epidemiologischen Untersuchung hervorgeht (siehe Abschnitt 5.3.2) – die zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung während 48% (Medianjahr 2060) beziehungsweise während 67% (heisses Jahr 2060) des Tages betrieben werden muss. Bei einer maximal akzeptierbaren Temperatur von 26.5°C, wie sie die SIA 180 für gekühlte Räume fordert, reduziert sich die Betriebsdauer auf 13% im Medianjahr 2060 und auf 15% im heisses Jahr 2060. Mit der Temperaturanforderung gemäss SIA 180 für natürlich belüftete Räume ist keine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung nötig. Der Vergleich mit dem zulässigen Temperaturniveau aus der epidemiologischen Untersuchung zeigt jedoch, dass die zulässige maximale Temperatur für natürlich belüftete Räume zu hoch angesetzt ist.

Eine analoge Auswertung für die Nacht ist in Abbildung 10 dargestellt.

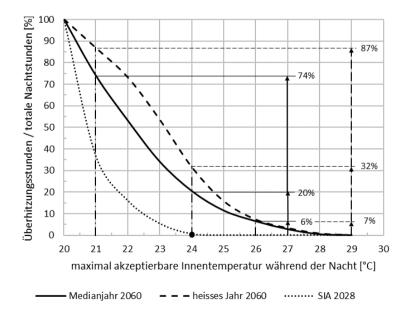


Abbildung 10: Abhängigkeit des Bedarfs einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung von der maximal akzeptierbaren Innentemperatur (Neubau, Schlafzimmer, Nacht) für das Medianjahr 2060, das heisse Jahr 2060 und die Periode 1984-2003 gemäss SIA 2028. Periode 01. Juni bis 31. August, Total 736 Nachtstunden.

In Tabelle 14 ist die nötige Betriebsdauer, für eine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung, in Abhängigkeit der maximal akzeptierbaren Innentemperatur ausgewertet.

Maximal akzeptierbare Temperatur	Grundlage des Temperatumiveaus	Betriebsdauer der zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung während der Nacht	
[°C]		Medianjahr 2060 [%, h]	heisses Jahr 2060 [%, h]
21°C	(+/- 2.5°C) gemäss EN7730 für eine liegende, bedeckte Person (2.1 clo, 0.6 met) und den Resultaten aus der epidemiologischen Untersuchung in Abschnitt 5.3.2	74% 545 h	87% 640 h
24°C	maximal akzeptierbare Schlaftemperatur gemäss Abschnitt 5.4, Wert leicht höher als 21°C + 2.5°C (EN7730)	20% 147 h	32% 236 h
26.5°C	SIA 180 für gekühlte Räume	5% 34 h	5% 39 h
≥ 29°C	SIA 180 für Räume mit natürlicher Lüftung. Temperaturen von 29°C und höher sind ab einem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden von 21.5°C zulässig. Während den heissen Perioden ist diese Bedingung erfüllt.	0%	0% 0

Tabelle 14: Abhängigkeit der Betriebsdauer, einer zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung, für unterschiedliche maximal akzeptierbare Innentemperaturen während der Nacht (Neubau). Periode 01. Juni bis 31. August, Total 736 Nachtstunden.

Tabelle 14 zeigt, dass bei einer maximal akzeptierbaren Innentemperatur von 21°C – wie sie aus der epidemiologischen Untersuchung hervorgeht (siehe Abschnitt 5.3.2) – die zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung während 74% (Medianjahr 2060) beziehungsweise während 87% (heisses Jahr 2060) des Tages betrieben werden muss. Bei einer maximal akzeptierbaren Temperatur von 24°C, wie sie für Schlafräume gemäss Abschnitt 5.4 resultiert, reduziert sich die Betriebsdauer auf 20% im Medianjahr 2060 und auf 32% im heisses Jahr 2060. Bei einer maximal akzeptierbaren Temperatur von 26.5°C, wie sie die SIA 180 für gekühlte Räume fordert, reduziert sich die Betriebsdauer auf 5% im Medianjahr 2060 und im heisses Jahr 2060. Mit der Temperaturanforderung gemäss SIA 180 für natürlich belüftete Räume ist keine zur Fensterlüftung ergänzende Kühllösung nötig. Der Vergleich mit dem zulässigen Temperaturniveau aus der epidemiologischen Untersuchung (Abschnitt 5.3.2) und den Untersuchungen zu den maximal akzeptierbaren Schlaftemperaturen (Abschnitt 5.4) zeigt jedoch, dass die zulässige maximale Temperatur für natürlich belüftete Räume zu hoch angesetzt ist.

3.4.2 Dezentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen

In der Tabelle 15 sind diejenigen dezentralen Kühllösungen dargestellt, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können.

Nutzung	Medianjahr 2060	heisses Jahr 2060
Neubau Unterstützend zur	Fensterlüftung	
Wohnzimmer und Schlafzimmer	Mobiles Kühlgerät ¹⁷ (mittlere Leistungszahl 2.4)	Mobiles Kühlgerät ¹⁷ (mittlere Leistungszahl 2.4)
Nur Schlafzimmer	Bettenkühlung Wearable (Embr Wave)	Bettenkühlung Wearable (Embr Wave)

Tabelle 15: Übersicht der dezentralen Kühllösungen für den Neubau, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können.

Der Standventilator führt zu einer örtlichen Temperaturreduktion von 2-3°C am Tag. In der Nacht ist die Wirkungsweise, wegen des hohen Bedeckungsgrades von 60-70% des Menschen (Anteil der durch das Duvet bedeckten Fläche), stark eingeschränkt (siehe Abbildung 30).



Mobile Kühlgeräte und Split Kühlgeräte sind grundsätzlich in der Lage, auch Innentemperaturen unter 24°C während der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären, zu erreichen. Es muss beachtet werden, dass die Luft bei der Abkühlung entfeuchtet wird (Umluftbetrieb), was möglicherweise zu gesundheitlichen Problemen führen kann. Die Bettenkühlung kann ein Bettenklima herstellen, wie es bei tieferen Innentemperaturen herrscht. Die Asymmetrie zur effektiven Innentemperatur darf aber nicht zu gross sein (Abschnitt 4.5).

3.4.3 Dezentrale Systeme Kosten

Die Aussagen zu den Kosten der dezentralen Systeme im Neubau entsprechen denjenigen des Altbaus (siehe Abschnitt 3.3.3).

Die Erstellungskosten, die in Abbildung 12 und Abbildung 14 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [CHF/(m² EBF a)]. Müssen Geräte während dieser Dauer ersetzt werden, wird dies in der Berechnung berücksichtigt.

3.4.4 Dezentrale Systeme Treibhausgasemissionen

Die Aussagen zu den Treibhausgasemissionen der dezentralen Systeme im Neubau entsprechen denjenigen des Altbaus (siehe Abschnitt 3.3.4).

Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, die in Abbildung 12 und Abbildung 14 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [kg CO₂-eq/(m² EBF a)]. Müssen Geräte während dieser Dauer ersetzt werden, wir dies in der Berechnung berücksichtigt.

3.4.5 Zentrale Systeme Überhitzungsstunden und Temperaturen

In Tabelle 16 sind diejenigen zentralen Kühllösungen dargestellt, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können.

Nutzung	Medianjahr 2060	heisses Jahr 2060				
Neubau	Neubau					
Unterstützend zur	Fensterlüftung					
Wohnzimmer	Kälteerzeugung:	Kälteerzeugung:				
und Schlafzimmer	Fernkälte, Hybridkühler, Kältemaschine mit Hybridkühler ¹⁷ , Luft-/Wasserwärmepumpe ¹⁷ , Erdwärmesonden und Grundwasser	Fernkälte, Kältemaschine mit Hybridkühler ¹⁷ , Luft- /Wasserwärmepumpe ¹⁷ , Erdwärmesonden und Grundwasser				
	Kälteabgabe:	Kälteabgabe:				
	Metallische Kühldecke, Kapillarrohrmatte und TABS (ausser beim Hybridkühler), Fussbodenheizung optimiert (höherer Wassermassenstrom, Reduktion Rohrabstand und gut wärmeleitende Bodenbeläge)	Metallische Kühldecke, Kapillarrohrmatte und TABS, Fussbodenheizung optimiert (höherer Wassermassenstrom, Reduktion Rohrabstand und gut wärmeleitende Bodenbeläge)				
Nur	Kälteerzeugung:	Kälteerzeugung:				
Schlafzimmer	Wie oben	Wie oben				
	Kälteabgabe:	Kälteabgabe:				
	Wie oben, zusätzlich TABS und Fussbodenheizung (ausser beim Hybridkühler)	Fussbodenheizung				

Tabelle 16: Übersicht der Kombinationen aus Kälteerzeugung und Kälteabgabe für den Neubau, mit denen 100 Überhitzungsstunden unterschritten werden können.

Die in Abbildung 12 und Abbildung 14 dargestellten Resultate zeigen, dass Systeme mit einer erneuerbaren Energiequelle wie Seewasser (Fernkälte), Luft (Hybridkühler), Geocooling (Regeneration von Erdwärmesonden) und Grundwasser die Innentemperatur in Kombination mit einem effizienten Kälteabgabesystem (Metallische Kühldecke, Kapillarrohrmatte und TABS (ausser beim Hybridkühler)) sowohl im Wohn- als auch im Schlafzimmer unterhalb der Marke von 100 Überhitzungsstunden halten

können. Dies gilt für das Medianjahr 2060. Im heissen Jahr 2060 kann der Hybridkühler, wegen des Einflusses der noch höheren Aussentemperaturen, die Kühlleistung nicht mehr erbringen.

Die maximale Innentemperatur im Wohnzimmer beträgt 26.0-27.0°C, im Schlafzimmer 24.9-25.6°C für das Medianjahr 2060 und 26.0-27.0°C (Wohnzimmer) beziehungsweise 24.7-25.2°C (Schlafzimmer) für das heisse Jahr 2060. Gleich verhalten sich mechanische Kühlanlagen, wie die Kältemaschine mit Hybridkühler und die als Kältemaschine eingesetzte Luft-/Wasserwärmepumpe. Der Nachteil der zwei letztgenannten Anlagentypen ist, dass die dem Raum entzogene Kühlenergie und die für den Kompressorbetrieb benötigten Elektrizität in Form von Wärme an die äussere Umgebung abgegebene wird. Dadurch wird die Umgebung erwärmt, was zu mehr Kühlbedarf und einem wiederum erhöhten Wärmetransport in die Umgebung führt. Das System schaukelt sich auf und es können Hitzeinseln entstehen.

Mit der Kälteabgabe über die Fussbodenheizung werden die Überhitzungsstunden im Vergleich zur reinen Fensterlüftung um 50-60% reduziert. Damit kann die Marke von 100 Überhitzungsstunden nur im Schlafzimmer erreicht werden. Eine Erhöhung des Wassermassenstroms, die Reduktion des Abstandes zwischen den Rohren und ein gut wärmeleitender Bodenbelag kann Abhilfe schaffen.

Die untersuchten zentralen Kühllösungen sind nicht in der Lage, Innentemperaturen weit unter 24°C während der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären (z.B. 21°C), zu erreichen. Die Kühlleistung ist entweder durch den nötigen Abstand der Kühlwassertemperatur zum Taupunkt der Luft oder durch die erreichbare Kühlwassertemperatur aus der Kühlquelle limitiert.

3.4.6 Zentrale Systeme Kosten

Die höchsten Kosten (Material, Montage, Unterhalt und Rückbau) für die Kälteerzeugung weist die Kältemaschine mit Hybridkühler auf. Die Kältemaschine wird nur zur Kühlung verwendet, womit die Kosten nicht auf das Heizen und Kühlen aufgeteilt werden können. Multifunktionale Systeme sind erwartungsgemäss günstiger. Die kostengünstigste Lösung ist in diesem Fall der Anschluss an ein Fernkältenetz. Das Systeme Luft-/Wasserwärmepumpe hat einen leichten Kostenvorteil gegenüber einer Kühllösung mit Erdwärmesonden oder der Nutzung von Grundwasser als Kühlguelle.

Die höchsten Kosten für das Abgabesystem weist die metallische Kühldecke auf, gefolgt von TABS, Kapillarrohrmatte und der Fussbodenheizung.

Die Betriebskosten aller zentralen Systeme sind im Vergleich zu den Investitionskosten gering. Der Grund liegt in den hohen Leistungszahlen der untersuchten Kälteerzeuger, der geringen jährlichen Betriebszeit und den günstigen Energiepreisen.

Vergleicht man im Neubau die Gesamtkosten der Kälteerzeuger Fernkälte, multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe, Erdwärmesonde und Grundwasser, in Verbindung mit der Kälteabgabe über die metallische Kühldecke, erhält man eine Schwankungsbreite von -1% bis +8% vom Mittelwert, für die Kälteabgabe über die Kapillarrohrmatte -14% bis +14%. Durch die hohen Kosten der metallischen Kühldecke dominiert sie die Gesamtkosten mehr, was zu einer geringeren Differenz zwischen den Kühllösungen führt. Die Kühllösung Fernkälte bildet den Mittelwert am nächsten ab.

Die Erstellungskosten, die in Abbildung 12 und Abbildung 14 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [CHF/(m² EBF a)]. Bei multifunktionalen Kühllösungen werden 33% der Kosten für die Kälteerzeugung der Kühlung zugewiesen. Die Kosten für die Kälteabgabe werden für alle Systeme zu 33% der Kühlung zugewiesen.



3.4.7 Zentrale Systeme Treibhausgasemissionen

Die Aussagen zu den Treibhausgasemissionen der zentralen Systeme im Neubau entsprechen denjenigen des Altbaus (siehe Abschnitt 3.3.7).

Vergleicht man im Neubau die Treibhausgasemissionen der Kälteerzeuger Fernkälte, multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe, Erdwärmesonde und Grundwasser, in Verbindung mit der Kälteabgabe über die metallische Kühldecke, erhält man eine Schwankungsbreite von -9% bis +14% vom Mittelwert, für die Kälteabgabe über die Kapillarrohrmatte -31% bis +52%. Durch den hohen Anteil der Treibhausgasemissionen der metallischen Kühldecke am Gesamtausstoss dominiert sie das Ergebnis mehr, was zu einer geringeren Differenz zwischen den Kühllösungen führt. Die Schwankungsbreite wird auch durch die Treibhausgasemissionen, die bei der Erstellung der Erdwärmesonden entsteht, beeinflusst. Die Kühllösung multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe bildet den Mittelwert am nächsten ab. Die Wahl der Kühllösung hat einen grossen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen.

Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, die in Abbildung 12 und Abbildung 14 dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahre aufgeteilt [kg CO₂-eq/(m² EBF a)]. Bei multifunktionalen Kühllösungen werden 33% der Erstellungskosten der Kühlung zugewiesen.

3.4.8 Zentrale Systeme Energie

Der Kühlenergiebedarf (Nutzenergie) der Kühllösungen in Kombination mit der Fensterlüftung ist stark von der maximal akzeptierbaren Innentemperatur abhängig. Aus Tabelle 17 können die Werte für das Medianjahr 2060 und das heisse Jahr 2060 abgelesen werden.

Maximal akzeptierbare Innentemperatur [°C]	Nutzenergie Medianjahr 2060 [kWh/(m² _{EBF} a)]	Nutzenergie heisses Jahr 2060 [kWh/(m² _{EBF} a)]
29°C am Tag (Wohnzimmer), 28°C in der Nacht (Schlafzimmer)	0	0
26°C am Tag (Wohnzimmer), 24°C in der Nacht (Schlafzimmer)	4	5
24°C am Tag (Wohnzimmer), 24°C in der Nacht (Schlafzimmer)	10	12

Tabelle 17: Kühlenergiebedarf (Nutzenergie) der zentralen Kühllösungen in Kombination mit der Fensterlüftung, Standort Basel-Binningen. Mittelwert aus den Kühllösungen (WP) EWS + Kapillarrohrmatte und KM mit Hybridkühler + Kühldecke.

Der Primärenergiebedarf und die daraus entstehenden Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb sind im Vergleich zu den Treibhausgasemissionen aus der Erstellung geringer (siehe Abbildung 12 und Abbildung 14).

3.5 Anlagendimensionierung

In Abschnitt 2.4 sind die den Simulationen zu Grunde gelegten Bewertungstemperaturen und der Umgang mit der maximalen Kühlleistung beschrieben.

Die Auswertungen für den Altbau (Abbildung 11 und Abbildung 13) zeigen, dass die Überhitzungsstunden für die Kühllösungen mit einer multifunktionalen Luft-/Wasserwärmepumpe, Erdwärmesonden und Grundwasser, mit der Kälteabgabe über eine metallische Kühldecke oder Kapillarrohrmatte, kaum voneinander abweichen. Der in dem untersuchten Gebäude auch nach einem Umbau immer noch hohe Heizleistungsbedarf führt zu einer ausreichend dimensionierten Heizinfrastruktur, die multifunktional zum Kühlen genutzt wird. Bei der Nutzung der Fussbodenheizung zur Kühlung (Dimensionierung auf Basis der Heizleistung) zeigt sich die Limite dieses Systems. Diese Erkenntnis ist auch aus der Betrachtung der maximal erreichten Innentemperatur in Abbildung 11 ersichtlich, wo eine Differenz zur Kapillarrohrmatte von 0.6°C in der Nacht, 1.4°C am Tag, zur metallischen Kühldecke von 1°C in der Nacht und 2°C am Tag entsteht. Um die Limitierung der Fussbodenheizung für Kühlzwecke zu reduzieren, muss der Massenstrom erhöht, der Rohrabstand verringert und der thermische Widerstand des Fussbodenbelages reduziert werden (siehe Abschnitt 14.4.11).

Im Neubau (Abbildung 12, Abbildung 14) ist eine differenzierte Sicht nötig. Die mit der Kühlleistung des Gebäudes dimensionierten Kühllösungen Fernkälte und Kältemaschine weisen für das Medianjahr 2060 die tiefste Anzahl an Überhitzungsstunden auf. Im Gegensatz dazu weisen die auf Basis der Heizleistung mit dem heutigen Klima dimensionierten Kühllösungen, wie die multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe, Erdwärmesonde und Grundwasser, eine bedeutend höhere Anzahl von Überhitzungsstunden auf. Dies vor allem für das heisse Jahr 2060. Die Dimensionierung von multifunktionalen Kühllösungen auf der Grundlage der Heizleistung führt in den betrachteten Fällen zu einer Unterdimensionierung. Diese Tatsache wird auch beim Betrachten der maximal erreichten Innentemperaturen der Kühllösungen in der Abbildung 12 und Abbildung 14 erkennbar.

Er wird vorgeschlagen, für den Alt- und Neubau sowohl den Heiz- als auch den Kühlleistungsbedarf des Gebäudes mit den auf das zukünftige Klima ausgerichteten Klimadaten (in vorliegendem Fall Medianjahr 2060) zu ermitteln und zu prüfen, aus welchem Bedarf die höhere Anforderung resultiert.

Die benötigte Kühlleistung lässt sich am besten mit thermischen Simulationsberechnungen ermitteln. Dabei ist es sinnvoll, nicht den kurzzeitigen Spitzenkühlleistungsbedarf für die Systemauslegung zu verwenden, sondern diesen schrittweise so zu reduzieren, dass die festgelegte Innentemperatur noch erreicht werden kann. In den Berechnungen für diese Untersuchung wurde der Spitzenkühlleistungsbedarf, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, für die Anlagendimensionierung um 20% reduziert. Wie hoch die Leistungsreduktion sein kann, hängt vor allem von der thermischen Masse des Gebäudes, deren Erreichbarkeit für die thermischen Wärmelasten (gut wärmeleitende Oberflächenbeläge) und dem Kälteabgabesystem ab.

Um sicherzustellen, dass die Innentemperaturen sowohl im Medianjahr 2060 als auch im heissen Jahr 2060 im vereinbarten Bereich bleiben, ist es ratsam, für beide Jahre eine Simulationsberechnung durchzuführen.

Bei der Nutzung von Erdsondenfeldern zur Kühlung (Regeneration) ist zu bedenken, dass während der Kühlphase eine grosse Leistungsdichte in einer kurzen Zeit aus dem Erdreich bezogen wird. Damit stellt sich eine erhebliche Temperaturdifferenz zwischen dem Kühlmedium und der Erdreichtemperatur ein, was die Nutzung einschränken kann. Es soll projektspezifisch geprüft werden, ob durch die Regeneration der Erdwärmesonden die nötige Kühlleistung erbracht werden kann.



3.6 Ergänzende Angaben zu den Auswertungen Alt-/Neubau

Abbildung 11 bis Abbildung 14 fassen die Ergebnisse der Simulationsberechnungen für die Schlüsselindikatoren Überhitzungsstunden, maximale Innentemperatur im Wohn- und Schlafzimmer, Erstellungs-, Betriebs- und Rückbaukosten und die Treibhausgasemissionen für die Erstellung und den Betrieb grafisch zusammen. Um das Lesen und Interpretieren der Abbildungen zu erleichtern, sind sie auf der rechten Seite mit Indizes versehen. Diese weisen auf die in der Tabelle 18 zusammengefassten Annahmen in den Berechnungen hin.

1			
	Die Fensterlüftung ist in allen Kühllösungen als Basisvariante berücksichtigt. Eine Kompensation einer höheren Innentemperatur, durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Person, wird nicht berücksichtigt (Abbildung 16). Die Bewertung der Kühllösungen erfolgt für eine Innentemperatur von 26°C am Tag (Wohnzimmer) und von 24°C während der Nacht (Schlafzimmer).		
2	Durch das Entweichen von Kältemitteln aus Kühlgeräten in die Atmosphäre tragen die Kältemittel stark zur Klimaerwärmung bei. Die Schädlichkeit ist vom Global Warming Potential (GWP) des Kältemittels abhängig. Das Kältemittel CO ₂ weist ein GWP100 von 1, R290 (Propan) von 3 und R410A von 2088 (seit 01. Januar 2020 für mobile Kühlgeräte verboten) auf. Die Wahl eines umweltfreundlichen Kältemittels und einer hohen Leistungszahl ist zentral.		
3	Monofunktionaler Betrieb: Kosten und Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb zu 100% der Kühlung zugewiesen		
4	Zum Beispiel Heizen mit Holz oder Fernwärme ohne Kühlmöglichkeit		
5	Ergänzender Fernkälteanschluss		
6 •	Die dem Raum entzogene Kühlleistung wird zusammen mit der Kompressorleistung an die Aussenluft abgegeben. Das erhöht die Aussenlufttemperatur und fördert den Hitzeinseleffekt.		
7	Nicht jedes Kälteabgabesystem kann die gleiche Kühlleistung erbringen (zum Beispiel die Fussbodenheizung oder der Radiator im Altbau), es kann der limitierende Faktor sein. Daraus resultieren höhere Überhitzungsstunden und eine geringere Betriebsenergie. Die Grösse der Kälteerzeugung wurde ebenfalls an die Abgabeleistung angepasst. Daraus resultieren tiefere Kosten und Treibhausgasemissionen.		
8	Fussbodenheizung und Radiatoren bestehend		
9	Multifunktionaler Betrieb: Kosten und Treibhausgasemissionen für Erstellung zu 33% und für Betrieb zu 100% der Kühlung zugewiesen		
10	Minimale Anlagengrösse von 100 kW für den Hybridkühler nötig		
11	Das Verputzen der Kapillarrohrmatte erfolgt bauseits und ist in den Kosten und den Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigt.		
12	Kosten und Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb der Kälteerzeugung (monofunktional) zu 100% der Kühlung zugwiesen, für Erstellung der Kälteabgabe (multifunktional) zu 33% der Kühlung zugewiesen		
13	Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch die Erhöhung des Wassermassenstroms, Verringerung des Rohrabstandes und gut wärmeleitende Bodenbeläge		
14	Am Tag ist die Bettenkühlung nicht in Betrieb		
15	Erdwärmesonden, speziell grosse Erdwärmesondenfelder müssen im Sommer durch den Eintrag von Wärme wieder regeneriert werden. Damit ist der Wärmeeintrag im Sommer aus der Raumkühlung oder einer anderen Energiequelle systembedingt nötig. Eine Reduktion der Zuweisung der Kosten und der Treibhausgasemissionen für die Erstellung könnte fallweise in die Überlegungen einbezogen werden (siehe 8).		
16	Die Nutzungsdauer beträgt 20 Jahre (Diagrammteil Kosten und Treibhausgasemissionen). Geräteerneuerung innerhalb dieser Dauer werden berücksichtigt.		
%	Prozentualer Anteil der Stunden mit Temperaturen über 26°C am Tag (Wohnzimmer) und 24°C in der Nacht (Schlafzimmer) bezogen auf die Belegungszeit am Tag (1472 h) beziehungsweise in der Nacht (736 h)		
	Fett markierte Nummer: Erklärung gilt für die Kälteerzeugung und alle zugehörigen Kälteabgabesysteme		

Tabelle 18: Ergänzende Angaben zur Interpretation der Abbildung 11 bis Abbildung 14.

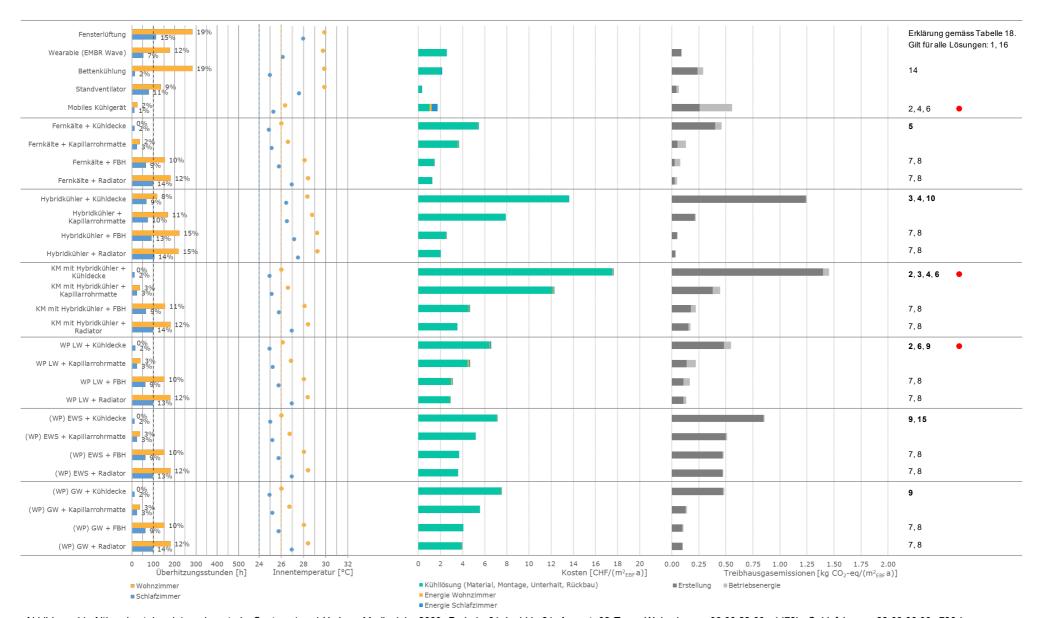


Abbildung 11: Altbau bestehend (nur dezentrale Systeme) und Umbau, Medianjahr 2060. Periode 01. Juni bis 31. August, 92 Tage; Wohnzimmer 06:00-22:00, 1472h; Schlafzimmer 22:00-06:00, 736 h

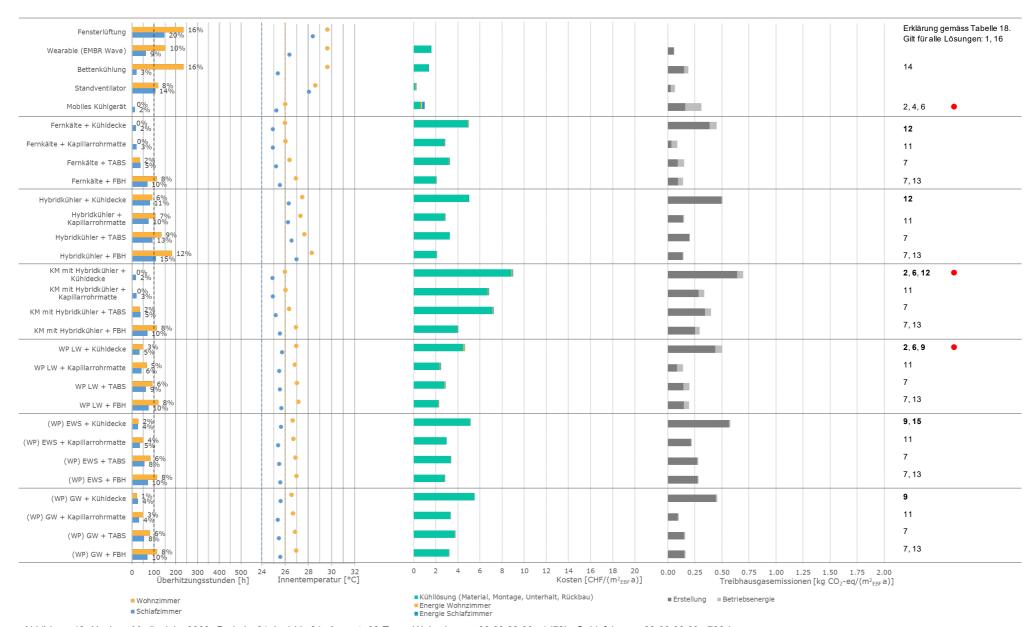


Abbildung 12: Neubau Medianjahr 2060. Periode 01. Juni bis 31. August, 92 Tage; Wohnzimmer 06:00-22:00, 1472h; Schlafzimmer 22:00-06:00, 736 h

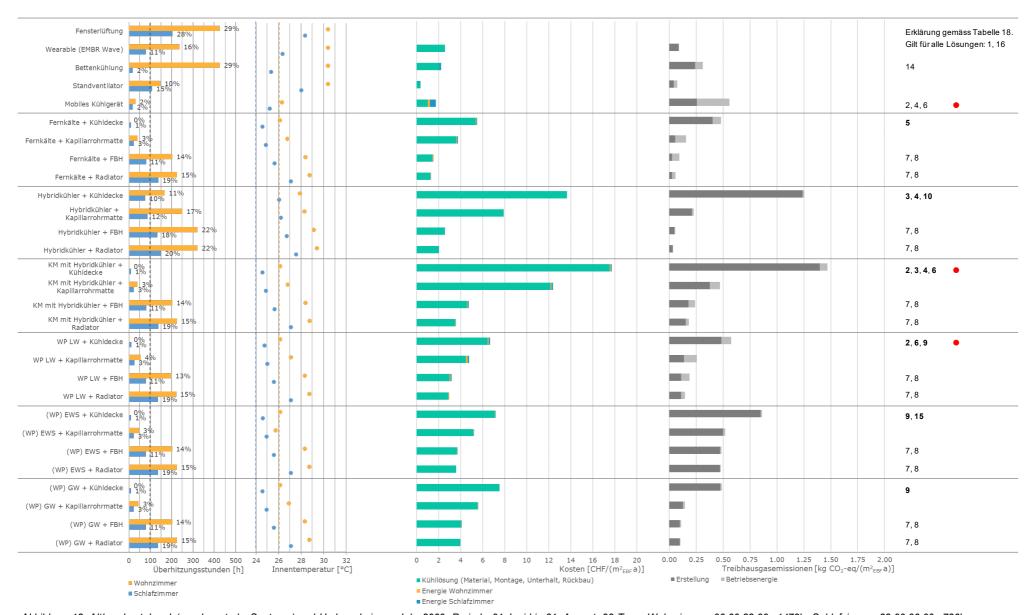


Abbildung 13: Altbau bestehend (nur dezentrale Systeme) und Umbau, heisses Jahr 2060. Periode 01.Juni bis 31. August, 92 Tage; Wohnzimmer 06:00-22:00, 1472h; Schlafzimmer 22:00-06:00, 736h

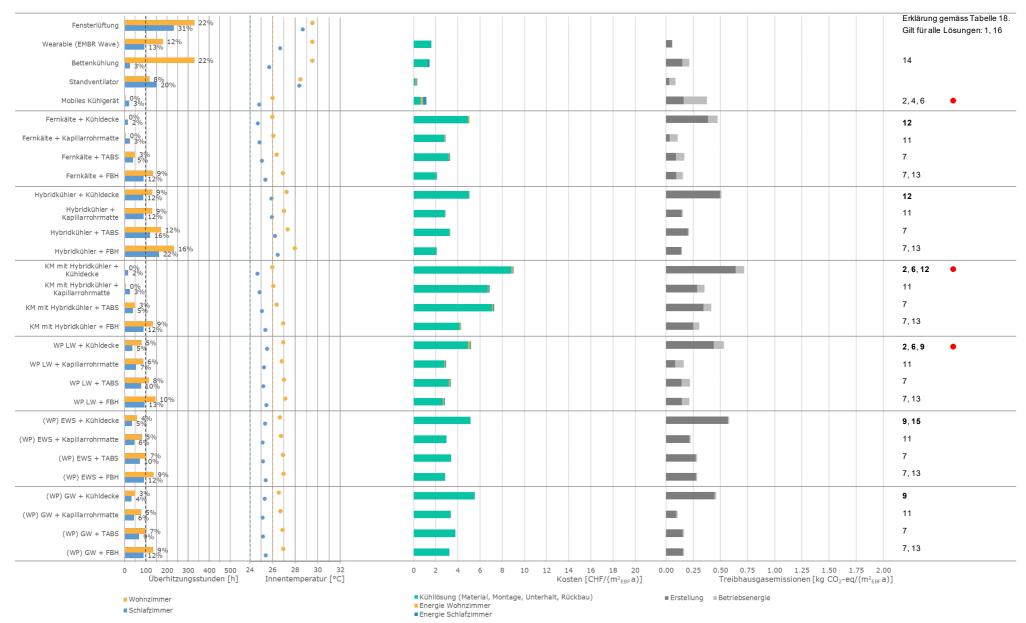


Abbildung 14: Neubau heisses Jahr 2060. Periode 01. Juni bis 31. August, 92 Tage; Wohnzimmer 06:00-22:00, 1472h; Schlafzimmer 22:00-06:00, 736 h



4 Personenbezogene Kühlung, Potential und technische Lösungen

Der Komfort soll für den Menschen auch während Hitzewellen und hohen Aussentemperaturen in einem erträglichen Mass gehalten werden – der Mensch steht im Zentrum. Aus dieser Sichtweise stellt sich die Frage, ob es nicht Möglichkeiten gibt, dem Menschen in seinem nahen räumlichen Umfeld einen hohen Komfort zu gewährleisten, ohne den ganzen Raum kühlen zu müssen.

Eine umfassende Literaturrecherche zeigt drei Typen von lokalen Kühlsystemen: Ventilatoren im Nahbereich der Person, auf dem Körper tragbare Kühlelemente und Kühlsysteme für Bettflächen. Die grössten Anstrengungen für die Untersuchung und Anwendung von personennahen Kühllösungen sind in China zu erkennen. Die hauptsächlichen Beweggründe sind der steigende Einsatz von Raumkühlgeräten, der damit verbundene hohe Energieverbrauch und die Überlastung der Elektrizitätsinfrastruktur sowie Innentemperaturen von über 30°C. Ähnliche Herausforderungen stellen sich auch für die Schweiz.

Ventilatoren in Nahbereich der Person	Auf dem Körper tragbare Kühlelemente	Kühlung von Bettflächen
	Embr Wave 1 (www.embrlabs.com)	Schlafsack mit integrierten Kühlrohren (Prototyp HSLU-IGE)
Nutzung Tag, Nacht: eingeschränkter Zugang der Luft zur warmen Oberfläche des Menschen (abgedeckt mit einer Bettdecke) was die Kühlwirkung stark reduziert.	Nutzung Tag und Nacht	Nutzung Tag: zur Kühlung von Sitzflächen, Nacht

Tabelle 19: Typen von personennahen Kühllösungen.

4.1 Ventilatoren im Nahbereich der Person

Der Wärmetransport des Menschen an die Umgebung findet über Konvektion, Strahlung und Verdunstung (Schwitzen) statt. Die Konvektion beschreibt den Wärmetransport zwischen der Oberfläche des Menschen und der ihn umgebenden Luft. Der Strahlungsaustausch findet zwischen der Oberfläche des Menschen und den ihn umschliessenden Flächen statt. Beim konvektiven Wärmetransport unterscheidet man zwischen freier und erzwungener Strömung. Freie Strömung wird durch Temperaturund Dichteunterschiede hervorgerufen. Erzwungene Strömung wird zum Beispiel durch einen Ventilator oder Wind erzeugt. Die damit veränderte Luftgeschwindigkeit an der Haut erhöht den Wärmetransport bei gleicher Raumlufttemperatur. Die «gefühlte» Temperatur ist also tiefer als die effektive Raumlufttemperatur. Yang et al. (24) untersuchte den Kühleffekt von Standventilatoren bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten und Raumlufttemperaturen.



Abbildung 15 zeigt, dass die Kühlwirkung des Ventilators mit zunehmender Lufttemperatur abnimmt. Dies kommt durch den Effekt der reduzierten Temperaturdifferenz zwischen der Luft- und der Oberflächentemperatur des Körpers zustande.

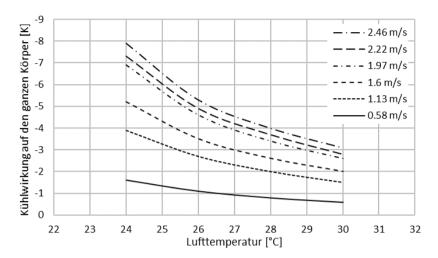


Abbildung 15: Kühlwirkung eines Standventilators auf den Menschen gemäss Yang et al. (24). Abstand 1m, ohne Schwitzen.

Geht man von einer maximalen Luftgeschwindigkeit von 1 m/s aus (SIA 180, 0.8 m/s, ASHRAE 55, 1.2 m/s), kann mit einer Kühlwirkung zwischen 1.5 K (30°C) bis 3 K (25°C) gerechnet werden. Mit einer Verdoppelung der Luftgeschwindigkeit kann nahezu eine Verdoppelung des Kühleffektes erreicht werden. Wie eine Luftgeschwindigkeit von 2 m/s oder ca. 2 Bft (Beaufort) – was als leichte Brise bezeichnet wird – wahrgenommen wird, ist von Person zu Person unterschiedlich. Lokal aufgestellte Ventilatoren leisten aber auf jeden Fall einen Beitrag zur Verbesserung des Komforts während den heissen Sommerperioden am Tag. In der Nacht ist die Wirkung von Ventilatoren zur Erhöhung der lokalen Luftgeschwindigkeit am Menschen durch die Abdeckung der Körperoberfläche mit einer Decke (59-67% siehe Abbildung 30) eingeschränkt und auch die Empfindlichkeit für Zugserscheinungen ist höher.

In der SIA 180/EN 7730 wird beschrieben, welche Luftgeschwindigkeit erforderlich ist, um eine erhöhte Temperatur auszugleichen. Die Abbildung 16 ist für einen Temperaturanstieg über 26°C, einer Sommerbekleidung (0.5 clo) und einer sitzenden Tätigkeit (1.2 met) berechnet.

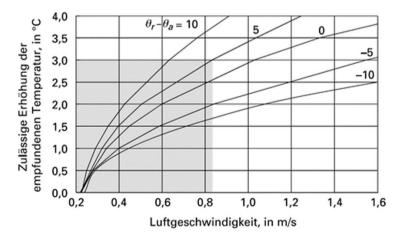


Abbildung 16: Berechnete Erhöhung der empfundenen Temperatur in Funktion der Luftgeschwindigkeit (Basis 26°C, 0.2 m/s), θ: Strahlungstemperatur, θa: Lufttemperatur, der graue Bereich gibt den Grenzwert für eine leichte sitzende Tätigkeit an (0.5 clo, 1.2 met), Quelle: SIA 180:2014, EN 7730, EN 15251, ASHRAE Standard 55.



Bei einer Luftgeschwindigkeit von 1 m/s und gleicher Strahlungs- und Lufttemperatur ergibt sich aus Abbildung 16 eine zulässige Erhöhung der empfundenen Temperatur um 3°C, also 29°C. Die Daten für die Abbildung 16 basieren auf einer theoretischen Berechnung mit dem Standard Effective Temperature Model (SET) des ASHRAE Standard 55. Das SET-Modell verwendet eine thermophysiologische Simulation des menschlichen Körpers. Die Simulation reduziert eine beliebige Kombination von Variablen der realen Umgebung und der Person auf die Temperatur einer imaginären Standardumgebung, in der der Hautwärmeverlust des Bewohners demjenigen der Person in der tatsächlichen Umgebung entspricht.

Der Vergleich zwischen den Messungen von Yang et al. (Abbildung 15) und dem berechneten Wert aus dem Modell des ASHRAE Standard 55 (Abbildung 16) zeigt, dass der berechnete Kühleffekt (3°C) doppelt so hoch ausfällt wie der gemessene Effekt (1.5°C). Die Differenz zwischen der Berechnung und der Messung thematisiert Yang et al. in (24) und schlägt eine Anpassung des Berechnungsverfahrens vor.

Die zulässige Erhöhung der empfundenen Temperatur aus Abbildung 16 kann grundsätzlich für Ventilatoren und offene Fenster angewendet werden. Auf Grund der Unsicherheit bezüglich der Genauigkeit von Abbildung 16 (Überschätze Wirkung) wird in der Bewertung der Fensterlüftung kein Effekt durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit berücksichtigt. Beim Standventilator kommen die Werte aus Abbildung 15 zur Anwendung.



4.2 Auf dem Körper tragbare Kühlflächen

Der Mensch hält sich seinen individuellen Wärmehaushalt, in Anhängigkeit des Aktivitätsgrades, in erster Linie über die Bekleidung in einem komfortablen Bereich. Das Tragen von Stoffen als Dämmschichten ist alltäglich und akzeptiert. Basierend auf den Untersuchungen von Fanger (8) (Abbildung 30) besteht bei einer sitzenden Tätigkeit und einer empfundenen Temperatur über 23°C (+/- 2°C) für ein Grossteil der Personen das Bedürfnis, die vollflächige Bekleidung zu reduzieren, um mit Kurzarmbekleidung und reduzierter Beinbekleidung auch bei 26°C (+/-1.5°C) die Komfortbedürfnisse noch befriedigen zu können. In der Nacht tritt das Bedürfnis nach einer kühlenden Wirkung, speziell am Kopf und den Armen, schon ab ca. 21°C (+/- 2.5°C) auf. Anstelle des Stoffes als Dämmschicht ist im Sommerfall ein Element gefragt, dass dem Körper direkt über die Haut Wärme entzieht. Bekannte Techniken sind nasse Tücher, die auf die Körperfläche gelegt werden. Das Wasser, das verdunstet, entzieht dem Körper Wärme und kühlt diesen. Eine weitere temperatursensible Stelle ist der Bereich. wo die Pulsadern vom Unterarm in die Hand führen und sehr nahe an der Hautoberfläche liegen. Dieser Teil wird im Winter vielfach geschützt, um einen übermässigen Wärmeabtransport zu verhindern. Es stellt sich die Frage, ob der Bereich der Pulsadern auch zur Kühlung genutzt und individuell konditioniert werden kann. Dies hätte den Vorteil, dass Personen die Temperatur an ihre individuellen Komfortbedürfnisse anpassen könnten. Gemäss den Untersuchungen von Arens et al. (25) wird das Gesamtempfinden bezüglich des thermischen Komforts der Person bei Hitze von der Empfindung an der wärmsten Stelle beeinflusst, weshalb eine lokale, kleinflächige Kühlung des Körpers überhaupt funktionieren kann

Im Rahmen eines Designwettbewerbs des renommierten Massachusetts Institute of Technology (MIT) im Jahr 2013 wurde ein Prototype für ein kühlendes und heizendes Armband entwickelt (26), das schliesslich 2017 durch den MIT-Spin-Off Embr Labs kommerzialisiert wurde. Das Heiz-/Kühlelement ist ein Peltier-Element. Der Peltier-Effekt basiert auf der Grundlage von zwei Halbleitern, die ein unterschiedliches Energieniveau aufweisen. Durch das Anbringen eines elektrischen Stroms wird die eine Seite des Peltier-Elementes kalt die andere warm. Es besteht eine Analogie zum Kältemittelkreislauf. mit einer kalten Seite (Verdampfer), dem Kompressor wo elektrische Energie zugeführt wird und der warmen Seite, dem Kondensator. Peltier-Elemente zum Kühlen sind im englischen Sprachraum unter dem Begriff «Thermoelectric Cooler (TEC)» bekannt. Der Nachteil von Peltier-Elementen ist die tiefe Leistungszahl, die unterhalb von eins liegt. Deshalb ist bis dato ein Einsatz nur im kleinen Leistungsbereich sinnvoll. Das durch Embr Labs entwickelte Element, das als Personal Comfort System (PCS) bezeichnet wird, wird an der Innenseite des Handgelenkes getragen. Die Stromversorgung erfolgt über eine Lithiumionen Batterie. Das Peltier-Element des PCS ist durch eine Keramikplatte von 6.25 cm² mit der Haut und auf der Aussenseite über eine Aluminiumabdeckung mit der Umgebung verbunden. Die Auswahl ob geheizt oder gekühlt werden soll und mit welcher Intensität, wird durch einen Drücker auf dem Gehäuse eingestellt. Das PCS erzeugt einen wellenförmigen Energiestrom und beeinflusst damit die Hauttemperatur. Der wellenförmige Energiestrom ist für die Wirkung des Elementes von zentraler Bedeutung. Würde die Kühlung dauerhaft angelegt, würde das Empfinden der kühlenden Wirkung verschwinden. Ein ähnliches Phänomen wird beim Händewaschen oder Duschen mit kaltem Wasser spürbar. Nach kurzer Zeit stellt sich der Körper auf die Wassertemperatur ein und das Empfinden von Kälte verschwindet.

Die Wirkung des PCS wurde am Center for the Build Environment der University of California Berkeley untersucht. Nach einer ersten Studie mit 23 HochschulabsolventInnen wurde eine erweiterte Studie mit 26 Frauen und 23 Männern durchgeführt. Die Studie von Wang et al. (27) ermittelt ein «Correctiv Power (CP)» für die Anwendung zur Kühlung. CP quantifiziert die Fähigkeit des PCS, das thermische Empfinden der Testpersonen in Richtung neutral – in einer nicht-neutralen thermischen Umgebung – zu verschieben. CP wird meist in eine effektive Temperaturdifferenz umgerechnet, die die Fähigkeit des Systems angibt, die gefühlte Temperatur in Richtung der thermisch neutralen Temperatur zu korrigieren. In dieser Form ist CP die Differenz zwischen zwei Umgebungstemperaturen, bei denen das gleiche thermische Empfinden erreicht wird – eine ohne PCS (die Referenzbedingung) und eine mit PCS im Einsatz.



Die Ergebnisse der Studie von Wang et al. (27) sind in Abbildung 17 dargestellt. Sie untersucht zwei Gruppen von Probanden, die «Cool population» und die «Warm population». Probanden, die die thermische Umgebung kühler als neutral empfanden und eine wärmere Umgebung bevorzugten, werden als «Cool Population» bezeichnet. Probanden, die die thermische Umgebung wärmer als neutral empfanden und eine kühlere Umgebung bevorzugten, werden als warme Population bezeichnet.

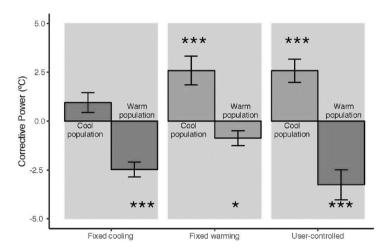


Abbildung 17: Correctiv Power von Embr Wave, auf den ganzen Körper bezogen, nach 3 Minuten konstanter Kühlung (Fixed cooling), konstanter Erwärmung (Fixed warming) oder benutzergesteuertem Betrieb (User-controlled). Dargestellt ist die warme und die kühle Population. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an. Die statistische Signifikanz wurde in der Studie mit einem zweiseitigen T-Test geprüft. * p-Wert zwischen 0.01 und 0.05: significant; ** p-Wert zwischen 0.001 und 0.01: very significant; p-Wert unter 0.001: highly significant. Quelle: Abbildung aus Wang et al. (27).

Für den Kühlfall sind die Szenarien «Fixed cooling» und «User-controlled» für die «Warm population» von Bedeutung. Gemäss Abbildung 17 wird ein CP zwischen 2.5 und 3.3 °C erreicht.

In Abbildung 18 ist CP für die Anwendungsdauer der Kühlung von 45 min dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich das Empfinden der Testpersonen bezüglich CR während der Periode verändert hat. Im Durchschnitt liegt CP bei 2.3°C.

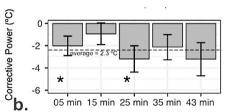


Abbildung 18: Correctiv Power von Embr Wave für eine Kühldauer von 45 Minuten. Quelle: Abbildung aus Wang et al. (27), Fig. 7 rechts (b.), unterer Teil der Abbildung.

Inwieweit die Resultate auf ältere Personen übertragbar sind, müsste in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Geht man von einer Übertragbarkeit der Resultate aus und vergleicht die erreichbare Temperaturänderung mit dem Zusammenhang zwischen Innentemperatur und Sterblichkeit (siehe Abbildung 34), wird ein Verminderungspotential der Sterblichkeit in der Grössenordnung von ca. 7% sichtbar (bezogen auf die mittlere Nachttemperatur).

Vergleicht man die Resultate der Kühlwirkung des PCS mit derjenigen des Standventilator, wird ersichtlich, dass der Standventilator mit einer Luftgeschwindigkeit von ca. 1 m/s betrieben werden müsste (bei einer Lufttemperatur von 26°C), um die gleiche Wirkung zu erzielen (Abbildung 15).

Xu et al. untersucht in (28) den Einfluss von intermittierenden und lokalen Kühlinterventionen auf die Hauttemperatur, die Schlafqualität und den Ruheenergieverbrauch für junge, gesunde Erwachsene. Als PCS kommt Embr Wave zum Einsatz. Die Studie, durchgeführt mit fünf Männern und fünf Frauen,



kommt zum Ergebnis, dass ein intermittierender und lokaler milder Kältereiz, der über 3.5 Tage verabreicht wird, die distale Hauttemperatur reduziert, aber keine messbare Veränderung der Wahrnehmung der Hauttemperatur, der Schlafqualität, des Ruheenergieverbrauchs oder der Nährstoffoxidationsrate in dieser Kohorte hervorruft. Die Autoren weisen in Bezug auf die Aussagekraft ihrer Resultate unter anderem auf die geringe Anzahl der Testpersonen hin und den Effekt, dass die mit dem PCS ausgerüsteten Personen wärmere Umgebungen aufsuchen, was das Resultat verändern könnte. Zur Verifizierung der Resultate sind weitere Untersuchungen nötig.

Nimmt man die Erkenntnis von Arens et al. (25) zum Gesamtempfinden bei Hitze noch einmal auf, die besagen, dass dieses durch die wärmste Stelle beeinflusst wird, kann bezüglich der Wirkung eines PCS von einem Zusammenhang zwischen dem Aktivitätsgrad der Person und der Leistungsfähigkeit des Kühlelementes ausgegangen werden.



Abbildung 19: Embr Wave 2. Quelle: Embr Labs.

Ist die Kühlfläche und -leistung im Verhältnis zum Aktivitätsgrad zu gering, kann das PCS keine Wirkung erzielen. Da während der Erholungsphase in der Nacht der Aktivitätsgrad gering ist, könnte sich die Wirkung für diese Anwendung verbessern. Die neuste Generation des Embr Wave ist mit einer grösseren Kühlfläche ausgestattet.



4.3 Grossflächige personenbezogene Kühlflächen

Wärmeleitung ist ein effizienter Weg, um Energie zu übertragen und findet im Gegensatz zur konvektiven Wärmeübertragung ohne Luftbewegung statt. Diese Art der Wärmeübertragung erfolgt, wenn Kühlflächen direkt mit dem menschlichen Körper im Kontakt stehen. Bereits mit Flächentemperaturen unter 34°C kann gegenüber der Haut, mit einer Temperatur während der Schlafphase von ca. 34-34.6°C (siehe Song et al. (29)), ein Kühleffekt erreicht werden. Solche Temperaturen können effizienter bereitgestellt werden als die für die Raumkühlung üblichen 16-18°C.

4.3.1 Kühlgerät mit Peltier-Technologie und wasserdurchflossener Matratzenauflage

Li et al. vergleicht in ihrer Studie (30) den thermischen Komfort und die Schlafqualität von verschiedenen innovativen Konzepten von Matratzen und Matratzenauflagen bei heissem Klima. Untersucht wurden vier Systeme. Eine Latex-Schaummatratze (LFM), eine Matratze mit einer luftdurchlässigen 3D-Gewebefüllung (3FM), eine Matratzenauflage mit integriertem, wasserführenden Rohrsystem (WP) und eine vollflächig wasserdurchflossenen Matratzenauflage (WC). Die Untersuchungen wurden bei einer Raumlufttemperatur von 27°C durchgeführt.

Die Resultate der Untersuchung zum thermischen Empfinden sind in Abbildung 20 dargestellt.

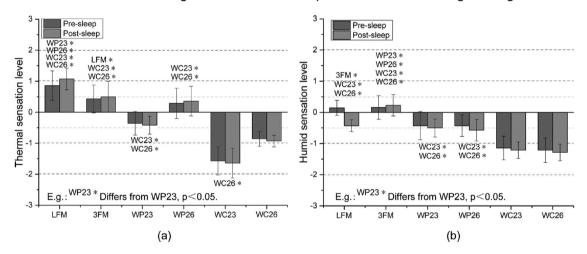


Abbildung 20: Thermisches Empfinden (a) und Feuchtempfinden (b) an der Schnittstelle zwischen dem Menschen und dem Matratzensystem für verschiedene Bedingungen. WP: Matratze mit wasserführenden Rohren; WC: Matratze vollflächig durchflossen; WP23, WC23: Wassertemperatur 23°C, WP26, WC26: Wassertemperatur 26°C. Bewertungen: Thermal sensation level +3: hot, +2: warm, +1: slightly warm, 0: neutral, -1: slightly cool, -2: cool, -3: cold. Humid sensation level +3: too dry, +2: dry, +1: slightly dry, 0: neutral, -1: slightly humid, -2: humid, -3: too humid. Quelle: Fig. 7 aus Li et al. (30).

Die Ergebnisse zeigen, dass der Aufbau der Matratze einen Einfluss auf das thermische Empfinden und das Feuchtempfinden hat. Die wasserführenden Systeme WP und WC verändern das Empfinden der Testpersonen stark. Die Matratzenauflage mit wasserführenden Rohren (WP) führt bei Wassertemperaturen von 23°C (WP23) und 26°C (WP26) zu einer beinahe neutralen Bewertung, im ersten Fall leicht zu kalt, im zweiten Fall leicht zu warm. Die Auflage mit der grossflächigen Wasserfüllung führt bei einer Wassertemperatur von 23°C (WC23) zur Bewertung kalt und mit 26°C (WC26) zu Bewertung leicht kalt. Wie auf der rechten Seite der Abbildung 20 ersichtlich ist, weisen die wasserführenden Systeme eine grössere Veränderung des Feuchtempfindens aus. Signifikat wir der Effekt bei grossflächig wasserführenden Systemen.

Zur Kühlung des Wassers wird ein Kühl-/Heizgerät eingesetzt. Das Wasser wir mit einem Peltier-Element gekühlt, das auf der Halbleitertechnologie aufbaut (siehe Abschnitt 4.2, TEC). Die aufgenommene Energie wird auf der warmen Seite des Peltier-Elementes mittels eines Ventilators an die Raumluft abgeführt. Ein vergleichbares Gerät, wie es in Li et al. (30) verwendet wurde, in Kombination mit der Matratzenauflage mit wasserführenden Rohren (WP), wurde im Rahmen der vorliegenden Studie



untersucht. Das Gesamtsystem (Abbildung 21) besteht aus dem Kühl-/Heizgerät mit integriertem Peltier-Element, Ventilator zur Kühlung des Peltier-Elementes, einer Wasserpumpe, einem Wassertank und der Temperatursteuerung. An das Gerät wird die Matratzenauflage mit den integrierten wasserführenden Rohren angeschlossen (Abbildung 21).





Abbildung 21: Kühl-/Heizgerät mit angeschlossener Matratzenauflage; Herstellerangaben: Model NC-3427-675; 165 W, 220V; Temperaturbereich 18-48°C, Betriebsgeräusch <48 dB (links). Die gemessene Leistungsaufnahme beträgt 150 W, der Schalleistungspegel 47.6 dB(A). Detailansicht der Matratzenauflage mit den wasserführenden Rohren (rechts).

Die Leistungsfähigkeit des Kühlsystems wurde mit einem Laborversuch untersucht. Dazu wurde ein thermisches Personenmodell gebaut, dass die Flächenverhältnisse des liegenden Menschen berücksichtigt. In Laborversuchen werden, vor allem für die Untersuchung von Luftströmungen, zylindrische Rohre verwendet, die die gleiche Oberfläche wie der menschliche Körper aufweisen. Im Inneren des Zylinderrohres simulieren Beleuchtungskörper die Wärmeproduktion des Menschen. Liegt eine Person auf einer Matratze, berührt der ganze Rücken die Oberfläche, die Bauchseite zum Beispiel ein Duvet. Ein Zylinder gibt diese Situation nicht korrekt wieder, weshalb der Körper als Quader ausgebildet wird. Anstelle der Anwendung als Matratzenauflage, wie in Li et al. (30), wurde das Personenmodell mit der Matratzenauflage im Sinne eines Duvet umwickelt. Abbildung 22 zeigt eine Thermografie Aufnahme dieser Situation.

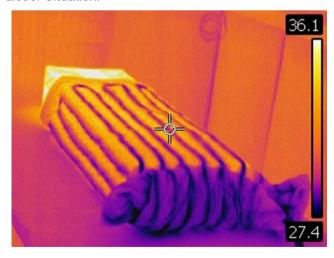


Abbildung 22: Thermografie-Aufnahme vom Personenmodell mit umwickelter Matratzenauflage (Rohrabstand 70 mm) in der Klimakammer der HSLU-IGE.

Der Aufnahme ist zu entnehmen, dass die wasserführenden Rohre an der Oberfläche Temperaturen von ca. 28°C aufweisen, zwischen den Rohren liegt die Temperatur bei ca. 33°C. Bei einer für die



Auswertung aller Messungen normierten Kerntemperatur im Personenmodell von 36°C resultiert ein Raumlufttemperatur von 28°C bei einer Vorlauftemperatur von 24.2°C und eine Rücklauftemperatur von 24.7°C. Die Vor- und Rücklauftemperaturen konnten nur mit Anlegefühlern gemessen werden und weisen deshalb eine Ungenauigkeit auf. Der grosse Temperaturunterschied zwischen den wasserführenden Rohren und der nicht gekühlten Fläche dazwischen, kann ein Grund für das unterschiedliche Temperaturempfinden in der Studie Li et al. (30) sein. Ist die Wassertemperatur zu hoch, fehlt der Kühleffekt und das Empfinden ist zu warm. Ist die Wassertemperatur zu tief, sind die Temperaturunterschiede zwischen den Körperflächen auf den Rohren und denjenigen zwischen den Rohren zu hoch, was ein Empfinden von zu kalt hervorruft. Eine vollflächige Wasserfläche mit einer Temperatur von 23°C bzw. 26°C ist auf ieden Fall zu tief. da beim Kontakt mit der Haut mit ca. 34°C ein viel zu grosser Wärmestrom aus dem Körper fliesst und diesen unterkühlt. Dies bestätigen die Ergebnisse der Studie Li et al. (30) in der Konfiguration WC23. Um das thermische Empfinden und das Feuchteempfinden zu verbessern, muss die Wassertemperatur näher an der Körpertemperatur liegen und die Differenz zwischen den gekühlten und ungekühlten Flächen muss gering sein. Dies wird durch eine effizientere Wärmeübertragung in Form eines engeren Rohrabstandes in Verbindung mit einem kleineren Rohrdurchmesser erreicht.

4.3.2 Kapillarrohrsystem zur Körperkühlung

Der grosse Rohrabstand, des in Abschnitt 4.3.1 untersuchten Kühlsystems, bedingt tiefe Wassertemperaturen, um die benötigte Kühlwirkung zu erreichen. Die tiefen Wassertemperaturen führen einerseits zu einem reduzierten Komfort und einem negativen Feuchtempfinden und andererseits wird eine mechanische Kälteerzeugung für die Bereitstellung des Kühlwassers benötigt. Um diese Nachteile zu beheben, wird untersucht, ob mit einem Kapillarrohrsystem (Durchmesser 3.35 mm, Rohrabstand 15 mm) die Wassertemperatur so erhöht werden kann, dass das Komfort- und Feuchtempfinden positiv beeinflusst wird und hohe Wassertemperaturen eine Kühllösung ohne mechanische Kälteerzeugung ermöglichen. In Abbildung 23 ist das Personenmodell mit der Kapillarrohmatte vor dem Abdecken mit einem Duvet dargestellt. Ziel der Untersuchung ist die Oberflächentemperatur des Personenmodells, bei einer sich ändernden Innentemperatur in der Klimakammer, zwischen 34-35°C zu halten. Dies entspricht einem thermisch neutralen Zustand.

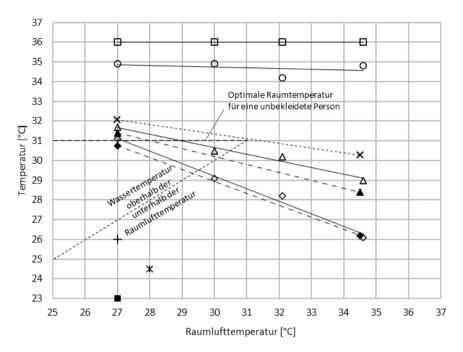


Abbildung 23: Personenmodell eines liegenden Menschen (Oberfläche 1.9 m², Wärmeleistung 55 W) mit angebrachter Kapillarrohrmatte um den Torus (Wassermassenstrom 24.5 kg/h, Kühlfläche 0.9 m², Anteil Rücken 0.4 m²) vor der Abdeckung mit einem Duvet.

Dazu wird die Vorlauftemperatur in das Kapillarrohrsystem verändert. Gelingt die Temperaturstabilisierung, kann der lokale Komfort trotz veränderter Innentemperatur beibehalten werden.



Die Resultate aus dem Experiment sind in der Abbildung 24 zusammengefasst. Die Oberflächentemperatur des Personenmodells liegt bei ca. 35°C, bei einer Wärmeleistung von 55 Watt.



- Kerntemperatur Personenmodell
- Vorlauftemperatur Messung
- × Temperatur Kühlebene Modell
- + Experiment WP26 und WC26 aus (25)
- Oberflächentemperatur Personenmodell
- Δ Rücklauftemperatur Messung
- ---**▲**--- Rücklauftemperatur Modell
 - Experiment WP23 und WC23 aus (25)
 - Experiment HSLU WP24.5

Abbildung 24: Gemessene und berechnete Temperaturen am Personenmodell bei einer Wärmeabgabe der Person von 55 Watt. Die Messdaten wurden auf eine einheitliche Kerntemperatur des Personenmodells von 36°C normiert. Die Kerntemperatur entspricht der Temperatur im Körperinneren des Menschen.

Um die Oberflächentemperatur des Personenmodells konstant zu halten, ist bei einer Raumlufttemperatur von 27°C eine Vorlauftemperatur von 31°C, bei einer Raumlufttemperatur von 29°C eine Vorlauftemperatur von 30°C nötig. Die Rücklauftemperaturen liegen bei 31.7°C, respektive bei 31°C. Dies bedeutet, dass die Vorlauftemperatur zur Kühlung bis zu einer Raumlufttemperatur von 29.5° höher als die Raumlufttemperatur ist. Aus Abbildung 24 ist auch ersichtlich, dass die Wassertemperaturen nahe bei der für eine unbekleidete Person optimalen Raumtemperatur von 31°C liegen, womit keine Komforteinschränkungen auftreten sollten. Ergänzend sind in Abbildung 24 auch die Temperaturen aus den Untersuchungen von Li et al. (30) und der eigenen Untersuchung (HSLU WP24.5) eingetragen. Die grossen Temperaturdifferenzen zur Körpertemperatur und zu den Temperaturen des Kapillarrohrsystems werden gut sichtbar.

In Ergänzung zu den Messungen wurden auch Modellberechnungen für die Bestimmung der Vor- und Rücklauftemperatur durchgeführt (siehe Abschnitt 14.7). Aus der Darstellung der Resultate in Abbildung 24 wird ersichtlich, dass die Vorlauftemperatur gut nachgebildet werden kann, bei der Rücklauftemperatur werden Temperaturen unterhalb der Messwerte ausgewiesen. Die Differenz weist auf einen zusätzlichen Wärmeeintrag im Laborversuch vom Raum in das Kühlsystem hin. Für die Bestimmung der Raumlufttemperatur, bei der der Wärmeeintrag aus dem Raum durch das Duvet gerade null ist, muss die mittlere Temperatur in der wasserführenden Schicht bekannt sein. Diese Temperatur beträgt im Fall der Modellrechnung 31°C. Bei Raumlufttemperaturen unterhalb von 31°C fliesst also Wärme von der Person über das Duvet an den Raum ab. Das wasserführende Kühlsystem



muss deshalb nicht die ganze Personenwärme abführen. Bei einer Raumlufttemperatur über 31°C wird Wärme aus dem Raum durch das Duvet an das Kühlsystem abgegeben, womit die benötigte Kühlleistung erhöht wird. Gemäss den Modellrechnungen leistet die gekühlte Liegefläche einen Anteil von 40% (Raumlufttemperatur 27°C) beziehungsweise 28% (Raumlufttemperatur 34.5°C) an der Wärmeabfuhr. Der Anteil der Liegefläche an der gesamten Kühlfläche beträgt 31%.

4.3.3 Schlafsack mit flexiblem Rohrsystem zur Körperkühlung

Die Messungen und Modellrechnungen mit der Kapillarrohrmatte zeigen, dass die Zielsetzung von hohen Wassertemperaturen und genügender Kühlung erreicht werden kann. Der Nachteil der verwendeten Kapillarrohrmatten ist, dass sie starr ist und sich für den Einsatz in einem Duvet nicht eignen. Aus diesem Grund wurde ein Kunststoffrohrsystem in einen handelsüblichen Schlafsack integriert (Abbildung 25). Dazu wurde in den Schlafsack ein Lochflies zur Aufnahme der Rohre appliziert.



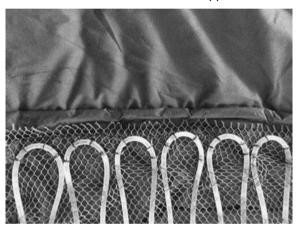


Abbildung 25: Schlafsack mit Flies für die Rohrführung und integriertem PVC-Kunststoffrohr, Aussendurchmesser 5 mm, Innendurchmesser 3 mm, Abstand 15 mm, Gewicht Rohr ohne Wasser 15 g/m, mit Wasser 22 g/m. Das Bild rechts zeigt eine Detailansicht des rautenförmigen Flies für die Stabilisierung der Rohre.

Als beste Lösung zwischen Druckfestigkeit und Biegsamkeit, vor allem für die Rohschlaufen am oberen Ende des Schlafsackes, zeigte sich das PVC-Kunststoffrohr mit einem Aussendurchmesser von 5 mm, einem Innendurchmesser von 3 mm und einem Gewicht von 15 g/m (Produkt: fitt cristallo extra).

4.3.4 Direktkühlung mit Frischwasser

Eine Herausforderung für die Bettenkühlung ist das Bereitstellen des Kühlwassers. Da sich der Einsatz des Kühlsystems auf eine Dauer von maximal drei Monaten pro Jahr beschränkt, muss eine einfache, ressourceneffiziente und kostengünstige Lösung gefunden werden. Durch die hohen Wassertemperaturen bietet sich die direkte Nutzung von Frischwasser an. Dies hat den Vorteil, dass die Bettenkühlung geräuschlos funktioniert. In Abbildung 26 ist der Aufbau der Bettenkühlung mit den einzelnen Bauteilen dargestellt.

Der im Experiment verwendete Wasservolumenstrom beträgt 24.3 kg/h. Bei einer Vorlauftemperatur von 30°C, einer Rücklauftemperatur von 31° und einer Frischwassertemperatur von 13°C beträgt der zur Kühlung benötigte Frischwasservolumenstrom 1.4 kg/h. Bei einer ausgedehnten Betriebszeit von acht Stunden ergibt dies ein Wasserverbrauch von 11 kg.



Bei einem mittleren Verbrauch im Haushalt von 142 I pro Person und Tag ¹⁹, entspricht das einer Zunahme von 7%. Gelingt es, das erwärmte Wasser z.B. für die WC-Spülung zu nutzen, resultiert kein Mehrverbrauch.

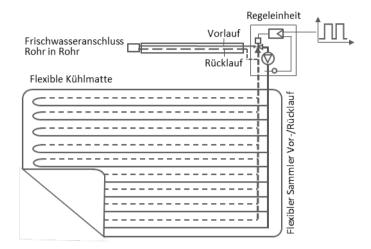


Abbildung 26: Flexible Kühlfläche mit Steuereinheit für die Temperaturregelung mit direktem Frischwasseranschluss.

Ebenso ist eine weitere Optimierung des Wassermassenstromes möglich (siehe Abbildung 60). Erzeugt man, durch das Ein- und Ausschalten des Wasserstroms, anstelle eines konstanten einen wellenähnlichen Energiestrom, kann der Frischwasserverbrauch weiter stark gesenkt werden. Ein wellenförmiger Kühlzyklus wird auch bei den PCS (siehe Abschnitt 4.2) eingesetzt.

4.3.5 Weiterentwicklung der Bettenkühlung

Die geräuschfreie Bettenkühlung bietet durch ihre hohe Effizienz und ihre individuelle Anpassbarkeit an die Bedürfnisse der Benutzenden eine Alternative zur Raumkühlung. Die Schwachpunkte der bestehenden Systeme konnten identifiziert werden. Für eine grössere Verbreitung sind noch einige Entwicklungsschritte nötig.

Folgende technische Lösungen müssten entwickelt werden:

- Rohr in Rohrsystem für die Führung des Vor- und Rücklaufs mit Schnellkupplung an die Frischwasserstation.
- Dreiwegeventil mit einem Beimischwasserstrom von lediglich 0.23 l/min (Frischwassertemperatur 13°C) mit einer zyklischen Regulierung der Temperatur.
- Flexibler Sammler für das Vor- und Rücklaufwasser mit geringem Wasserinhalt.
- Optimiertes Kunststoffrohrsystem zur Reduktion des Auflagegewichtes auf dem Körper (Rohrmaterial und Wasserinhalt).
- Gut wärmeleitender Füllstoff zwischen den wasserführenden Rohren zur Vermeidung von Druckstellen auf dem Körper, vor allem auf dem Rücken.

Untersuchung im Schlaflabor

 Personenstudie zur Untersuchung der Wirksamkeit und Akzeptanz einer mit Frischwasser betriebenen Bettenkühlung während des Schlafzyklus und speziell während der Einschlafphase.

¹⁹ SVGW: Im eigenen Haushalt selbst werden aktuell 142 Liter pro Person benötigt.



4.4 Kühlende Textilien

Die Entwicklung von Textilien für das persönliche Wärmemanagement ist nicht neu. Bereits 1986 wurde durch die Firma Dupont das Material CoolMax entwickelt. CoolMax nutzt eine Formfaser, um den Feuchtetransport vom menschlichen Körper an die Umgebung zu verbessern. Aktuelle Forschungsaktivitäten untersuchen die Adaptionsfähigkeit der Öffnungsfläche von Geweben für die direkte Wärmeabstrahlung von der Haut an die Umgebungsflächen. Denn die Haut ist ein sehr guter Wärmestrahler, mit einem Emissionsgrad von 0.98. Andere Arbeiten untersuchen die Möglichkeit den Verdunstungseffekt für die Kühlung des Körpers zu nutzen. Beide Typen werden nachfolgend im Sinne der Komplettierung der Kühlmöglichkeit kurz beleuchtet.

4.4.1 Wärmestrahlung von der Haut an die Umgebung

Peng et al. (31) beschreibt ein grosstechnisches Extrusionsverfahren von gleichmässigen und kontinuierlichen NanoPE-Mikrofasern mit baumwollähnlicher Weichheit für die industrielle Stoffproduktion.

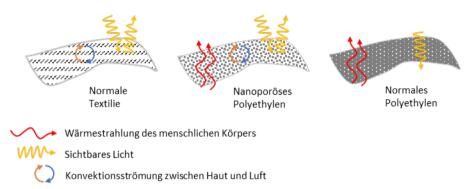


Abbildung 27: Schematischer Vergleich der Wärmetransportmechanismen zwischen einer normalen Textilie, nanoporösem Polyethylen und normalem Polyethylen. Nur nanoporöses Polyethylen ermöglicht gleichzeitig den Wärmetransport durch Wärmestrahlung und Konvektion vom der Haut an die Umgebung. Darstellung in Anlehnung an Peng et al. (31) Figure 3 (A).

Er demonstriert erstmals den strahlungskühlenden Stoff. Gemäss seinen Untersuchungen führt dieser zu einer 2.3°C tieferen Hauttemperatur im Vergleich zu herkömmlicher Baumwolle. Dies bedeutet, dass Personen die NanoPE Stoffe tragen, sich bei 2.3°C höheren Temperaturen noch thermisch komfortabel fühlen, im Vergleich zu solchen, mit einer Baumwollbekleidung. Mit diesem Kühleffekt liegt das Gewebe in einem ähnlichen Bereich wie der Ventilator (Luftgeschwindigkeit 1 m/s, Abschnitt 4.1) oder das auf der Haut tragbare Kühlelement (Abschnitt 4.2). Der Vorteil der Textilie ist, dass sie unabhängig vom Ort eine Komfortverbesserung ermöglicht. In der Nacht kann die Textile nur ohne zusätzliche Bedeckung des Körpers mit einem Duvet wirken, da sonst sowohl die direkte Wärmestrahlung als auch der direkte konvektive Wärmetransport vom Körper stark eingeschränkt ist.

Die Entwicklung von Alberghini et al. (32), mit einem Polyethylen Polymer gehen in eine ähnliche Richtung. In der Untersuchung zeigen sie auch auf, dass die Anwendung von Polyethylen als Gewebematerial bei einer cradle-to-cradle Betrachtung sinnvoll ist. Polyethylen steht vor allem wegen der Umweltbelastung durch Plastiktaschen und dem Mikroplastik in den Meeren im Fokus.

Kim et al. (33) beschreibt das Verhalten von thermisch adaptiven Textilien (TAT), die auf Schweiss reagieren und Öffnungen im Gewebe erzeugen. Dies geschieht, indem sich eine Reihe von klappenförmigen Poren, die auf der Gewebeoberfläche integriert sind, öffnen. Das Laborexperiment mit einer künstlichen Haut zeigt eine Abkühlung der Hautoberfläche von 4°C.



4.4.2 Verdunstungseffekt nutzen

Für die Kühlung des Körpers kann der Verdunstungseffekt genutzt werden. Er entsteht, wenn ein Stoff – in diesem Fall Wasser – vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht. Das passiert beim Schwitzen, wo Wasser an der Hautoberfläche verdunstet. Damit die Verdunstung stattfinden kann, muss Verdunstungsenergie aufgewendet werden, die der Haut entzogen wird und diese damit kühlt. An der Hautoberfläche darf sich kein Wassertropfen bilden, sonst kommt die kühlende Wirkung zum Erliegen. Der thermische Widerstand der Wasserschicht ist dann zu gross, damit mit der kleinen Temperaturdifferenz zwischen der Hautoberfläche und der Aussenseite der Wasserschicht ein Wärmestrom fliessen kann. Am geeignetsten wäre ein Gewebe, dass das Wasser aufnimmt, es über eine grosse Fläche verdunstet und selbst einen kleinen thermischen Widerstand aufweist.

Schwitzen ist für den Körper die letzte Stufe, um Wärme abzuführen und für die meisten Menschen nicht sehr angenehm. Im Innenraum soll die Temperatur in einem Bereich sein, dass kein Schwitzen auftritt. Trotzdem ist es interessant, den Effekt der Verdunstung zur Kühlung des Körpers zu nutzen.

Eine solche Anwendung ist die Kühlung des Körpers bei hohem Fieber durch Kompressen, die in ein Gemisch aus Wasser und Essig getränkt werden. Fathia, Ahmed (34) zeigen in ihrer Untersuchung die Wirkung der Kühlung mit Wasser, Wasser und Essig (50/50%) und Essig an 45 Patienten auf.

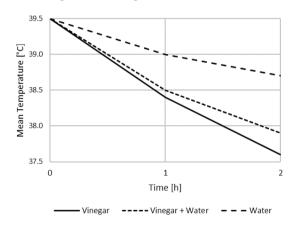


Abbildung 28: Körpertemperaturen nach einer und nach zwei Stunden für die drei Patientengruppen mit je 15 Personen für die Kompressen mit Essig, Essig und Wasser und Wasser. Quelle: Fathia, Ahmed (34), Auswertung von Table 4, Comparison of mean value of three compresses methods.

Wie der Abbildung 28 entnommen werden kann, ist der Kühleffekt bei der Patientengruppe mit Essig-Kompressen am höchsten, gefolgt von Essig-Wasser Kompressen und Wasser-Kompressen. Durch die viel höhere Flüchtigkeit des Essigs im Vergleich zu Wasser ist der Verdunstungseffekt viel stärker, was sich in einer tieferen Körpertemperatur äussert. Die Temperaturänderung mit Essig fällt fast dreimal höher aus als mit Wasser. Song et al. (35) untersucht das Potential von nasser Kleidung als Abkühlstrategie von gefährdeten Bevölkerungsgruppen während Hitzewellen bei Temperaturen von 43°C. Dabei werden die Kleider entweder in Frischwasser eingetaucht oder besprüht. Die Resultate zeigen, dass der Kühleffekt vorhanden ist und vor allem bei enganliegenden Kleidern höher ausfällt. Die Verdunstungsschicht ist direkt mit Haut verbunden und es entsteht keine insolierende Schicht durch die Luft.

Die Beispiele zeigen das Potential der direkten Kühlung des Menschen an seiner Hautoberfläche auf. Funktionale Textilien, auch ausserhalb des Sports, werden weiterentwickelt. Wie die Akzeptanz bei den Nutzerinnen und Nutzern ausfällt, müssen weitere Untersuchungen zeigen. Dies speziell bei einfachen Methoden, wie das Benetzen von Kleidern. Alle beschriebenen Entwicklungen leisten einen Beitrag, den thermischen Komfort bei höheren Innentemperaturen sicher zu stellen.

4.5 Potential personenbezogene Kühlung

In der Tabelle 20 ist die Kühlwirkung der untersuchten Kühllösungen zusammengefasst.

Kühllösung	Kühlwirkung	Bemerkung
Standventilator	1.5°C (30°C) - 3.3°C (22°C)	Die Kühlwirkung ist von der Temperatur im Raum abhängig (Luftgeschwindigkeit 1 m/s).
Wearable (Embr Wave)	2.3°C	Wie sich die Kühlwirkung bei einer langen Nutzungsdauer (z.B. 8 Stunden) entwickelt, müssen weitere Untersuchungen mit Probanden zeigen.
Bettenkühlung	Bettklima kann unabhängig von der Temperatur im Raum sichergestellt werden.	Bei zu hohen Temperaturen im Raum kann der Kopf die Wärme nicht mehr an die Umgebung abgeben. Es entsteht eine Asymmetrie zum gekühlten Körper der Bettenkühlung. Zur Bestimmung der Grenztemperatur sind Versuche mit Probanden nötig.
Kühlende Textilien 2.3 - 4°C		

Tabelle 20: Zusammenfassung der Kühlwirkung der untersuchten personenbezogenen Kühllösungen.

Die Kühlwirkung liegt, ausser bei der Bettenkühlung, im Einsatzbereich bei 2 bis 3°C. Vergleicht man die Kühlwirkung mit der Sensitivität der Menschen auf höhere Innentemperaturen (Abschnitt 5.3.2), zeigt sich, dass die personenbezogene Kühlung zur Reduktion der Hitzebelastung beitragen kann.

Das grösste Potential weist die Bettenkühlung auf. Mit ihr wird es möglich sein, auch bei höheren Innentemperaturen ein Bettklima zu schaffen, wie es bei Innentemperaturen von 21°C (wie sie für Risikogruppen angebracht wären) vorhanden ist.

Die Auswertungen der personenbezogenen Kühllösungen gemäss Abbildung 11 bis Abbildung 14 ergeben, dass sie sowohl punkto Kosten als auch punkto Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb konkurrenzfähig zu den anderen untersuchten Kühllösungen sind.

Die Herausforderung der am Körper aufliegenden System (Wearables) und der Bettenkühlung wird die Akzeptanz durch die Nutzenden sein. Versuche mit Probanden und die Weiterentwicklung der Kühllösungen (Abschnitt 4.3.5) können die Akzeptanz erhöhen.

Die personenbezogene Kühlung verfügt über das ökonomische und ökologische Potential, sich als zukünftige Kühllösung zu etablieren.



5 Temperaturkriterium und -anforderungen für Wohnbauten

Die Normen fokussieren bei der Festlegung des zulässigen Bereiches der empfundenen Temperatur auf eine gemittelte Aussentemperatur und unterscheiden nicht zwischen Tag und Nacht. Aus den Untersuchungen von Ragettli et al. (7) geht hervor, dass die temperaturbedingte Belastung des Menschen nicht nur von der momentanen Temperatur abhängt, sondern Korrelationen sowohl mit der Tageshöchst- als auch mit Nachtminimumtemperatur und dem Tagesmittelwert beobachtet wurden. Dies weist darauf hin, dass nicht nur die momentane Temperatur, sondern auch die Temperaturentwicklung während des gesamten Tagesgangs und vorhergehenden Tagen (verzögerte Effekte) von Bedeutung sind. Daraus abgeleitet scheint eine Unterscheidung in eine Betrachtung Tag und Nacht sinnvoll.

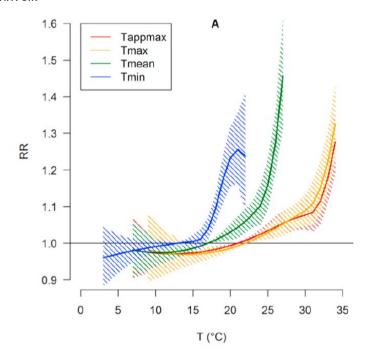


Abbildung 29: Relatives Sterberisiko in Funktion verschiedener Aussentemperaturen. Tappmax: täglich gefühlte maximale Aussentemperatur; Tmean: mittlere tägliche Aussentemperatur; Tmin: minimale tägliche Aussentemperatur.

Aus Abbildung 29 zeigt sich, bei Betrachtung des Verlaufs der minimalen täglichen Aussentemperatur (die der Nacht zugeordnet werden kann), dass das relative Sterberisiko ab 17°C rasch zunimmt und bis zu einer Aussentemperatur von 20°C (Tropennacht) einen Wert von 1.25 erreicht. Das bedeutet, dass das Sterberisiko um 25% zunimmt im Vergleich zur Referenztemperatur (13°C). Durch den Bezugspunkt der Studie auf die Aussentemperatur lässt sich jedoch direkt kein Temperaturkriterium für die Innentemperatur formulieren. Um diese Lücke zwischen Aussen- und Innentemperatur zu schliessen, wird ein Gebäudemodell erarbeitet (siehe Abschnitt 14.8), das in die Auswertung integriert wird. Zuerst wird ein Blick auf das Normenwerk gelegt. In der SIA Norm 180 (1) sind die Anforderungen an die empfundene Temperatur unter Berücksichtigung der Tätigkeit (met) und dem thermischen Widerstand der Bekleidung (clo) festgelegt.

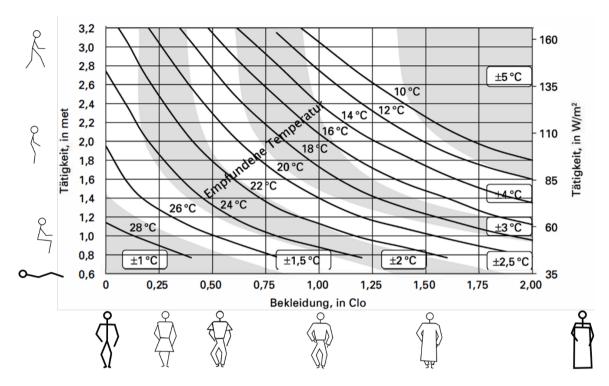


Abbildung 30: Optimale empfundene Temperatur in Abhängigkeit von Tätigkeit und Bekleidung gemäss SIA 180 (1) / SN EN ISO 7730. Mittlere relative Luftfeuchtigkeit ca. 50%, Luftgeschwindigkeit: Tätigkeit M < 1 = 0 m/s; Tätigkeit M > 1 = 0.3 (M-1) m/s. Ausgezogene Linie: PMV=0 d.h. 5% Unzufriedene, markierter Bereich: PMV=+/- 0.5 d.h. < 10% Unzufriedene. Person mit Bettdecke ergänzt.

Aus Abbildung 30 lässt sich die optimale empfundene Temperatur für eine liegende Person abschätzen. Dies beträgt für eine nackte Person ohne Bettdecke und Schlafanzug gemäss Fergus (36) 31°C. Lin et al. (37) haben unter anderem untersucht, welchen thermischen Widerstand (clo) eine Sommerdecke und eine leichte Schlafbekleidung aufweist. Der Wert liegt je nach Bedeckungsgrad der Person zwischen 2.1 clo (59%) und 2.4 clo (67%). Daraus resultiert eine empfundene Temperatur gemäss Abbildung 30 von 21°C (+/-2.5°C, 2.1 clo) bzw. 20°C (+/-2.5°C, 2.4 clo). Grundsätzlich sind die Angaben in Abbildung 30 nur für eine minimale Wärmeabgabe des Menschen von 58 W/m² korrekt. Um die während des Schlafes tiefere Wärmeabgabe des Menschen zu berücksichtigen und die veränderte Wärmeabgabefläche durch das Liegen im Bett einzubeziehen, hat Lin et al. (38) ein angepasstes Modell entwickelt. Mit diesem Modell resultiert eine empfundene Temperatur von 24°C (+/- 2.0°C) bei 2.1 clo und 22°C (+/- 2.0°C) bei 2.4 clo. In den nachfolgenden Abschnitten wird geklärt, welche Nachttemperatur aus gesundheitlicher Sicht akzeptierbar ist.

5.1 Zusammenhang zwischen Temperatur und Sterblichkeit

Das Schweizerische Tropen- und Public Health-Institut (Swiss TPH) untersucht den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Sterblichkeit während der warmen Jahreszeit (Mai bis September) in der Schweiz. Im Rahmen des Projekts «A.06 Hitze und Gesundheit» des Pilotprogramms Anpassung an den Klimawandel 2019-2021 des Bundes (39) analysiert das Swiss TPH, welche Faktoren den Effekt von Hitze auf die menschliche Gesundheit beeinflussen und wie stark. Genaue Kenntnisse über die Wirkung von städtischen Wärmeinseln, Grünräumen, Gebäudecharakteristiken, soziodemographischen Faktoren sowie von Präventionsmassnahmen auf das hitzebedingte Gesundheitsrisiko sind wichtig, um effiziente Anpassungsmassnahmen zu ergreifen. Eine frühere Analyse anhand aggregierten Mortalitätsdaten aus acht Städten zwischen 1995 bis 2013 (d.h. Anzahl Todesfälle pro Tag und Stadt) lieferte erste Einblicke in den Zusammenhang zwischen verschiedenen Merkmalen der Aussentemperatur (Tagesminimum Tmin; Tagesmittelwert Tmean; Tagesmaximum Tmax, maximale



gefühlte Tagestemperatur) und der Sterblichkeit (7). Für die Expositionsabschätzung wurden damals Temperaturdaten von einer repräsentativen Messstation von MeteoSchweiz pro Stadt verwendet.

Für die aktuelle Studie stehen detailliertere Mortalitätsdaten der Swiss National Cohort (SNC) der Jahre 2003 bis 2016 für die ganze Schweiz zur Verfügung (www.swissnationalcohort.ch). Für jeden Todesfall liegen Datum, Todesursache und die genaue Wohnadresse vor. Da die SNC auf einer Verbindung der Daten von Volkszählungen mit der nationalen Todesursachenstatistik basiert, sind auch detaillierte Informationen zu sozialen, ökonomischen und kulturellen Charakteristiken sowie Angaben zu den Wohnverhältnissen vorhanden. Um den Effekt der Temperatur auf die Sterblichkeit zu untersuchen, wurde für jeden Todesfall die Aussentemperatur an der Wohnadresse am Todestag und an den Tagen davor evaluiert. Die Temperatur an den Tagen vor einem Todesfall wird in den Analysen berücksichtigt, da die Wirkung von Hitze verzögert auftreten kann. Da nicht genügend Messstationen von MeteoSchweiz für diese Expositionsabschätzung vorhanden sind (vor allem innerhalb der Städte), wurde zur bestmöglichen Abbildung der räumlichen Variabilität der Hitzebelastung eigens ein hoch aufgelöstes räumliches Temperaturmodell entwickelt (siehe Abschnitt 14.2). Mit diesem Modell kann im Zeitraum 2003 bis 2016 für eine beliebige Koordinate in der Schweiz die Tmax, Tmin und Tmean evaluiert werden (räumliche Auflösung 100x100 m).

Zusätzlich zu den Analysen zum Einfluss der Aussentemperatur auf die Sterblichkeit, wurde für das vorliegende Projekt der Zusammenhang zwischen Sterblichkeit und Innentemperatur untersucht. In epidemiologischen Studien zu den Auswirkungen der Temperatur auf die Gesundheit, wurde die Innentemperatur bisher kaum berücksichtigt. In der Schweiz verbringt ein Grossteil der Bevölkerung die meiste Zeit (80-90%) in Innenräumen. Angaben zur Innentemperatur werden daher als Verbesserung der Expositionsabschätzung gewertet. Dafür wurde anhand dem von der Fachhochschule Luzern im Rahmen von ResCool entwickelten vereinfachten Gebäudemodell (siehe Abschnitt 14.8), für jeden Todesfall die Innentemperatur ermittelt. Die in diesen Berechnungen verwendeten Aussentemperaturen (bis 14 Tage vor den Todestag) stammen aus dem Temperaturmodell von Flückiger et al. (40) mit einer Auflösung von 100x100 m. Weiter wurden bei den Berechnungen folgende Parameter berücksichtigt: mittlere tägliche Globalstrahlung 14 Tage vor Todestag, Gebäudetyp (Einfamilienhaus oder Mehrfamilienhaus), Bauperiode (Altbau bis 1990), Neubau ab 1990).

5.2 Methodik zur Ermittlung der Sterblichkeit in Funktion der Aussen- und Innentemperatur

Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Sterblichkeit wurde anhand einem Case-Crossover Design analysiert (Maclure et al. (41)). Diese Methode findet in epidemiologischen Studien Verwendung, wenn die Gesundheitsdaten auf Individualebene zur Verfügung stehen (d.h. Informationen sind für jeden Fall vorhanden und liegen nicht als aggregiert Daten, wie beispielsweise Anzahl Todesfälle pro Tag und Wohnort, vor). Mit dem Case-Crossover-Design wird untersucht, ob die Hitzebelastung zum Zeitpunkt der Todesfälle im Vergleich zu zufällig gewählten Kontrollzeiträumen anders als erwartet war. Dabei wird der Todestag eines jeden Individuums als Fall betrachtet und die näheren Tage als Kontrollen. Als Kontrollen wurden alle Tage innerhalb des gleichen Monats und Jahres definiert, die den gleichen Wochentag wie der Fallzeitraum hatten. Damit wird in den statistischen Analysen für mögliche zeitliche Trends kontrolliert. Die Aussen- und Innentemperatur wurde somit nicht nur für die Todestage bestimmt, sondern auch für die dazugehörigen Kontrolltage (ca. 3 bis 4 Kontrollen pro Fall). Mit diesem zeitlichen Analyseansatz kann die Wirkung einer ungewöhnlich hohen Temperaturbelastung auf die Sterblichkeit von anderen Faktoren abgegrenzt werden. Faktoren, die die Sterblichkeit ebenfalls beeinflussen können, wie beispielsweise Rauchen oder schlechte Ernährung, stellen in diesem Studiendesign keine Verzerrung dar. Die statistischen Modelle wurden zusätzlich für nationale Feiertagen kontrolliert, da die Sterblichkeit an solchen Tagen leicht erhöht sein kann.

In den Regressionsmodellen zur Ermittlung der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen Todesfällen und Temperatur wurde zudem berücksichtigt, dass die Wirkung der Temperatur verzögert auftreten kann und nicht linear ist (anhand sogenannten Distributed lag Non-linear Models DLNM, Gasparrini et al. (42)). In den Analysen des Swiss TPH zu den Auswirkungen der Aussentemperatur auf die Sterblichkeit werden verzögerte Effekte bis zu einer Woche nach einem Hitzetag berücksichtigt. Die Ergebnisse werden darum für die Aussentemperatur als kumulative Risiken angegeben. Sie beinhalten die Wirkung der Temperatur am Hitzetag (Lag 0) und in den darauffolgenden sieben Tagen (Lag 1-7). Die statistischen Modelle wurden zusätzlich für nationale Feiertage kontrolliert, da die Sterblichkeit an solchen Tagen leicht erhöht sein kann.

Die Resultate von Case-Crossover-Analysen werden als Odds Ratio (OR) angegeben. Die OR ist ein statistisches Mass zur Beurteilung der Stärke des Zusammenhangs zwischen Temperaturexposition und Sterberate und entspricht ungefähr dem relativen Risiko. Es beschreibt das Chancenverhältnis (zwischen Todesfällen und Kontrollzeiträumen), bei einer gewissen Temperatur zu sterben. Wenn die OR grösser als 1 ist, dann ist die Temperatur ein Risikofaktor. So bedeutet beispielsweise ein OR von 1.13 ein 13% erhöhtes Sterberisiko. Bei Werten kleiner 1, hat die Temperatur einen protektiven Effekt. Eine Odds Ratio von 1 bedeutet keinen Effekt. Aufgrund der langen Datenreihe (2003 bis 2016) und dem grossen Studiensample (alle Todesfälle in der Schweiz während der warmen Jahreszeit) kann davon ausgegangen werden, dass die ORs in dieser Studie einen kausalen Zusammenhang beschreiben.

Die Ermittlung der Expositions-Wirkungskurve für die Innentemperatur erfolgte ebenfalls mit dem Case-Crossover-Ansatz. Die Analysen wurden auf Basis der Innentemperatur am Todestag (sowie an den Kontrolltagen) durchgeführt. Das Aussentemperaturgeschehen der vorherigen 14 Tage ist bereits bei der Berechnung der Innentemperaturen berücksichtigt und daher erübrigt sich die Anwendung von DLNM-Modellen. Die beste Expositions-Wirkungskurve wurde zudem anhand dem Akaike-Informationskriterium (AIC) bestimmt. Diese mathematische Methode wird verwendet, um zu bewerten, wie gut ein Modell zu den Daten passt.



5.3 Resultate zum Zusammenhang zwischen Temperatur und Sterblichkeit

Die vorliegenden Analysen basieren auf 301'437 Todesfällen (natürliche Todesursachen) der Swiss National Cohort zwischen 2003 und 2016, für welche Informationen zur Wohnadresse und zum Wohngebäude (Bauperiode und Gebäudetyp) vorhanden waren (Tabelle 21).

	Todesfälle	
Geschlecht / Alter / Grossregion (Kantone)	[Anzahl]	[%]
Schweiz (total)	301'437	100
Männlich	147'026	49
Weiblich	154'411	51
Alter < 75 Jahre	91'211	30
Alter ≥ 75 Jahre	210'226	70
Nordwestschweiz (AG, BL, BS)	41'761	14
Espace Mittelland (BE, FR, JU, NE, SO)	72'896	24
Zürich (ZH)	50'674	17
Zentralschweiz (LU, NW, OW, SZ, UR, ZG)	25'823	9
Ostschweiz (Al, AR, GL, GR, SH, SG, TG)	42'746	14
Genfersee-Region (GE, VD, VS)	53'647	18
Tessin (TI)	13'890	5

Tabelle 21: Studienpopulation, natürliche Todesfälle zwischen Mai und September 2003 bis 2016 in der Schweiz.

Rund 70% der verstorbenen Personen waren älter als 74 Jahre alt. Eine Übersicht zu den Aussenund Innentemperaturen am Todestag wird in Tabelle 22 präsentiert.

Temperatur	Todesfälle	Mittelwert	SD	Min	P05	P50	P95	P99	Max
	[Anzahl]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Tmax outdoor	301'437	23	5	1	14	22	31	34	38
Tmean outdoor	301'437	17	4	-2	10	17	24	26	30
Tmin outdoor	301'437	12	4	-5	6	12	18	19	23
Tmax indoor	301'437	23	2	20	20	23	27	29	33
Tmean night indoor	30'1437	21	1	20	20	20	23	25	29
Tmin indoor	301'437	20	1	20	20	20	21	23	27

Tabelle 22: Temperaturverteilung der modellierten Aussen- und Innentemperatur in °C (Tagesmaximum Tmax, Tagesmittelwert Tmean, Tagesminimum Tmin und Nachtmittel Tmean night) an der Wohnadresse am Todestag (natürliche Todesfälle zwischen Mai und September 2003 bis 2016 in der Schweiz). Outdoor: Aussentemperatur; indoor: Innentemperatur; SD: Standardabweichung; Min: Minimum; P: Perzentil; Max: Maximum.



Tabelle 23 beschreibt zudem die Temperaturverteilung nach Grossregion für die maximale Innen- und Aussentemperatur. Für das Tessin wurden im Innenraum leicht höhere mittlere Werte (24°C) beobachtet als in den übrigen Regionen (22-23°C).

Temperatur	Grossregion	Todesfälle	Mittelwert	SD	Min	P05	P50	P95	P99	Max
		[Anzahl]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Tmax outdoor	Nordwestschweiz	41'761	23	5	7	15	23	32	35	38
	Espace Mittelland	72'896	22	5	4	14	22	30	33	38
	Zürich	50'674	23	5	5	14	22	31	34	37
	Zentralschweiz	25'823	22	5	4	13	22	30	33	36
	Ostschweiz	42'746	21	5	2	12	21	30	33	37
	Genfersee-Region	53'647	23	5	1	15	23	31	34	38
	Tessin	13'890	25	4	7	17	25	32	34	37
Tmax indoor	Nordwestschweiz	41'761	23	2	20	20	23	27	29	32
	Espace Mittelland	72'896	23	2	20	20	23	26	28	32
	Zürich	50'674	23	2	20	20	23	27	29	32
	Zentralschweiz	25'823	23	2	20	20	23	26	28	31
	Ostschweiz	42'746	23	2	20	20	22	26	28	31
	Genfersee-Region	53'647	24	2	20	20	23	27	30	33
	Tessin	13'890	24	2	20	21	24	28	30	33

Tabelle 23: Temperaturverteilung der modellierten maximalen Aussen- und Innentemperatur (Tmax) in °C an der Wohnadresse am Todestag in den sieben Grossregionen der Schweiz (zwischen Mai und September 2003 bis 2016).

Outdoor: Aussentemperatur; indoor: Innentemperatur; SD: Standardabweichung; Min: Minimum; P: Perzentil; Max: Maximum

Abbildung 31 zeigt einen Scatter-Plot der maximalen Innen- und Aussentemperaturen am Todestag. Es wird deutlich, dass für die einzelnen Aussentemperaturen eine relativ grosse Bandbreite an Innentemperaturen geschätzt wurde (z.B. 24°C bis 32°C bei einer Aussentemperatur von 30°C). Dies ist auf unterschiedliche Bauperioden, Gebäudetypen sowie auf das Aussentemperaturgeschehen der vorherigen 14 Tage zurückzuführen.

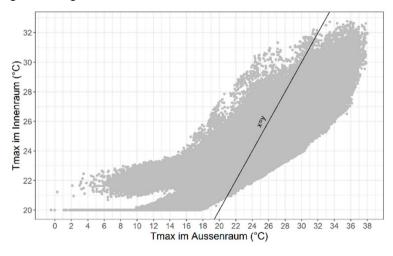


Abbildung 31: Auswertung der berechneten Tageshöchsttemperaturen (Tmax) im Innenraum in Funktion der Tageshöchsttemperaturen im Aussenraum am Todestag.

Die Linie x=y in Abbildung 31 beschreibt den Zustand, wenn die Tageshöchsttemperatur im Aussenund Innenraum gleich hoch ist.



5.3.1 Aussentemperatur

Abbildung 32 zeigt den Zusammenhang zwischen der Aussentemperatur und der Sterblichkeit. Hohe Tmean, Tmax and Tmin erhöhen deutlich die Sterberate. Ab Tmax von 25°C nimmt das Sterberisiko nicht-linear zu und ist deshalb an sehr heissen Tagen hoch. Erreicht die Tmax beispielsweise 33°C, dann erhöht dies die Sterberate um durchschnittlich 21% (95%-Konfidenzintervall KI: 17-25%) im Vergleich zu einem angenehmen Tag mit maximal 22°C. Am grössten ist der Temperatureffekt am Hitzetag selbst (+6% (95%-KI: 4-9%) gegenüber 22°C), und auch an den folgenden vier bis fünf Tagen ist die temperaturbedingte Sterblichkeit signifikant erhöht (verzögerter Effekt des Hitzetags). Während einer Hitzewelle addieren sich die einzelnen tagesspezifischen Effekte. Beispielsweise am zweiten Tag einer Hitzewelle besteht einerseits die Wirkung vom eigentlichen Hitzetag, andererseits erhöht sich diese Wirkung auf die Sterblichkeit durch die verzögerten Effekte des vorherigen Hitzetags.

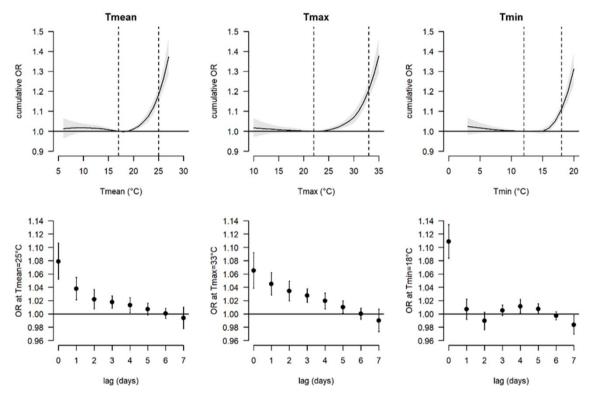


Abbildung 32: Zusammenhang zwischen der Aussentemperatur (Tagesmittel Tmean, Tagesminimum Tmin und Tagesmaximum Tmax) und der Sterblichkeit in der Schweiz während den Monaten Mai bis September 2003 bis 2016.

Die erste Zeile zeigt die Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen Temperatur und Sterblichkeit aufgrund von natürlichen Todesursachen. Dargestellt ist der kumulative Effekt innerhalb von acht Tagen. Als Referenz (Odds Ratio; OR=1) wurde die mittlere Temperatur während der warmen Jahreszeit gewählt. Die vertikalen Linien markieren den Median und das 98. Perzentil der Temperaturverteilung während der warmen Jahreszeit. Eine OR von 1.2 bedeutet beispielsweise eine um 20% erhöhte Sterberate gegenüber der Referenztemperatur. Die Abbildungen in der zweiten Zeile zeigen die tagesspezifischen OR mit 95%-Konfidenzintervallen am Hitzetag (definiert als 98. Perzentil von Tmean, Tmax, Tmin) sowie für die Tage danach (lag 1-7).

Je höher die Temperatur, desto stärker sind die Effekte am Hitzetag und die verzögerten Effekte. Hohe Temperaturen während der Nacht (Tmin) wirken unmittelbar auf die Sterblichkeit, verzögerte Effekte wurden für Nachttemperaturen nicht beobachtet.



Grundsätzlich sind hohe Temperaturen für alle Altersgruppen ein Gesundheitsrisiko. Die älteste Bevölkerung (ab 75 Jahren) ist jedoch aufgrund einer erhöhten altersbedingten Empfindlichkeit (oftmals auch aufgrund von Vorerkrankungen) häufiger und stärker betroffen (Abbildung 33).

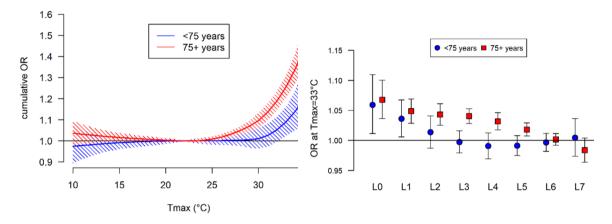


Abbildung 33: Zusammenhang zwischen der Tagesmaximum-Temperatur (Tmax) und der Sterblichkeit nach Altersklasse in der Schweiz während den Monaten Mai bis September 2003 bis 2016 (mit 95%-Konfidenzintervall).

Dargestellt wird die Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen Temperatur und Sterblichkeit aufgrund von natürlichen Todesursachen. Die Abbildung links zeigt den kumulativen Effekt innerhalb von acht Tagen. Als Referenz (Odds Ratio; OR=1) wurde die mittlere Temperatur während der warmen Jahreszeit gewählt (22°C). Der Graph rechts zeigt die tagesspezifischen OR am Hitzetag (≥33°C) (L0) sowie für die Tage danach (lag L1−7).

Die verzögerte Wirkung von Hitze ist bei der älteren Bevölkerung bis fünf Tage nach einem Hitzetag von 33°C signifikant. Bei der jüngeren Bevölkerung ist das hitzebedingte Sterberisiko vor allem am Hitzetag selbst und am darauffolgenden Tag relevant. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus dem Projekt «A.06 Hitze und Gesundheit» ist, dass die am wenigsten privilegierten Bevölkerungsschichten stärker von den Auswirkungen von hohen Temperaturen betroffen sind als andere. Dies liegt sehr wahrscheinlich daran, dass diese Bevölkerungsgruppe mit tiefem sozioökonomischem Status oftmals in Quartieren lebt, die weniger Grünflächen aufweisen und ihre Wohnungen weniger gut gegen Hitze geschützt sind. Zudem arbeiten weniger privilegierte Personen häufiger in Berufen, die stärker durch Hitze betroffen sind (z.B. in der Baubranche).



5.3.2 Innentemperatur

Die Ergebnisse der epidemiologischen Studie in Bezug auf die minimale, maximale und die mittlere Innentemperatur sind in Abbildung 34 dargestellt. Die Innentemperaturen wurden für die statistischen Analysen (Case-Crossover Design) zusätzlich zu den 301'437 Todesfällen für 1'032'707 Kontrolltage bestimmt (3 bis 4 Kontrolltage pro Fall).

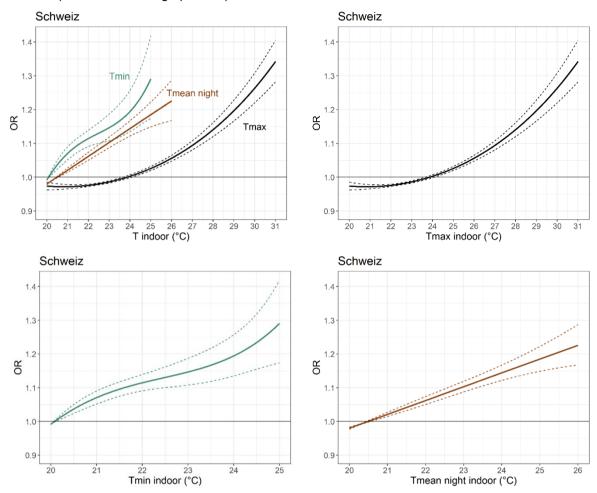


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen der Innentemperatur (Tindoor) und der Sterblichkeit (mit 95%-Konfidenzintervall). Ermittelt anhand der Todesfalldaten der gesamten Schweiz während der warmen Jahreszeit (Mai bis September) 2003-2016 und den modellierten Innentemperaturen.

Lesebeispiel: Eine Odds Ratio (OR) von 1.1 bedeutet im Durchschnitt eine Zunahme der Sterberate in Abhängigkeit der Temperatur um 10%. Eine OR =1 bedeutet kein Effekt (Tmax: Tagesmaximum-Temperatur im Innenraum; Tmin: Tagesminimum-Temperatur; Tmean night: Nachtmittel-Temperatur).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine maximale Innentemperatur zwischen 20°C und 24°C die Sterblichkeit nur geringfügig beeinflusst. Ab einer maximalen Innentemperatur (Tmax indoor) von 22°C steigt die Sterberate aufgrund Wärmeeintrag vom Aussenbereich an und Auswirkungen auf die Sterblichkeit werden ab 24°C relevant. Für die minimale Innentemperatur (Tmin indoor) wird ein Effekt auf die Sterblichkeit (OR >1) schon ab 20°C beobachtet, signifikante Auswirkungen bezüglich der mittleren Nachttemperatur (Tmean night indoor) werden ab ca. 20.5 °C beobachtet. Zu beachten ist, dass die erwähnten Temperaturschwellen für die minimale und maximale Innentemperatur ungefähr dem jeweiligen Mittelwert der berechneten Innentemperatur während der warmen Jahreszeit (Mai bis September) entsprechen. Steigen die Temperaturen also aufgrund des Wärmeintrags von aussen über den langfristig normalen Wert, erhöht dies das Sterberisiko.



Maximale Innentemperaturen über 27°C kommen im Studiensample relativ selten vor. Daher sind die Resultate für den Temperaturbereich ab 27°C (entspricht den 5% höchsten berechneten Temperaturen im Innenraum, siehe Tabelle 22) mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Dies gilt auch für die beiden anderen Innentemperaturindikatoren. In Abbildung 34 wird diese statistische Unsicherheit durch die breiteren 95%-Konfidenzintervalle im oberen Temperaturbereich verdeutlicht. Besonders bei der minimalen Innentemperatur bestehen ab 23°C (den 1% höchsten modellierten Innentemperaturen) relativ grosse Unsicherheiten.

Altersbedingte Unterschiede betreffend die Wirkung von Maximaltemperaturen im Innenraum auf die Sterberate werden nur ab 26°C (den 25% höchsten modellierten Werten) beobachtet (Abbildung 35).

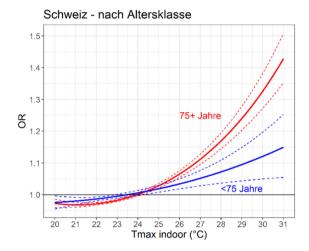


Abbildung 35: Zusammenhang zwischen der modellierten Tagesmaximum-Temperatur im Innenraum (Tmax indoor) und der Sterblichkeit nach Altersklasse in der Schweiz während den Monaten Mai bis September 2003 bis 2016 (mit 95%-Konfidenzintervall).

Lesebeispiel: Eine Odds Ratio (OR) von 1.1 bedeutet im Durchschnitt eine Zunahme der Sterberate in Abhängigkeit der Temperatur um 10%. Eine OR =1 bedeutet kein Effekt.

Ab dieser Temperatur überlappen die 95%-Konfidenzintervalle nicht und es besteht daher ein signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen. Wie für die Aussentemperatur sind die innentemperaturbedingten Auswirkungen auf die Sterberate für Personen ab 75 Jahre signifikant höher als für die Bevölkerung unter 75 Jahre.



Zur besseren Vergleichbarkeit der Expositions-Wirkungskurven wird in Abbildung 36 sowohl die Kurve für die maximale Innen- als auch für die maximale Aussentemperatur gezeigt. Dies erlaubt ein Vergleich der beiden Kurven bezüglich Auswirkungen auf die Sterblichkeit in Folge von Temperaturänderungen. Als Referenztemperaturen (OR=1, kein Effekt) wurde der Median der Aussentemperatur während der warmen Jahreszeit (22°C) und eine typische Innentemperatur (24°C) gewählt. Zu beachten ist, dass für die Aussentemperatur der kumulative Effekt von acht Tagen dargestellt wird (zur Berücksichtigung von verzögerten Effekten). Für den Innenraum wird der Effekt am Todestag gezeigt. Das Aussentemperaturgeschehen während der 14 Tage vor dem Todestag wurde bei der Modellierung der Innentemperatur berücksichtigt.

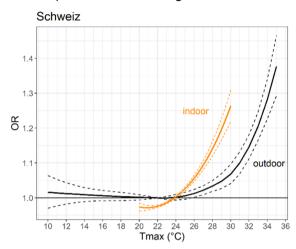


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen der Tagesmaximum-Temperatur (Tmax) und der Sterblichkeit im Innen- (orange Kurve) und Aussenbereich (schwarze Kurve). Ermittelt anhand der Todesfalldaten der gesamten Schweiz während der warmen Jahreszeit (Mai bis September) 2003-2016 sowie den berechneten Innentemperaturen.

Für die Aussentemperatur wird der kumulative Effekt innerhalb von 8 Tagen gezeigt, wobei 22°C als Referenztemperatur (Odds Ratio=1 kein Effekt) gewählt wurde. Bei der Abschätzung der Innentemperatur wurde die Aussentemperatur der letzten 14 Tage berücksichtigt. Lesebeispiel: Eine Odds Ratio (OR) von 1.1 bedeutet im Durchschnitt eine Zunahme der Sterberate in Abhängigkeit der Temperatur um 10%.

Während sich Aussentemperaturen über 26°C negativ auf die Sterblichkeit auswirken, wird ein Effekt der Innentemperatur auf die Sterblichkeit bereits ab 22°C bis 24°C beobachtet. Ab diesen Temperaturen ist in Abbildung 36 eine Steigung der Kurve zu beobachten. Die Effekte auf die Sterblichkeit sind ab einer Temperatur von 25°C im Innenraum (gegenüber der Referenztemperatur von 24°C, OR=1) folglich stärker als für 25°C im Aussenbereich. Es ist davon auszugehen, dass solch hohe Innentemperaturen (ab 25°C) in den meisten Fällen deshalb entstehen konnten, weil es an Tagen davor auch schon sehr warm war und sich der Innenraum dementsprechend erwärmen konnte. Hohe Innentemperaturen am Todestag reflektieren sozusagen die Hitzebelastung im Innen- und im Aussenraum. Während längeren Hitzeperioden besteht auch die Gefahr, dass sich nachts die Innenräume weniger gut abkühlen lassen. Eine fehlende Abkühlung während der Nacht ist eine (zusätzliche) Belastung für die Gesundheit, da die nächtliche Erholung beeinträchtigt wird (siehe auch Abschnitt 5.4).



Es wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Wirkung der maximalen Innentemperatur auf die Sterblichkeit zwischen den Grossregionen gefunden. Die 95%-Konfidenzintervalle der Expositions-Wirkungskurven der sieben Grossregionen in Abbildung 37 und Abbildung 38 überlappen deutlich.

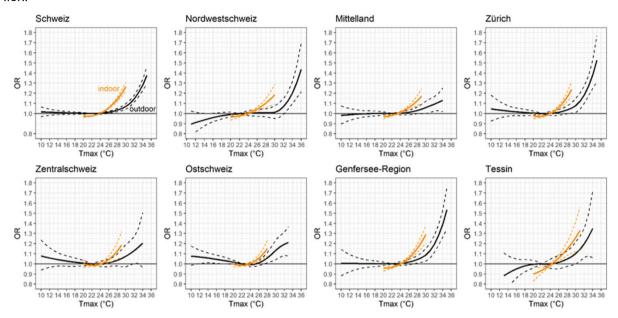


Abbildung 37: Zusammenhang zwischen der Tagesmaximum-Temperatur (Tmax) und der Sterblichkeit im Innen- (orange Kurve) und Aussenbereich (schwarze Kurve) in der Schweiz und in den sieben Grossregionen.

Für die Aussentemperatur wird der kumulative Effekt innerhalb von 8 Tagen gezeigt, wobei 22°C als Referenztemperatur (Odds Ratio=1, kein Effekt) gewählt wurde. Bei der Berechnung der Innentemperatur wurde die Aussentemperatur der letzten 14 Tage berücksichtigt. Lesebeispiel: Eine Odds Ratio (OR) von 1.1 bedeutet im Durchschnitt eine Zunahme der Sterberate in Abhängigkeit der Temperatur um 10%.

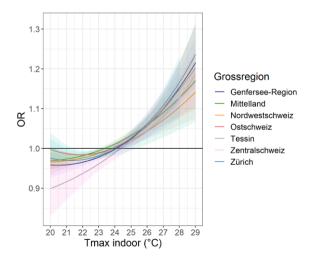


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen der Innentemperatur und der Sterblichkeit in den sieben Grossregionen der Schweiz (mit 95%-Konfidenzintervall), ermittelt anhand der Todesfalldaten während der warmen Jahreszeit (Mai bis September) 2003-2016 sowie modellierten Innentemperaturen.

Lesebeispiel: Eine Odds Ratio (OR) von 1.1 bedeutet im Durchschnitt eine Zunahme der Sterberate in Abhängigkeit der Temperatur um 10%. Eine OR =1 bedeutet kein Effekt.



ResCool befasst sich mit dem Zeithorizont der nächsten 40 Jahre. Bis 2045 soll sich gemäss Hochrechnungen die Bevölkerung im Alter von 75 Jahren und älter gegenüber 2010 verdoppeln (Abbildung 39). Gleichzeitig nimmt die Hitzebelastung zu.

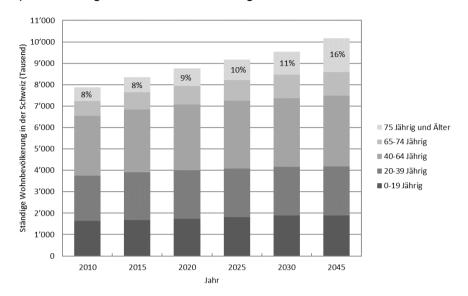


Abbildung 39: Beobachtete und prognostizierte Altersstruktur der ständigen Wohnbevölkerung in der Schweiz zwischen 2010 bis 2045. Quelle: Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2015-2045, BFS 2018. Eigene Darstellung.

Hitzetage (>30°C) werden häufiger und extremer (4). Personen ab 75 Jahre gelten in der Schweiz als die grösste Risikogruppe für hitzebedingte Erkrankungen und Sterblichkeit (Ragettli et al. (43) (44)). Auch die vorliegende Studie zeigt, dass für diese Altersgruppe moderat und extrem heisse Temperaturen eine Belastung für die Gesundheit sind und kurzfristig zu erhöhten Sterberaten führen können. Massnahmen zum Schutz der Gesundheit vor Hitze sind daher für diese Bevölkerungsgruppe besonders wichtig.



5.4 Abhängigkeit der Schlafqualität von der Innentemperatur

Die bevorzugte Temperatur zum Schlafen ist von vielen Aspekten, wie zum Beispiel vom Geschlecht, Alter, Herkunft, persönlichen Empfinden usw., abhängig. Trotzdem ist die bevorzugte Temperatur ein bedeutender Indikator, bei welcher Temperatur sich die Menschen am besten erholen. In Tabelle 24 sind die Resultate verschiedener Studien zusammengestellt, die folgendermassen zusammengefasst werden können: Ab einer Innentemperatur von 24°C wird die Schlafqualität negativ beeinflusst, die beste Schlafqualität wird zwischen 19-21°C erreicht. Ältere Menschen leiden mehr unter einer erhöhten Innentemperatur, erhebliche gesundheitliche Probleme treten bereits unter 25°C auf. Eine Innentemperatur von 26°C soll generell nicht überschritten werden.

Quelle	Temperatur im Schlafzimmer
Harding E. C. et al. (45) Publikation zur Thermoregulation und Schlafqualität.	Menschen regulieren die Temperatur während dem Schlaf, indem sie unbewusst ihre exponierten Oberflächen bei steigenden Umgebungstemperaturen vergrössern. Bei optimalen Raumtemperaturen, etwa 19-21°C versuchen sie, ein Hautmikroklima zwischen 31-35°C herzustellen. Eine Abweichung von diesem Bereich hat einen negativen Einfluss auf den Schlaf.
CIBSE, TM 59 (46) Studienort England	Bei Temperaturen über 24°C wird die Schlafqualität beeinträchtigt. Spitzentemperaturen im Schlafzimmer sollen einen Schwellenwert von 26°C während nicht mehr als 32 Stunden überschreiten.
Troynikov O. et al. (47) Studienort China (Shanghai), Japan	Die Schlafqualität ist bei Temperaturen gleich und grösser 26°C signifikant schlechter als bei tieferen Temperaturen.
van Loenhout J.A.F et al. (48) Studienort Niederlande	Ältere Menschen rapportierten während einer kurzen Hitzewelle im Jahr 2012 mit mittleren Innentemperaturen über 25°C im Schlafraum erhebliche gesundheitliche Probleme (Schlafstörungen, geistige Ermüdung).
Pan Li et al. (49) Studienort China (Shanghai)	Die Ergebnisse zeigen, dass jungen, gesunden Menschen bei einer Innentemperatur von 23°C den ruhigsten Schlaf erlebten, am schnellsten einschliefen und sich nach dem Aufwachen am besten erholt hatten.

Tabelle 24: Untersuchungen zur Schlaftemperatur.

Aus den zwei Betrachtungsweisen der Sterblichkeit und der Schlafqualität kann abgeleitet werden, dass eine maximale Innentemperatur von 23-24°C für den Grossteil der Bevölkerung noch akzeptierbar ist. Die in der SIA Norm 180 festgelegte obere Temperaturgrenze von 26.5°C (für Wohnräume die beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind) und höher Temperaturen (in Räume die natürlich belüftet sind), sind aus Sicht der Schlafqualität und damit auch bezüglich der Erholung der Menschen zu hoch angesetzt. Zu einem ähnlichen Resultat kommt man auch bei der Anwendung der Komfortkriterien für eine liegende Person (20.5°C, +/-2.5°C, 2.1 clo, 0.6 met). Bei Risikogruppen soll die Temperatur während der Nacht im Mittel bei ca. 20.5°C angesetzt werden.



6 Bauliche Integration

In den nachfolgenden Abschnitten wird die bauliche Integration der Kühllösung in Umbauten exemplarisch dargestellt. Da die bauliche Situation für jedes Gebäude unterschiedlich ausfällt, gibt es nicht eine Lösung. Die Beschreibungen sollen Anhaltspunkte geben, welche Punkte beachtet werden sollen. Die Kosten mit der Bezeichnung «Kälteabgabe» beinhalten die Materialkosten für das Kälteabgabesystem, die «Umbauarbeiten» die Kosten für die Arbeitsleistung und die «Nebenkosten» Kosten für Vorbereitungs- und Schutzmassnahmen sowie die Reinigung. Die Aufwände für die Kälteerzeugung sind in den Kosten nicht enthalten, da die Lösungen je nach Situation sehr unterschiedlich ausfallen können. Mögliche Lösungsvarianten sind in Abschnitt 6.5 beschrieben.

Abschnitt 6.7 beschreibt die vorgeschlagenen Massnahmen für den Neubau.

6.1 Nutzung der Fussbodenheizung zur Kühlung

6.1.1 Kälteabgabe

Fussbodenheizungen sind in vielen bestehenden Wohngebäuden anzutreffen. Das bestehende System kann für die Kühlung angepasst werden, indem kaltes Wasser durch die Rohre strömt und einen Teil der anfallenden Wärme im Raum durch den Fussboden abzuführen. Das System hat aufgrund der grossen Fläche zum Raum einen mittleren Wirkungsgrad. Limitierend wirken der Wärmeübergangskoeffizient am Boden (7 W/(m²K)) sowie der Einfluss des Bodenbelags. Dieser soll einen möglichst hohen Wärmeleitwert aufweisen (z.B. Keramik- oder Steinplatten). Die minimale Vorlauftemperaturen soll mindestens 2 K über dem Taupunkt liegen, um eine Kondensatbildung zu vermeiden. Weitere Details zur Fussbodenkühlung sind in Abschnitt 14.4.11 zu finden.

In Abbildung 40 sind die nötigen Anpassungen am Verteiler dargestellt.

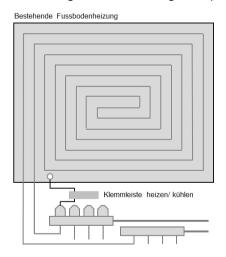
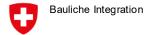


Abbildung 40: Schema der Installation der Klemmleiste im bestehenden Regelsystem der Fussbodenheizung. Quelle: XtegraSol.

6.1.2 Bauliche Massnahmen

Das bestehende Regelungssystem der Fussbodenheizung, mit den dazugehörigen Raumthermostaten und Stellantrieben, muss möglicherweise um eine elektrische Klemmleiste ergänzt werden, die über ein externes Signal von der Heiz- zur Kühlfunktion umschaltet. Die Arbeiten müssen durch einen Elektriker und gegebenenfalls einen Heizungsunternehmer ausgeführt werden.



6.1.3 Kosten bauliche Massnahmen

	1.5-Zimmer Wohnung [CHF]	2.5- Zimmer Wohnung [CHF]	3.5- Zimmer Wohnung [CHF]	4.5- Zimmer Wohnung [CHF]	5.5- Zimmer Wohnung [CHF]	6.5- Zimmer Wohnung [CHF]
Umbauarbeiten	1'000	1'200	1'400	1'600	1'800	2'000
Nebenkosten	200	200	300	300	400	400
Total	1'200	1'400	1'700	1'900	2'200	2'400

Tabelle 25: Approximative Kosten für die Anpassung der Regulierung der Fussbodenheizung für unterschiedliche Wohnungsgrössen (Kosten ohne Mehrwertsteuer). Kostenermittlung Implenia/XtegraSol.

6.1.4 Kälteverteilung

Bei bestehenden Fussbodenheizungen muss die Rohrnetzverteilung nicht angepasst oder erweitert werden. Es ist keine zusätzliche Steigzone erforderlich, da in der Technikzentrale das Kältenetz an die Heizgruppe angeschlossen wird.

6.1.5 Steigzone

Es sind keine zusätzlichen Rohrleitungen in den Steigzonen erforderlich, da in der Technikzentrale die bestehende Heizgruppe an die Kälteversorgung angeschlossen wird.

6.2 Deckenkühlsysteme einbauen

6.2.1 Kälteabgabe

Deckenkühlungen können in bestehenden Räumen nachträglich an der Decke befestigt und je nach Type auch vollflächig verlegt werden. Es sind verschiedene Arten von Deckenkühlsystemen verfügbar, wobei nachfolgend zwei Systeme, das Nass- und Trockenbausystem beschrieben werden.

6.2.2 Verlegeart

Beide Systeme kommen als Single-Rohr Verlegung (Einrohr, analog der konventionellen Fussbodenheizung) oder Multi-Rohr Verlegung (Sammelrohr mit mehreren parallel angeschlossenen Rohren) zum Einsatz.

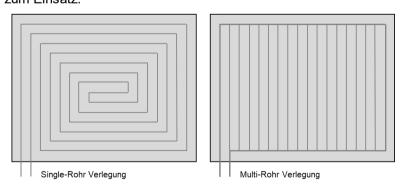


Abbildung 41: Schema der Single-Rohr Verlegung (links) und der Multi-Rohr Verlegung (rechts). Quelle: XtegraSol. Im ersten Fall werden mehrschichtige Verbundrohre oder andere Rohrmaterialien wie Polypropylen, Polybuten, Polyethylen, Kupfer usw. verwendet.







Abbildung 42: Single-Rohr Verlegung direkt an der Decke vor dem Verputzen. Es sind Rohrdurchmesser von 10 mm bis 16 mm möglich. Quelle: Xtegrasol.

Das an der Decke installierte Kälteabgabesystem hat aufgrund der grossen gekühlten Fläche zum Raum und der Konvektionsströmung der warmen Luft an der gekühlten Decke einen hohen Wirkungsgrad. Die minimale Kaltwasser-Vorlauftemperaturen soll mindestens 2 K über dem Taupunkt liegen, um eine Kondensatbildung zu vermeiden.

6.2.3 Nasssystem

Das Rohr wird mit einem zementgebundenen Putz oder Lehmputz überzogen. Dabei ist eine Überdeckung von ca. 10 mm nötig, was je nach Rohrdimension mit einem Durchmesser von 5 mm (z.B. Multi-Rohr Kapillarrohrmatten) bis zu 16 mm (Single-Rohr Verlegung), inklusive der Befestigungseinrichtung, eine Gesamtputzstärke von 15 mm bis 30 mm bedingt. Weitere Details zum System der Kapillarrohrmatten – das in den Berechnungen (Abschnitt 3.3 und 3.4) verwendet wurde – sind in Abschnitt 14.4.11 zu finden.

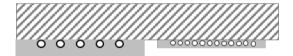
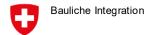


Abbildung 43: Deckenkühlung im Nassbausystem. Single-Rohr Verlegung (links) und Kapillarrohrmatte (rechts). Quelle: XtegraSol.

6.2.4 Trockenbausystem

Beim Trockenbausystem wird auf die bestehende Decke eine Unterkonstruktion aus Metall, Kunststoff oder Holz montiert und diese danach mit Metallplatten oder Trockenbauplatten (Gipsfaser-, Gipskarton- oder Holzfaserverbundplatten) abgedeckt.

Das Single- oder Multi-Rohr kann direkt zwischen der Unterkonstruktion an die bestehende Decke befestigt werden. Dabei entsteht eine isolierende Luftschicht zwischen Rohr und Trockenbauplatte, was die Kühleffizienz reduziert. Alternativ kann das Rohr auf die Rückseite der Trockenbauplatte befestigt werden, wobei oft Wärmeleitprofile eingesetzt werden.



Bei der Metallkühldecke wird das Rohr mit Wärmeleitprofilen fest mit der Kühlfläche verbunden. Weitere Details zur Metallkühldecke – die in den Berechnungen (Abschnitt 3.3 und 3.4) verwendet wurde – sind in Abschnitt 14.4.12 zu finden.

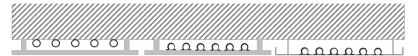


Abbildung 44: Deckenkühlung im Trockenbausystem. Rohr an bestehende Decke befestigt (links) oder an der Kühldeckenplatte mit Wärmeleitrippen befestigt (Mitte). Montageaufbau der Metallkühldecke (rechts). Quelle: XtegraSol.

6.2.5 Bauliche Massnahmen

Beim Nassbausystem wird die Decke für die Befestigung der Kälterohre, beim Trockenbausystem für die Aufnahme der Unterkonstruktion vorbereitet.

6.2.6 Kosten Kälteabgabe und bauliche Massnahmen

Die Kosten umfassen die Kälteabgabe im Nass- und Trockensystem (exkl. Metallkühldecke) für den Wohnraum und die Zimmer.

	1.5-Zimmer Wohnung [CHF]	2.5-Zimmer Wohnung [CHF]	3.5-Zimmer Wohnung [CHF]	4.5-Zimmer Wohnung [CHF]	5.5-Zimmer Wohnung [CHF]	6.5-Zimmer Wohnung [CHF]
Nasssystem						
Kälteabgabe	1'600	2'500	3'100	4'000	5'400	7'100
Umbauarbeiten	1'500	2'500	3'200	3'900	5'300	6'700
Nebenkosten	900	1'200	1'500	1'800	2'400	2'900
Total	4'000	6'200	7'800	9'700	13'100	16'700
Trockensystem						
Kälteabgabe	1'800	2'900	3'600	4'600	6'300	8'200
Umbauarbeiten	3'100	5'000	6'300	7'900	10'700	13'800
Nebenkosten	1'100	1'600	2'000	2'500	3'300	4'100
Total	6'000	9'500	11'900	15'000	20'300	26'100

Tabelle 26: Approximative Kosten für Nass- und Trockensysteme für unterschiedliche Wohnungsgrössen (ohne Mehrwertsteuer). Kostenermittlung Implenia/XtegraSol.



6.3 Kälteverteilung installieren

Für die Deckenkühlung ist eine Anschlussleitung von der Kühlstelle bis zum Kühlverteiler zu erstellen. Dabei werden die isolierten Zuleitungen in der Regel an der Decke in der Wand oder im Korridor geführt.

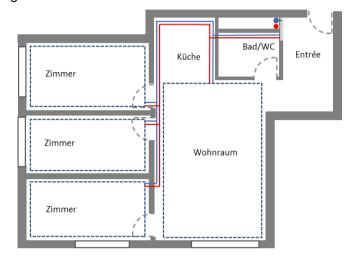
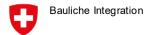


Abbildung 45: Rohrführung zwischen dem Kälteabgabesystem und dem Kälteverteiler in einer typischen 4 ½ Zimmerwohnung. Mögliche Kühlbereiche sind gestrichelt dargestellt. Quelle: XtegraSol.

6.3.1 Kosten Kälteverteilung

	1.5-Zimmer Wohnung [CHF]	2.5-Zimmer Wohnung [CHF]	3.5-Zimmer Wohnung [CHF]	4.5-Zimmer Wohnung [CHF]	5.5-Zimmer Wohnung [CHF]	6.5-Zimmer Wohnung [CHF]			
Nassbausystem									
Umbauarbeiten	300	400	700	800	1'000	1'200			
Nebenkosten	100	100	200	300	300	300			
Total	400	500	900	1'100	1'300	1'500			
Trockenbausystem									
Umbauarbeiten	500	800	1'100	1'600	1'900	2'200			
Nebenkosten	100	200	300	400	400	500			
Total	600	1'000	1'400	2'000	2'300	2'700			

Tabelle 27: Approximative Kosten für die Kälteverteilung für unterschiedliche Wohnungsgrössen (ohne Mehrwertsteuer). Kostenermittlung Implenia/XtegraSol.



6.4 Kälteverteiler nachrüsten

Die gewählte Lösung hängt vom vorhandenen Platz ab. Der vorhandene Heizverteiler kann entweder erweitert oder durch einen zusätzlichen Verteiler im Verteilkasten ergänzt werden. Reicht dazu der Platz nicht aus, muss ein neuer Verteilkasten mit dem darin integrierten Kälteverteiler installiert werden.

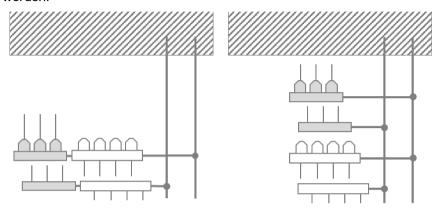


Abbildung 46: Vorhandener Verteiler im Verteilkasten ergänzt (links). Zusätzlicher Verteiler in den Verteilkasten integriert. (rechts). Quelle: XtegraSol.

6.4.1 Kosten Erweiterung Kälteverteiler

	1.5-Zi Wohnung [CHF]	2.5-Zi Wohnung [CHF]	3.5-Zi Wohnung [CHF]	4.5-Zi Wohnung [CHF]	5.5-Zi Wohnung [CHF]	6.5-Zi Wohnung [CHF]
Kühlkreis am bestehenden Verteile	er der Fussbode	enheizung ergär	nzen			
Kälteverteiler	500	600	700	800	900	1000
Umbauarbeiten	100	100	200	200	300	300
Nebenkosten	400	500	500	500	500	600
Total	1'000	1'200	1'400	1'500	1'700	1'900
Neuer Verteiler für die Kühlkreise	oberhalb des Ve	erteilers der Fus	sbodenheizung	ı ergänzt		
Kälteverteiler	1'500	1'600	1'700	1'800	1'900	2'000
Umbauarbeiten	500	500	500	800	800	900
Nebenkosten	700	700	700	800	800	800
Total	2'700	2'800	2'900	3'400	3'500	3'700

Tabelle 28: Approximative Kosten für die Erweiterung und Integration des Kälteverteilers (ohne Mehrwertsteuer). Kostenermittlung Implenia/XtegraSol.

6.5 Kühlenergie verrechnen

Die Verrechnung der bezogenen Kühlenergie soll bedarfsabhängig erfolgen. Die Energiekosten sind wegen der kurzen jährlichen Betriebsdauer eher gering. Je nach der gewählten Kälteerzeugung und Kälteabgabe sind die Investitionskosten jedoch hoch. Die Abrechnung kann im Sinne eines Grundund eines Energiepreises erfolgen. In Mehrfamilienhäusern eignet sich eine wohnungsweise Erfasung und Abrechnung in Analogie zu der bekannten Heizkostenabrechnung. Je nach der Funktionalität des Energiezählers, der meist im Verteilkasten montiert ist, kann der Kältebezug direkt abgelesen werden. Ist der Zähler dafür nicht ausgerüstet, muss ein separater Kältezähler installiert werden.



6.6 Kälteerzeugung

Je nach Alter des Gebäudes und der technischen Anlagen sind unterschiedliche Lösung für die Einbindung der Kälteerzeugung möglich. Dabei ist zu beachten, dass der grösstmögliche Anteil der bestehenden Technik weiterhin genutzt wird. In den meisten Fällen können die nachfolgend aufgeführten Lösungsmöglichkeiten unterschieden werden:

Ersatz

- Ersatz eines Öl- oder Gasheizkessels durch eine multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe oder eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonden oder Grundwasser. Die Erdwärmesonden oder das Grundwasser werden im Sommer für die Direktkühlung genutzt.
- Ersatz eines Öl- oder Gasheizkessels durch den Anschluss an ein Fernwärme- und Fernkälteverbund

Erweiterung

- Erweiterung eines bestehenden Fernwärmeanschlusses mit einem Fernkälteanschluss
- Umbau einer bestehenden Luft-/Wasserwärmepumpe in eine multifunktionale Wärmepumpe für die Wärme- und Kältebereitstellung

Nachrüstung

Integration einer Kältemaschine

6.7 Lösung im Neubau

Im Neubau soll die langfristig benötigte Infrastruktur bei der Erstellung eingebaut werden, um spätere hohe Folgekosten zu vermeiden.

6.7.1 Kühlsystem im Boden oder der Decke einbauen

Die temperaturkritischen Räume sollen mit einem kombinierten Heiz-/Kühlsystem (Boden- oder Deckensystem) ausgerüstet werden, das über eine Direktkühlung (Erdwärmesonden, Grundwasser) oder eine multifunktionale Wärme- und Kälteerzeugung versorgt wird. Die nötige Messinfrastruktur für die Abrechnung der Energiekosten muss ebenfalls integriert werden.

6.7.2 Vor- und Rücklauf für Frischwasser

Das Schlafzimmer soll mit einem Frischwasseranschluss ausgerüstet sein. Damit ist eine Direktkühlung, zum Beispiel für eine Bettenkühlung, einfach möglich. Um ein umständliches Schlauchkonzept zu vermeiden, soll das Rücklaufwasser durch den gleichen Anschluss abführbar sein. Vorstellbar ist ein Rohr in Rohrsystem. Eine Lösung dazu müsste entwickelt werden.

6.7.3 Kälteanschluss vorsehen

Will ein Investor keine (Vor)investitionen tätigen, soll in den Steigschächten etagenweise ein Leitungsabgang vorgesehen werden, damit zu einem späteren Zeitpunkt die Versorgung der Kühlflächen ab diesem Abgang erfolgen kann (siehe Kälteverteilung im Umbau, Abschnitt 6.3)

7 Empfehlungen für Anspruchsgruppen

Die Sicherstellung eines auf den Klimawandel ausgerichteten Gebäudeparks betrifft verschiedene am Bau beteiligte Anspruchsgruppen. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchung für eine ausgewählte Anzahl aus dieser Anspruchsgruppe zusammengefasst.

Mit dem Klimawandel steigen die Aussentemperaturen weiter an. Das in dieser Untersuchung verwendete Medianjahr 2060²⁰ entspricht, bezüglich der mittleren Sommertemperatur, dem Jahr 2018, das heisse Jahr 2060²⁰ dem Jahr 2003. Die damaligen Extremjahre²¹, mit ihren bekannten Folgen, werden zukünftig zum Standard. Die lange Lebensdauer der Gebäude bedingt bei der Planung und Realisierung eine zeitliche Perspektive von 40 bis 60 Jahren. Die Gebäude sollen bereits heute auf das Klima bis ins Jahr 2080 vorbereitet sein (Abschnitt 3.1).

7.1 Investoren und Immobilienbesitzende

Mit dem Klimawandel planen

Das Bedürfnis nach Kühlung nimmt zu, vor allem mit der demografischen Entwicklung (Abschnitt 5.3). Die Einhaltung einer akzeptierbaren Innentemperatur kann zukünftig ein Kriterium für die Vermietbarkeit von Liegenschaften sein. Die Extremjahre²¹ 2003 und 2018 waren noch Einzelfälle, womit das Mieterverhalten bezüglich Hitzeereignissen noch ungenügend abschätzbar ist. Werden solche klimatischen Verhältnisse zum Standard – wie sie das Medianjahr 2060 und das heisse Jahr 2060 zeigen –, sind Mieterfluktuationen wahrscheinlich. Das bedingt eine vorausschauende Planung bei der Standortwahl und der Aus- und Nachrüstung der Gebäude mit Kühllösungen, unter Berücksichtigung der klimatischen Veränderungen.

Portfolio an das Klima adaptieren

Wie es zu Forderungen für Mietzinsreduktionen bei zu kalten Innentemperaturen kommen kann, ist es nicht ausgeschlossen, dass zukünftig Forderungen wegen zu heissen Innentemperaturen geltend gemacht werden. Eine Portfolioanalyse der Liegenschaften bezüglich der Einhaltung von akzeptierbaren Innentemperaturen auch in Zukunft wäre sinnvoll.

Standorte erweitert analysieren

Bei der Standortbewertung werden Kriterien zum thermischen Aussen- und Innenkomfort ergänzt werden müssen.

Klimagerecht bestellen

Es wäre sinnvoll, im Pflichtenheft konkrete Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz im Aussenbereich (z.B. Aufzeigen der Vermeidung von Hitzeinseln, Darstellung der Durchströmung im Quartier) und für die Gebäudegestaltung (z.B. Darstellung von luftoffenen Gebäuden und einer klimagerechten Anordnung der Räume) zu definieren. Mit der Gestaltung des Aussenraums und baulichen Massnahmen am Gebäude kann der Wärmeeintrag stark verringert (Abschnitt 1.1.5) und die nächtliche Auskühlung forciert werden. Ein Nachweis der Einhaltung des thermischen Komforts (Tag und Nacht) mit einer Simulationsberechnung für das Quartier und das Gebäude sollte bereits in der frühen Planungsphase zum Standard werden.

²⁰ Für die Zeitperiode 2045-2074 entspricht das Medianjahr 2060 bezüglich der mittleren Sommertemperatur dem Jahr 2018, das heisse Jahr 2060 (Häufigkeit alle 5 bis 10 Jahre) dem Jahr 2003. Zu beachten ist, dass die Hitzeperioden in den beiden Klimadatensätzen 2003 und 2018 ausserordentlich lang sind und ungefähr einer 50-jährlichen Häufigkeit entsprechen.

²¹ Seit Beginn der systematischen Messungen (1864) war das Sommerhalbjahr 2018 (April bis September) das bisher wärmste. Wie schon 2003 und 2015 waren 2018 zahlreiche hitzebedingte Todesfälle zu beklagen. Während 2003 von Juni bis August 1000 Personen mehr starben als im gleichen Zeitraum in früheren Jahren (Zusatzsterblichkeit von 6.9 %), waren es 2015 schätzungsweise 800 Todesfälle mehr (Zusatzsterblichkeit von 5.4 %). 2018 gab es im Juni und Juli keine erhöhte Sterblichkeit, aber im August erhöhte sich die Sterblichkeit um rund 200 Todesfälle (3.4 % mehr als im Schnitt). (BAG, 2019)



Mit der gleichen Infrastruktur heizen und kühlen

Neu- und Umbauten sollten mit einer kombinierten Heiz-/Kühllösung ausgestattet werden (Abschnitt 3.3.5-3.3.7 und Abschnitt 3.4.5-3.4.7). Als Minimallösung ist es sinnvoll, das Leitungssystem für die Raumkühlung von der Energiezentrale in die Wohnungen zu führen und für den späteren Anschluss vorzubereiten (Abschnitt 6).

Innentemperatur auf den Menschen ausrichten

In Anbetracht der Gesundheitsrisiken sollten Liegenschaften, die auf Risikogruppen ausgerichtet sind, bezüglich des thermischen Komforts und der Wahl der maximal akzeptierbaren Innentemperaturen differenziert behandelt werden (Abschnitt 5.3.2).

Frühzeitig und gemeinsam entwerfen

ArchitektInnen und Planende nehmen eine wichtige Rolle bei der Mitgestaltung der Bauprojekte in Zusammenarbeit mit Investoren, Immobilienbesitzenden und Behörden ein. Ein frühzeitiger Einbezug wird dringend empfohlen, da bereits mit dem ersten städtebaulichen Entwurf wesentliche Entscheide im Hinblick auf einen klimagerechten Aussenraum geschaffen werden. Dieses Vorgehen trifft auch auf die Gestaltung der Gebäudevolumetrie, die Anordnung der Räume im Gebäude und das Sonnenschutzkonzept zu. Dies reduziert den Bedarf an Technik zur Sicherstellung eines akzeptierbaren Raumkomforts und spart so Ressourcen und Kosten (Abschnitt 1.1.3 und Abbildung 2).

Mietende involvieren

Mietende sollten zu den durch sie beeinflussbaren Möglichkeiten für den sommerlichen Wärmeschutz jährlich informiert werden. Damit wären sie in der Lage, ihren Beitrag für akzeptierbare Innentemperaturen zu leisten (Bedienung des Sonnenschutzes, Nachtauskühlung mit Fensterlüftung (Abschnitt 1.1.5)). Ein Hinweis zur Vorkühlung der Räume vor Hitzewellen und zur Nachkühlung nach Hitzewellen kann den Innenkomfort stark erhöhen. Abhängig vom Mietverhältnis könnte auch ein Hinweis auf die goldenen Regeln für Hitzetage des BAG sinnvoll sein (2).

7.2 ArchitektInnen und Planende

Beratend einwirken

Sollten die Bestellenden dem klimagerechten Bauen aus Sicht der ArchitektInnen und Planenden zu wenig Rechnung tragen, wäre eine beratende Unterstützung angebracht.

Komfort thematisieren

Damit der Komfort im Wohngebäude langfristig sichergestellt werden kann, soll die maximal akzeptierbare Innentemperatur, zur Berücksichtigung der Erholung des Menschen und der Gesundheitsrisiken, mit den Bestellenden thematisiert werden (Abschnitt 5.3.2). Dies vor allem in einem Zeitraum, in dem die SIA 180 noch von höheren zulässigen maximalen Temperaturen ausgeht (Abschnitt 3.2).

Fensterlüftung optimieren

Die Fensterlüftung ist weiterhin die wichtigste Kühllösung (Altbau Abschnitt 3.3.1, Neubau Abschnitt 3.4.1). Im architektonischen Entwurf sollen die Fensteröffnungen und die Räume so angeordnet werden, dass eine maximale Querlüftung möglich ist. Simulationsberechnungen in einer frühen Entwurfsphase unterstützen die konzeptionelle Lösungsfindung massgeblich.

Kühlpotential des Aussenraums berücksichtigen

Die thermische Situation im Aussenraum hat einen grossen Einfluss auf die Aussentemperatur und somit auf die Kühlwirkung der Fensterlüftung und auf das generelle Abkühlverhalten der Gebäude während der Nacht und kühleren Wetterperioden. Wegen dieser Bedeutung soll die Interaktion

zwischen Gebäude und Aussenraum – im Sinne eines umfassenden sommerlichen Wärmeschutzes – in das bauklimatische Konzept einfliessen.

Mit der gleichen Infrastruktur heizen und kühlen

Als ergänzende Kühllösung soll eine kombinierte Heiz-/Kühllösung mit einem bauteilintegrierten Kälteabgabesystem gewählt (Abbildung 11 bis Abbildung 14) und nach den Grundsätzen von Abschnitt 3.5 dimensioniert werden.

Treibhausgasemissionen aus der Erstellung beachten

Mit der Minimierung der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung der Kühllösungen wird ein Beitrag zur Zielerreichung Netto-Null geleistet. Einen grossen Einfluss hat vor allem das Kälteabgabesystem (Abbildung 11 bis Abbildung 14, Abschnitt 14.6) wegen seiner meist grossflächigen Ausbreitung.

Bestand sinnvoll ertüchtigen

Es sind viele Bauten im Gebäudebestand vorhanden, die bei ihrer Planung nicht auf die Klimaerwärmung ausgerichtet wurden. Wegen ihrer langen Lebensdauer ist zukünftig kein umfassender Umbau geplant. Aus Sicht einer Langfristplanung wäre es angebracht, das Liegenschaftsportfolio auf seine Tauglichkeit zur Einhaltung akzeptierbarer Innentemperaturen zu prüfen. In einem Stufenplan könnten Nachrüstungsschritte bis zum nächsten Umbau geplant werden. Bei dieser Planung soll darauf geachtet werden, dass die Lebensdauer und der Materialaufwand der Nachrüstung mit der Nutzungsdauer bis zum nächsten Umbau übereinstimmen oder die Installationen nach dem Umbau weiter genutzt werden können. Andernfalls werden weitere Treibhausgasemissionen durch die Erstellung verursacht, die in einem schlechten Verhältnis zum Nutzen stehen.

Konventionellen Weg verlassen

Es wäre wünschenswert, wenn sich ArchitektInnen und Planende auch mit einer alternativen Kühllösung, wie zum Beispiel der Bettenkühlung, auseinandersetzen würden (Abschnitt 4). Vor allem für bestehende Bauten sind die klimatischen Ertüchtigungsmöglichkeiten eingeschränkt.

7.3 Behörden

Raumplanung wirkt steuernd

Bei der Nutzung des Raumes und des Bodens stossen viele Interessen aufeinander, auch solche für ein auf den Klimawandel adaptiertes bzw. ausgerichtetes Bauen. Durch eine geeignete übergeordnete Planung können Grünflächen und gut durchströmte örtliche Räume geschaffen werden (Abschnitt 1.1.5), die eine langfristige Standortqualität ermöglichen. Vorgaben zum sommerlichen Wärmeschutz im Aussenraum sollten so festgelegt werden, dass sie reglementierend wirken, aber gleichzeitig innovative individuelle Lösungen zulassen und unterstützen.

Frühzeitig Anreize schaffen

Das volle Ausmass des Klimawandels auf den Komfort in den Gebäuden wird erst in (naher) Zukunft umfassend spürbar. Weitgehende Investitionen in den sommerlichen Wärmeschutz sind aber bereits heute bei Neu-, Um- und bestehenden Bauten nötig, um negative Folgen für den Menschen, hohe Gesundheitskosten und Folgekosten für bauliche Anpassungen zu vermeiden. Steuerliche Anreize oder Förderprogramme könnten vor allem private Investoren motivieren, in den umfassenden sommerlichen Wärmeschutz zu investieren.

Um einen Anreiz zu schaffen, könnte die Behörde einen Nutzungsbonus²² und/oder eine Abweichung von der Regelbauweise, für Architekturprojekte mit einem innovativen sommerlichen Wärmeschutz mit positiver Auswirkung auf benachbarte Parzellen, gewähren.

²² Viele Kantone kennen den Nutzungsbonus bei der Erfüllung von Qualitätszielen, etwa hinsichtlich der zulässigen Ausnutzung, der Gebäudehöhe oder der Anzahl Geschosse. Ein Qualitätsziel ist beispielsweise ein erhöhter Energiestandard.



7.4 Normengremien

Komfort auch in Zukunft sicherstellen

Um den Erkenntnissen aus den Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Sterblichkeit und der Innentemperatur sowie der nächtlichen Erholung Rechnung zu tragen, müsste in der SIA 180 (1) eine differenzierte Anforderung für die zulässige maximale Innentemperatur am Tag und in der Nacht festgelegt werden. Sowohl die zulässige maximale Temperatur am Tag und in der Nacht von 26.5°C²³ für gekühlte Wohnbauten und über 29°C²³ für ungekühlte Wohnbauten ist zu hoch angesetzt.

Sommerlichen Wärmeschutz ausweiten

Die Gestalt und die Gestaltung des Aussenraums haben einen grossen Einfluss auf die klimatischen Bedingungen ausserhalb und innerhalb der Gebäude. Ein klimatisch optimal gestalteter Aussenraum reduziert den Bedarf an baulich/technischen Lösungen und vermeidet damit zusätzliche Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb. Deshalb ist es sinnvoll, den sommerlichen Wärmeschutz auf den Aussenraum auszudehnen.

7.5 Mietende

Einen eigenen Beitrag leisten

Mietende können wesentlich zu akzeptierbaren Innentemperaturen beitragen. Dies durch das Umsetzen der Vorschläge zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes (Bedienung des Sonnenschutzes, Nachtauskühlung mit Fensterlüftung, Vor- und Nachkühlen der Räume bei Hitzewellen) und der goldenen Regeln für Hitzetage des BAG (2).

Vorhandene Infrastruktur nutzen

Klärung mit der Hausverwaltung, ob eine Kühlung von temperaturkritischen Räumen über die Fussbodenheizung möglich ist (Abschnitt 3.3.5).

Neue Lösungen ausprobieren

Das Bauen ist geprägt von langen zeitlichen Zyklen. Um unkonventionelle Lösungen – wie zum Beispiel die Bettenkühlung (Abschnitt 4) – auszuprobieren und so deren Weiterentwicklung zu unterstützen, sind Pioniere nötig.

²³ Die Werte beziehen sich auf den gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden. Der erste Wert gilt für einen gleitenden Mittelwert ab 17°C für gekühlte Räume, der zweite Wert für ungekühlte Wohnbauten für einen gleitenden Mittelwert von 21.5°C (siehe Abschnitt 3.2).

7.6 Schlüsselerkenntnisse

Die Erkenntnisse der Untersuchung werden in Kurzform wie folgt zusammengefasst (siehe auch den Abschnitt Zusammenfassung und den Abschnitt Schlussfolgerung und Fazit):

- In der Periode 2045-2074 werden Temperaturen wie im Jahr 2003 und 2018 zum Standard.
- Alle Gebäude sind wegen ihrer langen Lebensdauer vom Temperaturanstieg betroffen.
- Die Fensterlüftung ist weiterhin die wichtigste Kühllösung. Bei einer gegenüber der SIA 180 verschärften Temperaturanforderung von maximal 24°C am Tag und 21°C während der Nacht kann die Fensterlüftung den Komfort während 20%, bei maximal 26°C am Tag und 24°C in der Nacht während 70% der Belegungszeit sicherstellen (Standort Basel-Binningen).
- Eine Überprüfung des Immobilienportfolios bezüglich der Einhaltung von akzeptierbaren Innentemperaturen in der Zukunft ist zu empfehlen.
- Die Innentemperaturen werden zu hoch, vor allem in der Nacht und für die ältere Bevölkerung. Gemessen an den Gesundheitsrisiken wäre es angebracht, die in der Normen SIA 180 (1) definierten zulässigen maximalen Temperaturen anzupassen und mit einer Anforderung für Schlafzimmer (Nacht) zu ergänzen.
- Der sommerliche Wärmeschutz im Aussenraum und am Gebäude sollte schon während der Wettbewerbsphase intensiv behandelt werden. Ein Bonus für innovative Lösungen beschleunigt die Umsetzung.
- Sinnvollerweise wird die Wohnbevölkerung zum Verhalten vor, während und nach Hitzewellen jährlich informiert.
- Personenbezogene Kühlkonzepte (Bettenkühlung, tragbare Kühlelemente und kühlende Textilien) sollten eingesetzt und weiterentwickelt werden.
- Es wird vorgeschlagen, kombinierte Heiz-/Kühlsysteme in Neu- und Umbauten zu installieren. Minimal ist der Einbau der zentralen Infrastruktur sinnvoll.



8 Schlussfolgerung und Fazit

Vorgehen und Methode

Die Untersuchung zeigt konkrete Lösungen auf, wie der Komfort für den Menschen in Neu-, Um- und bestehenden Wohnbauten unter dem Einfluss des Klimawandels in einem erträglichen Bereich gehalten werden kann. Dieser Frage wird sowohl aus epidemiologischer als auch aus technischer Sicht nachgegangen. Aus epidemiologischer Sicht wird geklärt, ob die in den Normen zulässigen Temperaturen mit den Erkenntnissen aus dem Zusammenhang zwischen Sterblichkeit und Innentemperatur und der nächtlichen Erholung übereinstimmen. Aus technischer Sicht wird die Leistungsfähigkeit verschiedener Kühllösungen untersucht. Dazu wird eine Kältemaschine mit Hybridkühler, ein Hybridkühler, eine Luft-/Wasserwärmepumpe im Kühlbetrieb, die Kühlung über Erdwärmesonden, Grundwasser und Seewasser (Fernkälte) in Verbindung mit verschiedenen Kälteabgabesystemen untersucht. Diese umfassen die Fussbodenheizung, das thermoaktive Bauteilsystem, die Metallkühldecke, die Kapillarrohrmatte und einen Radiator. Als dezentrale raumweise Systeme werden die Fensterlüftung und ein mobiles Kühlgerät untersucht. Die lokalen Kühllösungen umfassen einen Standventilator, ein auf dem Körper tragbares Kühlelement (Wearable), eine Bettenkühlung und kühlende Textilien. Die Kühllösungen werden in einen Neu- und einen Altbau integriert und umfassend bewertet. Die Bewertung erfolgt bezüglich ihrer Wirksamkeit (Überhitzungsstunden), der Kosten aus Erstellung, Betrieb und Rückbau, ihren Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb, ihrer Akzeptanz und des Ausführungszeitpunkts ihrer baulichen Integration. Da die Bewertung der Kühllösungen stark von den klimatischen Bedingungen²⁴ abhängig ist, wurden zusammen mit MeteoSchweiz konsistente Klimadaten für die Zeitperiode 2045-2074 identifiziert.

Die Temperatur im Aussen- und im Innenraum steigt weiter an

Der Klimawandel führt zu einer globalen Erwärmung der erdnahen Atmosphäre und der Meere. Diese Erwärmung liegt heute im weltweiten Durchschnitt um ca. 1°C (3) über der Temperatur der vorindustriellen Zeit. Ohne greifende Massnahmen zur drastischen Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen, ist bis zum Ende des Jahrhunderts von einem durchschnittlichen globalen Temperaturanstieg von mehr als 5°C auszugehen. Mit den Zielsetzungen des Pariser Übereinkommens soll die durchschnittliche globale Erwärmung deutlich unter 2°C begrenzt werden, wobei ein maximaler Temperaturanstieg von 1.5°C angestrebt wird. Die Schweiz hat bereits einen höheren Temperaturanstieg als der globale Mittelwert zu verzeichnen, der einen Einfluss auf den thermischen Komfort des Menschen und den Energiebedarf für die Raumkühlung hat. Die mittlere Sommertemperatur, der Referenzperiode 1981 bis 2010, liegt in der Schweiz um 1.6°C über der Temperatur der vorindustriellen Zeit (siehe Abschnitt 3.1).

In der vorliegenden Untersuchung wird, für die Periode 2045-2074, von einem zusätzlichen Anstieg der mittleren Sommertemperatur von 2.5°C – bezeichnet als «Medianjahr 2060» – und mit einer Häufung alle 5-10 Jahre von einem Anstieg von 4.1°C – bezeichnet als «heisses Jahr 2060» – ausgegangen. Das Medianjahr 2060 entspricht bezüglich der mittleren Sommertemperatur dem Jahr 2018, das heisse Jahr 2060 dem Jahr 2003. Die zukünftigen Häufigkeiten dieser Jahre wurden anhand der Klimaszenarien für die Schweiz CH2018 (50) abgeschätzt. Zu beachten ist, dass die Hitzeperioden in diesen zwei Jahren ausserordentlich lang waren und ungefähr einer 50-jährlichen Häufung entsprechen. Die Einordnung dieser zwei vergangenen Jahre in die Klimazukunft gibt einen Eindruck, was zukünftig bezüglich Temperaturentwicklung und thermischen Komforts zu erwarten ist. Die den Klimadaten zugrunde liegenden Modellsimulationen basieren auf dem Emissionsszenario RCP8.5. Eine zusätzliche Erwärmung durch den Hitzeinseleffekt ist in den verwendeten Klimadaten nicht berücksichtigt. Für die Bewertung der Kühllösungen wird der Standort Basel-Binningen betrachtet.

²⁴ Die verwendeten Klimadaten wurden in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz für das Projekt ResCool festgelegt. Sie repräsentieren das Emissionsszenario RCP8.5 (siehe Abschnitt 3.1).

In der epidemiologischen Untersuchung, zum Zusammenhang zwischen Temperatur und Sterblichkeit für den Zeitraum 2003-2016, werden für die Aussenbedingungen die schweizweiten Messstationen von MeteoSchweiz verwendet. Da vor allem innerhalb der Städte nicht genügend Messstationen für die Expositionsabschätzung vorhanden sind, wurde durch das Schweizerische Tropen- und Public Health-Institut (Swiss TPH) ein hochauflösendes räumliches Temperaturmodell (100x100 m) entwickelt. Dieses berücksichtigt den Hitzeinseleffekt. Die Daten zeigen, dass während heissen Perioden vor allem die Lufttemperaturen in der Nacht im Vergleich zur Messstation um 2-4°C höher ausfallen. Die maximalen Lufttemperaturen am Tag liegen nahe beieinander.

Der Klimawandel hat eingesetzt und die Temperaturen steigen. In dieser Untersuchung²³ wird, basierend auf dem Emissionsszenario RCP8.5, davon ausgegangen, dass die mittlere Sommertemperatur gegenüber der Periode 1981-2010 um weitere 2.5°C (Medianjahr 2060) bis 4.1°C (heisses Jahr 2060, Häufigkeit alle 5-10 Jahre) ansteigt. Bezüglich der mittleren Sommertemperatur entspricht das Medianjahr 2060 dem Jahr 2018, das heisse Jahr 2060 dem Jahr 2003. Extremjahre wie 2003 und 2018 werden zum Standard und beeinflussen den Komfort des Menschen im Gebäude und im Aussenraum zunehmend negativ.

Die Höhe der Innentemperatur ist relevant für die Gesundheit

Die Untersuchungen von Ragettli et al. (7) zeigen einen Zusammenhang zwischen der Aussentemperatur und der Sterblichkeit. In solchen epidemiologischen Studien wird die Innentemperatur bis anhin kaum berücksichtigt. Da in der Schweiz ein Grossteil der Bevölkerung die meiste Zeit (80-90%) in Innenräumen verbringt, wird der Einbezug der Innentemperatur als Verbesserung der Expositionsabschätzung gewertet. Deshalb wurde für das vorliegende Projekt vom Swiss TPH der Zusammenhang zwischen Sterblichkeit und Innentemperatur anhand von 301'437 Todesfällen untersucht. Die Untersuchung zeigt, dass ab einer maximalen Innentemperatur von 22°C die Sterberate steigt und ab 24°C relevant wird. Für die minimale Innentemperatur wird ein Effekt bereits ab 20°C, bezüglich der mittleren Innentemperatur während der Nacht ab 20.5°C beobachtet. Während längeren Hitzeperioden besteht die Gefahr, dass sich die Innenräume nachts zu wenig gut abkühlen lassen. Eine fehlende Abkühlung während der Nacht ist eine (zusätzliche) Belastung für die Gesundheit, da die nächtliche Erholung beeinträchtigt wird. Eine hohe Nachttemperatur (hohe minimale Innentemperatur) verursacht durchschnittlich eine höhere Zunahme der Sterberate als eine hohe Tagestemperatur (hohe maximale Innentemperatur). Altersbedingte Unterschiede betreffend die Wirkung einer hohen Innentemperatur werden ab 26°C beobachtet. Die innentemperaturbedingte Auswirkung auf die Sterberate ist für Personen ab 75 Jahren signifikant höher als für die Bevölkerung unter 75 Jahren. Gemäss Hochrechnungen zum Bevölkerungswachstum und der demografischen Entwicklung, wird der Anteil der Altersgruppe ab 75 Jahren in den nächsten 25 Jahren von einem Anteil von 9% auf 16% anwachsen. Ein signifikanter Unterschied bezüglich der Wirkung der maximalen Innentemperatur auf die Sterblichkeit zwischen den Grossregionen der Schweiz wurde nicht festgestellt.

Ergänzende Auswertungen von Untersuchungen zur Abhängigkeit der Schlafqualität von der Innentemperatur zeigen, dass eine Innentemperatur von 23-24°C für Nichtrisikogruppen noch akzeptierbar ist. Auf Basis der Auswertungen von Fanger (8) kann davon ausgegangen werden, dass die thermisch neutrale Temperatur – wo die Person weder zu kalt noch zu warm hat – für alle Altersgruppen ähnlich ist. Diese beträgt für eine liegende, bedeckte Person ca. 20°C (+/-2.5°C). Abweichungen von dieser neutralen Temperatur können jüngere Personen besser ausgleichen, womit für sie höhere maximale Temperaturen noch akzeptierbar sind.

Für Risikogruppen ist gemäss dem aktuellen Wissensstand aus der vorliegenden Untersuchung eine maximale Innentemperatur von 24°C, eine maximale Nachttemperatur von 21°C und eine mittlere Nachttemperatur von 20.5°C anzustreben. Mit Blick auf den Grossteil der Bevölkerung wird, für die Bewertung der untersuchten Kühllösungen (Abschnitt 3), von einer maximalen Innentemperatur von 26°C am Tag und einer maximalen Nachttemperatur von 24°C ausgegangen.



Trotz der grossen Bedeutung der nächtlichen Erholung für den Menschen, berücksichtigen die Normen (zum Beispiel SIA 180 (1)) bis anhin keinen Unterschied zwischen der Temperaturanforderung für Innenräume während dem Tag und der Nacht. Die in der SIA 180 beschriebene zulässige maximale Innentemperatur am Tag und in der Nacht für gekühlte Wohnbauten mit 26.5°C und für ungekühlte Wohnbauten mit über 29°C²⁵ ist zu hoch angesetzt (siehe Abschnitt 3.2). Mit Sicht auf die Erkenntnisse aus der epidemiologischen Untersuchung, die steigenden Temperaturen und längeren Phasen mit hohen Temperaturen durch den Klimawandel und die sich ändernde Demografie, wäre eine Anpassung der Temperaturanforderungen angebracht.

Der Mensch reagiert bezüglich Wohlbefinden, Erholung und Gesundheit auf hohe Innentemperaturen ausgesprochen sensitiv, speziell die ältere Bevölkerung. Bei maximalen Temperaturen über 21°C während der Nacht und maximalen Temperaturen über 24°C am Tag steigt die Sterblichkeit an. Jüngere Personen können Abweichungen von der optimalen Temperatur besser kompensieren. Die in der Norm SIA 180 beschriebene zulässige maximale Innentemperatur am Tag und in der Nacht von 26.5°C (gekühlte Wohnbauten) und über 29°C25 (ungekühlte Wohnbauten) ist zu hoch angesetzt. Gemessen an den Gesundheitsrisiken ist es sinnvoll, die Werte auf akzeptierbare Temperaturen während dem Tag und für Schlafräume während der Nacht anzupassen. Mit Blick auf den Grossteil der Bevölkerung wird, für die Bewertung der untersuchten Kühllösungen, von einer maximalen Innentemperatur von 26°C am Tag und einer maximalen Nachttemperatur von 24°C ausgegangen.

Der Mensch kann sich an das Klima anpassen, aber nur bedingt

Der Mensch ist in der Lage, sich in einem gewissen Mass an das Klima anzupassen. Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) hat für Hitzetage drei goldene Regeln mit acht Detailmassnahmen ausgearbeitet. Fünf dieser Regeln, also über 60%, stehen im direkten Zusammenhang mit der Innentemperatur im Gebäude und der Kühlung des Menschen. Dies verdeutlicht die Bedeutung eines auf den Klimawandel ausgerichteten Gebäudeparks und die Auseinandersetzung mit zukunftsfähigen Kühlkonzepten.

Die Detailmassnahmen umfassen die Anpassung des Aktivitätsgrads und der Kleidung, die Reduktion des Wärmeeintrags von aussen durch das Schliessen der Fenster und die Nutzung der Beschattung am Tag, das Lüften nachts und die direkte Körperkühlung. Diese Belange werden in der vorliegenden Untersuchung aus verschiedenen Blickwinkeln untersucht. Die Adaptionsmöglichkeiten des Menschen sind trotzdem limitiert, womit die baulichen und die gestalterischen Massnahmen zur Verminderung der Hitzebelastung von grosser Bedeutung sind.

Über 60% der Detailmassnahmen zu den goldenen Regeln für Hitzetage des Bundesamtes für Gesundheut (BAG) stehen im direkten Zusammenhang mit der Temperaturentwicklung im Gebäude und der Kühlung des Menschen. Dies verdeutlicht die Bedeutung eines auf den Klimawandel ausgerichteten Gebäudeparks.

Vorausschauend handeln

Das volle Ausmass des Klimawandels auf den Komfort in den Gebäuden wird erst in (naher) Zukunft umfassend spürbar. Investitionen in den, um den Aussenraum ergänzten, normativ geregelten sommerlichen Wärmeschutz, sind bereits heute bei Neu-, Um- und bestehenden Bauten nötig, um negative Folgen für den Menschen, hohe Gesundheitskosten und Folgekosten für bauliche Anpassungen zu vermeiden. Steuerliche Anreize, Förderprogramme oder ein Nutzungsbonus für innovative Architekturprojekte könnten Investoren motivieren, umfassend in den sommerlichen Wärmeschutz zu investieren.

²⁵ Innentemperaturen über 29°C sind ab einem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden von 21.5°C zulässig (siehe Abschnitt 3.2).

Die Einhaltung einer akzeptierbaren Innentemperatur kann zukünftig ein Kriterium für die Vermietbarkeit von Liegenschaften sein. Die Extremjahre 2003 und 2018 waren noch Einzelfälle, womit das Mieterverhalten bezüglich Hitzeereignissen noch ungenügend abschätzbar ist. Werden solche klimatischen Verhältnisse zum Standard – wie sie das Medianjahr 2060 und das heisse Jahr 2060 zeigen – sind Mieterfluktuationen wahrscheinlich. Das bedingt eine vorausschauende Planung bei der Standortwahl und der Aus- und Nachrüstung der Gebäude unter Berücksichtigung der klimatischen Veränderungen.

Das volle Ausmass des Klimawandels auf den Komfort in Neu-, Um- und bestehenden Bauten wird erst noch umfassend spürbar. Steuerliche Anreize, Förderprogramme oder Nutzungsboni könnten bereits heute innovative Konzepte zum sommerlichen Wärmeschutz sowohl im Aussenraum (z.B. luftoffene Quartiere und grosszügige Vegetationsflächen) als auch bei der baulich optimalen Ausgestaltung der Gebäude, unterstützen. Die Einhaltung einer akzeptierbaren Innentemperatur während dem Sommer kann ein Kriterium für die Vermietbarkeit von Liegenschaften sein. Zukünftig ist eine Mieterfluktuation bei zu hohen Temperaturen wahrscheinlich.

Die Wärme draussen halten

Die Wärme ausserhalb des Innenraums zu halten, ist der effizienteste Weg für ein angenehmes thermisches Raumklima. Einen wichtigen Beitrag leisten eine angepasste Fenstergrösse (<50% der Fassadenfläche) und schattenspendende Fassadenvorsprünge. Der grösste Wärmeeintrag in das Gebäude erfolgt durch die transparenten Flächen. Geht man von einer Globalstrahlung auf die Verglasung von 600 W/m² (Südfassade²⁶), mit einem Anteil von 150 W/m² diffuser Strahlung aus, ergibt sich ein Wärmeeintrag durch die Verglasung ohne Sonnenschutz (g-Wert 0.5) von 300 W/m². Mit Sonnenschutz (g-Wert 0.15, Verglasung und Sonnenschutz, Arbeitsstellung 45°) von 90 W/m². Durch das nicht direkt besonnte Fenster fliesst ein Wärmestrom von 75 W/m² in den Raum. Der Vergleich zeigt, wie bedeutend die korrekte Bedienung des Sonnenschutzes ist. Es wird ersichtlich, dass das direkt besonnte Fenster mit Sonnenschutz nur einen geringfügig höheren Energiestrom in einen Raum leitet als das nicht geschützte Fenster mit ausschliesslich diffuser Strahlung. Um den Wärmeeintrag für das Gebäude zu reduzieren, soll der Sonnenschutz auch bei ausschliesslich diffuser Strahlung geschlossen werden. Als Sonnenschutz kommen Rafflamellenstoren, Roll- und Schiebeläden sowie Fassadenmarkisen zum Einsatz. Hält sich eine Person in einem Raum auf, ist ein vollständiges Schliessen des Sonnenschutzes, wegen dem fehlenden Aussenbezug, meist nicht möglich. Dieser Aussenbezug wird mit einem höheren Wärmeeintrag erkauft. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Situation sind elektrochrome Verglasungen, die ihre Transparenz und damit den Wärmeeintrag verändern. Der Aussenbezug bleibt länger erhalten.

Mit einer Fassaden- und Dachbegrünung kann der Wärmeeintrag ins Innere, durch die veränderten Absorptionseigenschaften und den Verdunstungseffekt der Grünflächen, vermindert werden. Gut mit Luft durchströmte Siedlungen mit genügend Grünflächen vermindern das Aufheizen und so das Entstehen von Hitzeinseln. Diese Situation hat einen grossen Einfluss auf die Funktionsweise der Raumkühlung mittels der kühlen Nachtluft (Fensterlüftung). Damit sich die in den Raum gelangte Wärme nicht sofort in einem markanten Anstieg der Lufttemperatur äussert, ist genügend thermisch aktivierbare Bauteilmasse nötig. Gut wärmeleitende Boden- und Deckenbeläge unterstützen den Wärmetransport.

Der sommerliche Wärmeschutz im Aussenraum und bei der Ausgestaltung der Gebäude sollte bereits in der frühen Planungsphase (Wettbewerb) noch prioritärer behandelt werden, weil er die Innentemperatur und den Kühlbedarf stark beeinflusst. Wegen der langen Lebensdauer der Gebäude ist es sinnvoll, diese bereits heute auf das Klima 2060 auszurichten. Das bedingt eine langfristige Entwicklungs- und Baustrategie der Immobilieninvestoren und -besitzenden aber auch der öffentlichen Hand.

²⁶ Sonneneinstrahlung Rechenwert SIA 382 für den 1. August.



Die Kühlquelle Fensterlüftung im Alt- und im Neubau

Die Kühlung des Raumes durch kalte Aussenluft, die durch das Fenster strömt (Fensterlüftung), leistet einen beachtlichen Beitrag zur Sicherstellung des Komforts im Wohn- und im Schlafzimmer. Je nach der maximal akzeptierbaren Innentemperatur, kann die Fensterlüftung den geforderten Komfort während 20-70% der Belegungszeit sicherstellen (Standort Basel-Binningen). Eine Kompensation einer höheren Innentemperatur, durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Person durch die Fensterlüftung, wurde nicht berücksichtigt (Abbildung 16). Die Fensterlüftung ist aber auch die Kühllösung, die am meisten von den erhöhten Temperaturen durch den Klimawandel betroffen ist. Die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen wird durch die Klimaerwärmung verringert und gleichzeitig auch der Luftvolumenstrom durch das Fenster, da dieser durch die reduzierte Temperaturdifferenz weniger stark angetrieben wird. Bei einer Halbierung der Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen reduziert sich die Kühlleistung der Aussenluft auf 35% (siehe 14.4.1). Die Querlüftung durch verschiedene Räume ist die effizienteste Massnahme, um den Luftaustausch stark zu erhöhen. Die konzeptionellen Überlegungen dazu müssen schon während dem architektonischen Entwurf angestellt werden. Zu beachten ist, dass nicht an allen Gebäudestandorten und in allen Geschossen des Gebäudes eine Kühlung über Fensterlüftung möglich ist (Einbruchsicherheit, Schallimmissionen).

In der restlichen Belegungszeit überschreitet die Temperatur die Komfortgrenze im Innenraum des untersuchten Alt- und Neubaus markant. Während dem Medianjahr 2060 treten im Altbau im Wohnzimmer 285 Überhitzungsstunden (19% der Belegungszeit) bei einer maximalen Innentemperatur von 30°C, im heissen Jahr 2060 426 Stunden (29%) bei 30.4°C auf. Das Schlafzimmer erreicht 114 Überhitzungsstunden (15%) bei 28°C respektive 204 Stunden (28%) bei 28.3°C. Im Neubau treten im Medianjahr 2060 im Wohnzimmer 237 Überhitzungsstunden (16% der Belegungszeit) bei einer maximalen Innentemperatur von 29.6°C auf, während dem heissen Jahr 2060 330 Überhitzungsstunden (22%) bei 29.5°C. Das Schlafzimmer erreicht 149 Stunden (20%) bei maximal 28.4°C respektive 232 Stunden (32%) bei maximal 28.7°C. Die maximale Innentemperatur verändert sich zwischen dem Medianjahr 2060 und dem heissen Jahr 2060 nur geringfügig, jedoch nimmt die Anzahl der Überhitzungsstunden stark zu. Im Wohnzimmer des Altbaus ist während dem heissen Jahr 2060, im Vergleich zum Medianjahr 2060, mit einem Anstieg der Überhitzungsstunden von 50%, im Schlafzimmer von 80%, im Wohnzimmer des Neubaus von 39% und im Schlafzimmer von 56% zu rechnen. Dies hat einen bedeutenden Einfluss auf das Wohlbefinden.

Für die Bewertung der Kühllösungen wird die Fensterlüftung als Basisvariante vorausgesetzt.

Die Fensterlüftung ist weiterhin die wichtigste Kühllösung. Bei einer gegenüber der SIA 180 verschärften Temperaturanforderung von maximal 24°C am Tag und 21°C während der Nacht kann die Fensterlüftung den Komfort während 20%, bei maximal 26°C am Tag und 24°C in der Nacht während 70% der Belegungszeit sicherstellen (Standort Basel-Binningen). An wärmeren Standorten werden diese Zeiten weiter reduziert. Eine Kompensation einer höheren Innentemperatur, durch eine erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Person durch die Fensterlüftung, wurde nicht berücksichtigt (Abbildung 16). Die Optimierung ihrer Effizienz soll während der Konzeptphase sowohl auf Stufe Gebäude als auch auf Stufe Aussenraum angegangen werden. Zu beachten ist, dass nicht an allen Gebäudestandorten und in allen Geschossen eine Fensterlüftung möglich ist.

Die richtige Kühllösung

Die Wahl der «richtigen» Kühllösung hängt von der Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien ab. Die Untersuchung bewertet die Kühllösungen bezüglich Wirksamkeit, Kosten, Treibhausgasemissionen, Akzeptanz und Ausführungszeitpunkt. Das Vorgehen und die Methode zur Auswahl der Kühllösungen und deren Bewertung sind in Abschnitt 2 detailliert beschrieben. Die nachfolgenden Ausführungen fassen die Erkenntnisse der Einzelkriterien zusammen. Darauf basierend können die Leserin und der Leser mit ihrer Gewichtung der Einzelkriterien eine individuelle Gesamtlösung ableiten. Abbildung 11 bis Abbildung 14 dienen bei diesem Prozess als Unterstützung.

Dezentrale Kühllösungen (Medianjahr 2060 und heisses Jahr 2060)

Die Fensterlüftung ist die effizienteste dezentrale Kühllösung. Wie beschrieben, reicht sie während Hitzeperioden alleinig nicht immer aus oder kann wegen örtlichen Gegebenheiten nicht eingesetzt werden. Von den untersuchten dezentralen Systemen ist das mobile Kühlgerät in der Lage, die festgelegten Temperaturen im Wohn- und im Schlafzimmer zu erreichen. Ein solches Gerät im Zweischlauchsystem soll mit einem natürlichen Kältemittel ausgestattet sein. Eine fachgerechte Montage der Luftversorgung für den Kältemittelkondensator (siehe Abschnitt 14.4.5) ist eine Voraussetzung. Ein Split-Kühlgerät mit einer Innen- und einer Ausseneinheit ist ebenfalls in der Lage, die festgelegten Temperaturen (26°C am Tag im Wohnzimmer, 24°C in der Nacht im Schlafzimmer) einzuhalten. Mobile Kühlgeräte und Split-Kühlgeräte sind grundsätzlich auch in der Lage, Innentemperaturen unter 24°C während der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären (z.B. 21°C), zu erreichen. Es muss aber beachtet werden, dass die Luft bei der Abkühlung entfeuchtet wird (Umluftbetrieb), was möglicherweise zu gesundheitlichen Problemen führen kann.

Der Standventilator führt zu einer örtlichen Temperaturreduktion von 2-3°C am Tag. In der Nacht ist die Wirkungsweise, wegen der Bedeckung des Menschen mit einem Duvet (60-70% der Körperoberfläche), eingeschränkt (siehe Abschnitt 4.1). Mit einer effizienten Bettenkühlung und Wassertemperaturen von 30°C, wird das benötigte Bettklima sichergestellt (siehe Abschnitt 4.3). Wegen dieser hohen Wassertemperatur kann auf eine mechanische Kühlung verzichtet und direkt Frischwasser zur Kühlung eingesetzt werden. In einer Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung kann, aufbauend auf den Prototypen, ein Gesamtsystem entwickelt werden. Gemäss der Untersuchung von Wang et al. (27) ist das am Handgelenk tragbare Kühlelement (Wearable, Embr Wave) in der Lage, die empfundene Temperatur am Tag um 2°C zu reduzieren. Damit können am Tag die Überhitzungsstunden teilweise und in der Nacht unter die Marke von 100 Stunden reduziert werden. Xu et al. (28) haben den Einfluss des Gerätes auf die Hauttemperatur, die Schlafqualität und den Ruheenergieverbrauch bei fünf jungen Männern und fünf jungen Frauen untersucht. Sie konnten keine Veränderung der Schlafqualität und des Ruheenergieverbrauchs feststellen. Weitere Untersuchungen, mit einer erhöhten Leistung des Kühlelements und einer längeren Nutzungsdauer, sind nötig. Eine weitere Technologie sind kühlende Textilien. Sie helfen, durch die Erhöhung der Wärmeabstrahlung und Konvektion direkt von der Haut, deren Temperatur zu senken. Gemäss den Untersuchungen von Peng et al. (31) werden Temperaturreduktionen von 2.3°C erreicht. Kim et al. (33) weisen für ihre thermisch adaptiven Textilien (TAT) sogar eine Temperaturreduktion von 4°C nach. Auch das Befeuchten der Kleidung (Song et al. (35)) kann durch die Nutzung des Verdunstungseffektes einen Beitrag zum thermischen Komfort leisten.

Die Gesamtkosten für die Bettenkühlung, das am Handgelenk tragbare Kühlelement und das mobile Kühlgerät liegen nahe beieinander. Die Betriebskosten für die beiden erstgenannten Kühllösungen können vernachlässigt werden, die Betriebskosten des mobilen Kühlgerätes sind während der Nutzungszeit gleich hoch wie seine Investitionskosten. Das Split-Klimageräte kostet für Einzelräume circa das 2.5-Fache des mobilen Kühlgerätes.

Das am Handgelenk tragbare Kühlelement weist die tiefsten Treibhausgasemissionen auf, die Bettenkühlung das Dreifache. Die Treibhausgasemissionen des mobilen Kühlgerätes fallen aber weit höher aus und überschreiten auch die Werte der zentralen Kühllösungen um 20-80%. Ausser in bestehenden Bauten, ohne Kühlalternative, stellen mobile Kühlgeräte keine Lösung dar. Wenn sie eingesetzt werden, sollen sie mit einem natürlichen Kältemittel ausgestattet sein und eine hohe Leistungszahl aufweisen. Setzt man anstelle eines mobilen Kühlgerätes ein Split-Kühlgerät ein, erhöhen sich die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung wegen des höheren Gewichtes um circa 25%. Die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb können durch die höhere Leistungszahl bis annähernd auf ein Viertel verringert werden. Daraus resultiert eine gesamthafte Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum mobilen Kühlgerät in der Grössenordnung von 25%. Für die Kühlung einer grossen Anzahl von Räumen eignen sich einzelne, mit R32 betriebene, Split-Kühlgeräte nicht. Es müsste



ein Multi-Split-System eingesetzt werden, das dann aber wegen den grossen Kältemittelmengen nicht unproblematisch ist.

Die Grundkühlung des Raumes über die Fensterlüftung weist die höchste Akzeptanz auf, wenn frische Luft im Aussenraum vorhanden ist, keine störenden Geräuschimmissionen auftreten und der Einbruchschutz sichergestellt ist. Die Akzeptanz der Bettenkühlung und am Körper tragbarer Kühlelemente ist noch nicht abschätzbar, weil beide Lösungen noch im Entwicklungsstadium sind. Ein Vorteil solcher Lösungen ist die Anpassbarkeit auf die individuellen Komfortbedürfnisse der Menschen. Weitere Entwicklungen solcher Geräte wären vor allem für die Anwendung in bestehenden Bauten nötig. Das mobile Kühlgerät wird wegen dem hohen Geräuschpegel, möglicher Zugserscheinungen, dem konstruktiven Aufwand bei der Verbindung mit dem Aussenraum und den hohen Treibhausgasemissionen eine tiefe Akzeptanz erzielen. Jedoch ist eine starke Verbreitung, hervorgerufen durch den tiefen Preis und die noch fehlenden Alternativen für bestehende Gebäuden, nicht zu unterschätzen. Split-Kühlgeräte, mit ihren im Aussenraum aufgestellten Einheiten, eignen sich nur für die Kühlung ausgewählter Räume.

Dezentrale, mobile Kühllösungen weisen sich dadurch aus, dass sie zu einem beliebigen Zeitpunkt angeschafft werden können. Die Bettenkühlung mit dem Anschluss an das Frischwasser bedingt einen raumnahen Anschluss, vorzugsweise im Schlafzimmer.

In Ergänzung zur Fensterlüftung stehen für bestehende Gebäude noch keine dezentralen Alternativen zum mobilen Kühlgerät und Split-Kühlgerät zur Verfügung (siehe zentrale Lösung mit Kühlung über die Fussbodenheizung). Werden solche Geräte eingesetzt, sollten sie mit einem natürlichen Kältemittel ausgestattet sein und eine hohe Leistungszahl aufweisen. Die Bettenkühlung, bei der mit Wassertemperaturen von 30°C der individuelle Komfort während der Nacht sichergestellt werden kann, oder auf dem Körper tragbare Kühlelemente, verfügen über das ökologische und ökonomische Potential, sich als zukünftige Kühllösung zu etablieren. Auch Textilien, mit einer erhöhten Wärmeabstrahlung von der Haut oder der Nutzung des Verdunstungseffektes, können einen beachtlichen Beitrag zur Verbesserung des thermischen Komforts leisten. Diese Technologien sind noch in der Entwicklung und bedingen eine Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung.

Zentrale Kühllösungen (Medianjahr 2060 und heisses Jahr 2060)

Zentrale Systeme, mit einer erneuerbaren Energiequelle, wie Seewasser (Fernkälte), Regeneration von Erdwärmesonden (Geocooling) und Grundwasser, können die Innentemperatur in Kombination mit einem effizienten Kälteabgabesystem (metallische Kühldecke, Kapillarrohrmatte, TABS im Neubau) im Wohn- und im Schlafzimmer für das Medianjahr 2060 und das heisse Jahr 2060 unterhalb der Marke von 100 Überhitzungsstunden halten. Gleich verhalten sich mechanische Kühlanlagen, wie die Kältemaschine mit Hybridkühler und die als Kältemaschine eingesetzte Luft-/Wasserwärmepumpe. Der Nachteil der zwei letztgenannten Anlagentypen ist, dass die dem Raum entzogene Kühlenergie und die für den Kompressorbetrieb benötigte Elektrizität in Form von Wärme an die äussere Umgebung abgegeben wird. Dadurch wird die Umgebung erwärmt, was zu mehr Kühlbedarf und einem wiederum erhöhten Wärmetransport in die Umgebung führt. Das System schaukelt sich auf und es können Hitzeinseln entstehen.

Für die Bestimmung der Anlagengrösse von multifunktionalen²⁷ Systemen soll sowohl der Heiz- als auch der Kühlleistungsbedarf ermittelt und der massgebende Wert eruiert werden. Die Resultate der

²⁷ Multifunktionale Systeme sind Lösungen, die sowohl für das Heizen als auch das Kühlen genutzt werden. Bei diesen Systemen werden 33% der Erstellungskosten des Heiz-/Kühlsystems (Kälteerzeuger und Kälteabgabe) und 100% der durch die Kühlung verursachten Betriebskosten der Kühllösung zugewiesen. Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb werden dem Heiz-/Kühlsystem analog zugewiesen.

Simulationsberechnungen weisen darauf hin, dass für die Dimensionierung zukünftig die Kühlleistung massgebend ist.

Sowohl in Neu- und Umbauten als auch in bestehenden Bauten kann die Fussbodenheizung als Kälteabgabesystem im Schlafzimmer zur effizienten Temperaturreduktion genutzt werden und reduziert im Wohnzimmer die Überhitzungsstunden. Gut wärmeleitende Bodenbeläge, ohne Einschränkung des Wärmeflusses, sind dazu nötig.

Zu beachten ist, dass die untersuchten zentralen Kühllösungen nicht in der Lage sind, Innentemperaturen weit unter 24°C während der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären (z.B. 21°C), zu erreichen. Die Kühlleistung ist entweder durch den nötigen Abstand der Kühlwassertemperatur zum Taupunkt der Luft oder durch die erreichbare Kühlwassertemperatur aus der Kühlquelle limitiert.

Aus Kostensicht sind zentrale Systeme bei bestehenden Bauten, die nur für die Kühlung eingesetzt werden (monofunktional²⁸), nicht sinnvoll (Ausnahme Fussbodenheizung zur Kälteabgabe im Schlaf- und Wohnzimmer). Bei Umbauten können zentrale Systeme integriert werden. Die höchsten Kosten weist die Kältemaschine mit Hybridkühler auf. Multifunktionale Systeme sind erwartungsgemäss günstiger, bedingen aber bei einem Altbau eine umfassende Sanierung. Die kostengünstigste Lösung ist der Anschluss an ein Fernkältenetz. Das System Luft-/Wasserwärmepumpe hat einen leichten Kostenvorteil gegenüber einer Kühllösung mit Erdwärmesonden oder der Nutzung von Grundwasser als Kühlquelle. Das teuerste Kälteabgabesystem ist die metallische Kühldecke, gefolgt von TABS (Neubau), der Kapillarrohrmatte und der Fussbodenheizung. Bei Umbauten sind metallische Kühldecken und Kapillarrohrmatten ökonomisch nur sinnvoll, wenn sie nach der Sanierung in Kombination mit einem multifunktionalen Heiz-/Kühlsystem eingesetzt werden können.

Kühllösungen mit dem gleichen Kälteabgabesystem (Beispiel Basis Kapillarrohrmatte), aber einer unterschiedlichen Kälteerzeugung, weisen in den Gesamtkosten Unterschiede im Umbau von -21% bis +16% und im Neubau von -14% bis +14% zum jeweiligen Mittelwert auf.

Die höchsten Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, bezogen auf die Nutzenergie, weist – wegen der ausschliesslichen Nutzung zur Kühlung – die Kältemaschine mit Hybridkühler auf. Die tiefsten Treibhausgasemissionen resultieren aus der Kühlung mit Fernkälte²⁹, Luft-/Wasserwärmepumpen und Grundwasser. Die energetisch aufwendigen Bohrungen der Lösung mit Erdwärmesonden verschlechtern die Bilanz der Treibhausgasemissionen aus der Erstellung. Die höchsten Emissionen des Kälteabgabesystems weist die metallische Kühldecke auf, die geringsten die Fussbodenheizung.

Kühllösungen mit dem gleichen Kälteabgabesystem (Beispiel Kapillarrohrmatte), aber einer unterschiedlichen Kälteerzeugung, erzielen in den gesamten Treibhausgasemissionen Unterschiede zum Mittelwert im Umbau von -44% bis +93% und im Neubau von -32% bis +52%. Die Zahlen zeigen, dass die Treibhausgasemissionen mit der Systemwahl stark beeinflusst werden. Deshalb ist eine projektspezifische Berechnung und Auswahl angebracht.

Die höchste Akzeptanz erreichen die multifunktionalen Heiz-/Kühllösungen. Die für die Herstellung verwendeten Materialressourcen werden für diesen Anlagentypus am effizientesten eingesetzt. Die wasserbasierte Kälteabgabe mit gekühlten Oberflächen erfolgt zugluft- und geräuschfrei und bietet den höchsten Komfort.

Bei Neu- und Umbauten (siehe Abschnitt 6) wird empfohlen, die zentrale Kühllösung zum Zeitpunkt der Bautätigkeit vollständig zu integrieren (Kälteerzeugung und Kälteabgabe). Nachträgliche Arbeiten während dem Betrieb des Gebäudes führen zu einer eingeschränkten Nutzung, insbesondere

²⁸ Monofunktionale Systeme sind Lösungen, die ausschliesslich für die Kühlung eingesetzt werden. Bei diesen Systemen werden sowohl die Erstellungs- und Betriebskosten als auch die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb zu 100% der Kühllösung zugewiesen.

²⁹ Die Treibhausgasemissionen der Fernkälteinfrastruktur bis zum Hausanschluss werden nicht berücksichtigt.



bei einer Nachrüstung der Kälteabgabe im Raum. Will ein Investor zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Raumkühlung anbieten, sollte trotzdem eine strukturintegrierte Kälteabgabe in temperaturkritischen Räumen montiert werden. Als Minimallösung ist es sinnvoll, dass das nötige Leitungssystem von der Energiezentrale zentral in die Wohnungen geführt und für einen späteren Anschluss vorbereitet wird.

Für Neu- und Umbauten stehen effiziente kombinierte Heiz-/Kühlsysteme (multifunktional²⁷) in Verbindung mit einer flächenintegrierten Kälteabgabe zur Verfügung. Zu berücksichtigen ist, dass Innentemperaturen weit unter 24°C in der Nacht, wie sie für Risikogruppen angebracht wären, wegen der limitierenden Temperatur der Kälteabgabe (Taupunkt, Quellentemperatur) nicht erreichbar sind. Die mit einem Kälteerzeuger ergänzte Fussbodenheizung eignet sich vor allem auch in bestehenden Bauten zur Kühlung des Schlafzimmers und zur Abkühlung des Wohnzimmers. Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung lassen sich mit der Wahl der Kühllösung, ausgehend vom Mittelwert, halbieren oder verdoppeln. Deshalb ist eine projektspezifische Überprüfung sinnvoll. Bei Neuund Umbauten ist es zweckmässig, die zentrale Kühllösung zum Zeitpunkt der Bautätigkeit vollständig zu integrieren. Minimal sollte das Leitungssystem für die Raumkühlung zentral in die Wohnungen geführt und für einen späteren Anschluss vorbereitet werden.

Energiebedarf

Die benötigte Nutzenergie zum Kühlen ist stark von der Kühlwirkung der Fensterlüftung und der akzeptierbaren Innentemperatur abhängig. Sie liegt für die untersuchten Kühllösungen und Bauten am Standort Basel-Binningen bei einer maximalen Innentemperatur am Tag von 26°C und in der Nacht von 24°C zwischen 4 kWh/(m²_{EBF} a) für das Medianjahr 2060 und 6 kWh/(m²_{EBF} a) für das heisse Jahr 2060. Bei einer maximalen Innentemperatur von 24°C Tag und Nacht zwischen 10 kWh/(m²_{EBF} a) für das Medianjahr 2060 und 12 kWh/(m²_{EBF} a) für das heisse Jahr 2060.

Damit ist der Kühlenergiebedarf im Vergleich zum Heizenergiebedarf beachtlich. Der daraus entstehende Primärenergiebedarf und die resultierenden Treibhausgasemissionen sind, wegen den hohen Leistungszahlen der Kälteerzeuger (ausser beim mobilen Kühlgerät), in Relation zu den Treibhausgasemissionen aus der Erstellung von untergeordneter Bedeutung. Bei multifunktionalen Kälteerzeugern soll sowohl der Kühl- als auch der Heizleistungsbedarf berechnet und der höhere Wert für die Dimensionierung verwendet werden.

Die benötigte Nutzenergie zum Kühlen ist stark von der Kühlwirkung der Fensterlüftung und der akzeptierbaren Innentemperatur abhängig. Sie liegt für die untersuchten Kühllösungen und Bauten am Standort Basel-Binningen bei einer maximalen Innentemperatur am Tag von 26°C und in der Nacht von 24°C zwischen 4 kWh/(m²_{EBF} a) für das Medianjahr 2060 und 6 kWh/(m²_{EBF} a) für das heisse Jahr 2060. Bei einer maximalen Innentemperatur von 24°C am Tag und in der Nacht zwischen 10 kWh/(m²_{EBF} a) für das Medianjahr 2060 und 12 kWh/(m²_{EBF} a) für das heisse Jahr 2060. Der daraus resultierende Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb sind, wegen den hohen Leistungszahlen der Kälteerzeuger (ausser beim mobilen Kühlgerät), im Vergleich zu den Treibhausgasemissionen aus der Erstellung von geringerer Bedeutung.

9 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die vorliegende Untersuchung versucht, eine Basis für die Klimaanpassung von Wohnbauten an den Klimawandel aus verschiedenen Perspektiven zu schaffen. Mit der Verortung der zukünftig herrschenden klimatischen Bedingungen mit bereits durchlebten klimatischen Ereignissen (2003, 2018) soll die Zukunft greifbarer gemacht werden. Die Auseinandersetzung mit dem Einfluss der Innentemperatur auf die Sterblichkeit und die Erholung rückt den Menschen (zurück) ins Zentrum des Bauens und es wird versucht, die Diskussion über zukünftig akzeptierbare Innentemperaturen in Gebäuden anzustossen. Die Untersuchung zeigt, dass die meistgenutzte Kühllösung, die Fensterlüftung, unter den zu erwartenden klimatischen Bedingungen an ihre Grenzen stösst. Die verschiedenen bewerteten Kühllösungen werden um die personenbezogenen Kühllösungen ergänzt, um den Blick auf heute noch wenig eingesetzte Möglichkeiten zu lenken. Aus der Anzahl der Empfehlungen an die Anspruchsgruppen wird ersichtlich, dass das Gelingen eines klimagerechten Bauens vom Handeln einer Vielzahl von Personen abhängt. Wegen des langen Lebenszyklus der Immobilien ist es entscheidend, dass heute klimaanpassende Massnahmen ergriffen werden, um den Gebäudepark auf die Zukunft vorzubereiten.

Mit diesem Bericht, dem Verbreiten der Erkenntnisse an die Anspruchsgruppen sowie durch wissenschaftliche Publikationen soll der Transfer in die Praxis und die Wissenschaft stattfinden.

Diese Untersuchung zeigt aber auch, dass noch weitergehende Fragen zu klären sind.

In der vorliegenden Untersuchung wird eine Reihe von Kühllösungen am Standort Basel-Binningen bewertet und der Einfluss der Innentemperatur auf den Menschen untersucht. Basierend auf den Ergebnissen stellt sich die Frage, welche der Lösungen innerhalb des gesamten Gebäudeparks Schweiz mit seiner baulichen Struktur (städtisch, ländlich, Gebäudealter, Renovationszyklus), dem Standort der Bauten (z.B. Hitzeinseleffekt, öffenbare Fenster, Kühlpotential im Aussenraum), der Struktur der Bewohnenden (Altersstruktur, sozialer Status, finanzielle Mittel) und dem Angebot an erneuerbaren Energiequellen (Erdwärmesonden, Grundwasser, Seewasser usw.) wo integriert werden können. Diese differenzierte Betrachtung mit dem Fokus auf die ganze Schweiz könnte unter anderem aufzeigen, wo die Investition in eine übergeordnete Kühlinfrastruktur sinnvoll ist, welcher Energiebedarf und welche Treibhausgasemissionen gesamthaft mit der Anpassung des Gebäudeparks an den Klimawandel ausgelöst werden, welche Bauten und Bewohnenden am stärksten von Klimawandel betroffen sind und in welchen Bereichen (Standorte, Gebäudetypen, soziale Schichten) noch Lösungen fehlen.

Die Frage der akzeptierbaren Innentemperaturen bezüglich der Sterblichkeit, der Leistungsfähigkeit und der Erholung des Menschen stellt sich nicht nur für Wohnbauten, sondern auch für andere Nutzungen, wie z.B. für Schulen, Bürobauten und Gesundheitsbauten. Deshalb sollte die Thematik gesamtheitlich weiter untersucht und auf weitere Altersgruppen ausgeweitet werden.

Neben den etablierten Kühllösungen sind neue Entwicklungen nötig, um die Anpassung des Gebäudeparks an die zukünftigen Erfordernisse energie- und ressourceneffizient zu gestalten. Noch wenig erprobte Kühlkonzepte, wie zum Beispiel die Bettenkühlung, bedingen eine technische Weiterentwicklung, aber vor allem auch Untersuchungen mit Personen zur Evaluation der Akzeptanz beziehungsweise der Identifikation von Hemmnissen in der Anwendung.

Die Fensterlüftung kann je nach der akzeptierbaren Innentemperatur, der Öffnungsfläche und dem Standort den thermischen Komfort während 20-70% der Belegungszeit sicherstellen. Allein reicht sie aber in diesen Fällen nicht aus. Damit das Kühlpotential der Fensterlüftung beim Einsatz einer zusätzlichen Kühllösung nicht verloren geht, sollten entsprechende Regelkonzepte für die Kombination beider Kühllösungen entwickelt werden.



10 Nationale und internationale Zusammenarbeit

IEA-EBC Annex 80: Resilient Cooling for residential and small non-residential buildings

Es haben Kontakte mit Prof. Bjarne W. Olesen (DTU, Department of Civil Engineering) bezüglich des Projekts «IEA-EBC Annex 80 (2019-2023): Resilient Cooling for residential and small non-residential buildings» stattgefunden. Das Projektteam hat bis dato vorbereitende Arbeiten vorgenommen (Definition KPI, Aufbereitung Wetterdaten). Es liegen noch keine konkreten Resultate vor. Es besteht Interesse an den Resultaten von ResCool. Eine Teilnahme am Annex muss geprüft werden.

«Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028»

Es hat ein intensiver Abgleich mit dem Projekt «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» stattgefunden. Markus Koschenz ist Mitglied in diesem Projektteam. Kathrin Wehrli von MeteoSchweiz hat für das Projekt ResCool passende und konsistente zukünftige Klimadaten aufbereitet (siehe Abschnitt 3.1). Sie ist ebenfalls Mitglied des Projektteams «Klimadaten der Zukunft für Planende».

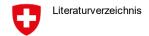
11 Kommunikation

Der aktuelle Stand des Projektes wurde laufend an verschiedenen Veranstaltungen präsentiert.

September 2020 Brenet Statusseminar 2020, Aarau
 Oktober 2020 Vorstand Netzwerk nachhaltiges Bauen (NNBS), Horw, Vorstellung ResCool
 November 2020 Abend der Wirtschaft Hochschule Luzern, Horw, Kühlung – Klimaanpassung in Zeiten des Klimawandels
 Februar 2021 Teilnahme an der ISEE (International Society for Environmental Epidemiology) Young Konferenz, Basel

12 Publikationen

Es wurden noch keine Resultate in Form einer Publikation veröffentlicht.

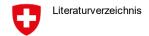


13 Literaturverzeichnis

- 1. SIA 180, Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2014.
- 2. Bundesamt für Gesundheit Drei goldene Regeln für Hitzetage. [Online] 21. Juni 2017. [Zitat vom: 13. Juli 2021]
- https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/hitze.html
- 3. IPCC Special Report, Global Warming of 1.5°C, Summary for Policymakers. s.l.: Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2018.
- 4. NCCS. CH2018 Klimaszenarien für die Schweiz. s.l.: National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2, 2018.
- 5. Global Carbon Budget 2018, Seite 40. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. Juli 2021] https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive/2018/GCP_CarbonBudget_2018.pdf
- 6. Settembrini G., Domingo-Irigoyen S., Heim T., Jurt D., Zakovorotnyi A., Seerig A., Zweifel G., Menti U.P. ClimaBau Planen angesichts des Klimawandels, Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Horw: Hochschule Luzern, IGE, 2017.
- 7. Ragettli M.S., Vicedo-Cabrera A.M., Schindler C., Röösli M. Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. Environmental Research. 2017, 158 (2017) 703-709.
- 8. P.O., Fanger. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. 19722700268.
- 9. de Dear R., Brager G., Cooper D. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, ASHRAE RP-884. Sydney: ASHRAE and Macquarie Research Ltd., 1997.
- 10. Nicol F., Humphreys M. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. Building and Environment 45 (2010) 11-17, 2010.
- 11. Büttner S., Stampfli J., Domingo-Irigoyen S., Settembrini G., Schrader B. Bereit für den Klimawandel? Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften und Planende, im Auftrag von EnergieSchweiz. Ittigen: Hochschule Luzern, IGE, 2021.
- 12. Radic M., Brkovic Dodig M., Auer T. Green Facades and Living Walls A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits. Sustainability MDPI. 2019, 11, 4579.
- 13. Ascione F., De Masi R.F., Mastellone M., Ruggiero S., Vanoli P.V. Green Walls, a Critical Review: Knowledge Gaps, Design Parameters, Thermal Performances and Multi-Criteria Design Approaches. Energies. 2020, 13, 2296.
- 14. Stadt Zürich. Fachplanung Hitzeminderung. Zürich: Stadt Zürich (Hrsg.), 2020.
- 15. Koschenz M., Lehmann B. Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. Dübendorf: Empa Dübendorf, 2000. ISBN 3-905594-19-6.
- 16. C.A., Roulet. Well being and energy in buildings, an architectural issue. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Conference Paper, 2018.
- 17. Ragettli M., Röösli M. Hitzewelle-Massnahmen-Toolbox, Ein Massnahmenkatalog für den Umgang mit Hitzewellen für Behörden im Bereich Gesundheit, im Auftrag des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) (Massnahmen A3, A4, C16-18). Basel: Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut, 2017.
- 18. NCCS. CH2011 Swiss Climate Change Scenario, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. s.l.: ISBN: 978-3-033-03065-7, 2011.



- 19. SIA 2028, Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2010.
- 20. Olesen B.W., Brager G.S. A better way to predict comfort: the new ASHRAE standard 55-2004. ASHRAE Journal. August 2004, 2004.
- 21. SIA 382.706, EN 15251:2007. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewrtung der Energieeffizienz von Gebäuden Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2007.
- 22. Domingo-Irigoyen S., Settembrini G., Steiger O., Büttner S. Klimageräte im Kontext des Klimawandels, im Auftrag von EnergieSchweiz. Ittigen: Hochschule Luzern, IGE, 2021.
- 23. Fitzner K., Finke U., Zeidler O. Wirksamkeit von mobilen Klimageräten. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2007.
- 24. Yang B., Schiavon S., Sekhar C., Cheong D., Tham K.W. Cooling efficiency of a brushless direct current stand fan. 2015, Building and Environment 85 (2015) 196-204.
- 25. Arens E., Zhang H., Huizenga C. Partial- and whole-body thermal sensation and comfort Part I: Uniform environmental conditions. Journal of Thermal Biology. 2005, 31 (2006) 53–59.
- 26. Matheson, R. MIT News Office. [Online] 27. September 2017. [Zitat vom: 24. Juni 2021] https://news.mit.edu/2017/personal-thermostat-startup-heats-commercialization-0927
- 27. Wang Z., Warren K., Luo M., He X., Zhang H., Arens E., Chen W., He Y., Hu Y., Jin L., Liu S., Cohen-Tanugi D., Smith M.J. Evaluating the comfort of thermally dynamic wearable devices. Building and Environment. 167 (2020) 106443, 2020.
- 28. Xu H., Martinez-Nicolas A., Martinez-Avila W.D., Alcantara J.M.A., Corral-Perez J., Jimenez-Pavon D., Acosta F.M., Ruiz J.R., Martines-Tellez B. Impact of an intermittent and localized cooling intervention on skin temperature, sleep quality and energy expenditure in free-living, young, healthy adults. Journal of Thermal Biology. 2021, 97 (2021) 102875.
- 29. Song C., Liu Y., Zhou X., Wang X., Li J., Liu J. Temperature field of bed climate and thermal comfort assessment. 2016, Building and Environment 95 (2016) 381-390.
- 30. Li X., Shen L., Califano R. The comparative study of thermal comfort and sleep quality for innovative designed mattress in hot weather. Science and Technology for the Build Environment. 2020, 26:5, 643-657.
- 31. Peng Y., Cui Y. Advanced Textiles for Personal Thermal Management and Energy. Joule. 2020, Volume 4, Issue 4, 15. April 2020, Pages 724-742.
- 32. Alberghini M., Hong S., Lozano L.M., Korolovych V., Huang Y., Signorato F., Zandavi S.H., Fucetola C., Uluturk I., Tolstorukov M,Y., Chen G., Asinari P., Osgood R.M., Fasano M., Boriskina S.V. Sustainable polyethylene fabrics with engineered moisture transport for passive cooling. [Online] Nat Sustain (2021), 15. March 2021. [Zitat vom: 23. July 2021] https://doi.org/10.1038/s41893-021-00688-5
- 33. Kim G., Gardner C., Park K., Zhong Y., Jin S. Human-Skin-Inspired Adaptive Smart Textiles Capable of Amplified Latent Heat Transfer for Thermal Comfort. Advanced Intelligent Systems. 2020, 2020, 2, 202000163.
- 34. Fathia M.A., Ahmed E.I. A Comparison of Vinegar Compresses vs. Cold Water & Water with Vinegar for treating of Fever at Tropical Hospitals. International Journal of Nursing Science. 2012, Vol. 2 No. 4, 2012, pp. 38-46.
- 35. Song W., Wang F., Zhang C. Intermittent wetting clothing as a cooling strategy for body heat strain alleviation of vulnerable populations during a severe heatwave incident. Journal of Thermal Biology. 2019, 79 (2019) 33-41.
- 36. N., Fergus. Temperatur and sleep. Energy & Buildings. 2019, 204.
- 37. Lin Z., Deng S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropic Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. 2006, Building and Environment 43 (2008) 905–916.



- 38. Lin Z, Deng S. A study on thermal comfort in sleeping environments in the subtropics Developing a thermal comfort model for sleeping environments. Building and Environment 43. 70-81, 2008.
- 39. Bundesamt für Umwelt, (BAFU). Pilotprogramm Anpassung an den Klimawandel. [Online] 2020. [Zitat vom: 16. Juni 2020]
- https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/anpassung-an-den-klimawandel/pilotprogramm-anpassung-an-den-klimawandel.html
- 40. Flückiger B., Kloog I., Ragettli M., Eeftens M., Röösli M., de Hoogh K. Modelling daily air temperature at a fine spatial resolution dealing with challenging meteorological phenomena and topography in Switzerland. to be submitted in June/July 2021.
- 41. M., Maclure. The case-crossover design: A method for studying transient effects on the risk of acute events. American journal of epidemiology. 133:144-153., 1991.
- 42. A., Gasparrini. Distributed lag linear and non-linear models in r: The package dlnm. Journal of Statistical Software. 43:1, 2011.
- 43. Ragettli M.S., Röösli M. Gesundheitliche Auswirkungen von Hitze in der Schweiz und die Bedeutung von Präventionsmassnahmen. Hitzebedingte Todesfälle im Hitzesommer 2019 und ein Vergleich mit den Hitzesommer 2003, 2015 und 2018. Basel: Schweizerisches Tropen- und Public Health Institut (Swiss STPH), im Auftrag des Bundesamtes für Gesundheit (BAG), 2020.
- 44. Ragettli M. S., Röösli M. Die Bedeutung von Präventivmassnahmen. Hitzebdingte Sterblichkeit im Sommer 2019. Prim Hosp Care Allg Inn. 2021, 21:90-95.
- 45. Harding E.C., Franks N.P., Wisden W. The Temperature Dependence of Sleep. Frontiers in Neuroscience. [Online] 24. April 2019. [Zitat vom: 21. July 2021] https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2019.00336/full
- 46. CIBSE. TM 59, Design methodology for the assessment of overheating risk in homes. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 2017.
- 47. Troynikov O., Watson C.G., Nawaz N. Sleep environments and sleep physiology: A review. Journal of Thermal Biology 78 (2018) 192–203, 2018.
- 48. van Loenhout J.A F., le Grand A., Duijm F., Greven F., Vink N.M., Hoek G., Zuurbier M. The effect of high indoor temperatures onself-perceived health of elderly persons. Environmental Research 146 (2016) 27–34, 2016.
- 49. Pan L., Lian Z., Lan L. Investigation of sleep quality under different temperatures based on subjective and physiological measurements. HVAC&R Research 18:5, 1030-1043, 2012.
- 50. CH2018. CH2018 Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, 271 pp. Zürich: National Centre for Climate Services, 2018.
- 51. MeteoSchweiz. MeteoSwiss Spatial Climatea Analyses: Documentation of Datasets for Users. [Online] November 2019. [Zitat vom: 14. Juni 2021.] https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/klima/klima-der-schweiz/doc/ProdDoc Cover.pdf
- 52. Chow D.H.C, Levermore, G.J. New algorithm for generating hourly temperature values using daily maximum, minimum and average values from climate models. s.l.: Building Services Engineering Research and Technology, 2007. Vol. 28, pp. 237–248.
- 53. Salamanca F., Georgescu M., Mahalov A., Moustaoui M., Wang M. Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. American Geophysical Union, 2014.



14 Anhang

14.1 Verwendete Klimadaten für die Zukunftsprognosen

Die im Projekt verwendeten Klimadaten «Medianjahr 2060» und «heisses Jahr 2060» wurden anhand des nachfolgend beschriebenen Verfahrens ausgewählt.

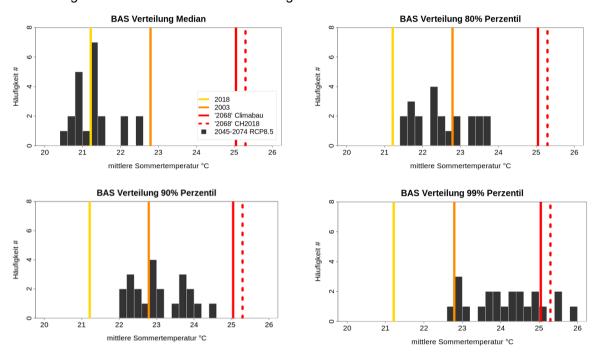


Abbildung 47: Mittlere Sommertemperatur für die Station Basel-Binningen (BAS) in der Periode 2045-2074 gemäss dem starken Emissionsszenario RCP8.5.

Gezeigt sind die Verteilungen der 50%-, 80%-, 90%- und 99%-Perzentile der Modelle aus CH2018 als schwarze Balken mit einer Breite von 0.2°C. Die mittlere Sommertemperatur wird berechnet als Mittel über die Tagesmitteltemperaturen von Juni bis August. In Farbe ist die beobachtete Sommertemperatur für die zwei Extremjahre 2018 (gelb, 21.2°C) und 2003 (orange, 22.8°C) gezeigt. Zusätzlich wurde das Jahr 2003 mittels zweier verschiedener Delta-Change-Faktoren in die Zukunft skaliert. Ein Delta-Change-Faktor basiert auf den CH2011 Klimaszenarien und dem Emissionsszenario A1B. Das resultierende Extremjahr, genannt '2068' ClimaBau (rot durchgezogen, 25.0°C) wurde für das Projekt «ClimaBau» verwendet. Der andere Delta-Change-Faktor wurde auf gleiche Weise, aber mit den CH2018 Modellen und dem Emissionsszenario RCP8.5 bestimmt, genannt '2068' CH2018 (resultierendes Extremjahr rot gestrichelt, 25.3°C).

In Abbildung 47 ist die erwartete zukünftige Sommertemperatur in der Periode 2045-2074 gemäss dem starken Emissionsszenario RCP8.5 für unterschiedliche Jährlichkeiten gezeigt. Zur Bestimmung der Jährlichkeiten wurde aus jedem CH2018-Modell (50) einzeln eine Normalverteilung der Sommertemperaturen geschätzt. Aus dieser Normalverteilung wurden die 50%- (=Median), 80%-, 90%- und 99%-Perzentile bestimmt. Das 80%-Perzentil entspricht der Temperatur, die erwartungsgemäss alle 5 Jahre überschritten wird. Die 90%-Perzentil Temperatur wird alle 10 Jahre überschritten und die 99%-Perzentil Temperatur alle 100 Jahre. Aus den Histogrammen der Perzentile wird ersichtlich, dass die Temperatur bei seltenerer Jährlichkeit höher liegt. Ausserdem ist auch die Unsicherheit der Modelle grösser bei seltenerer Jährlichkeit. Beispielsweise liegt der Median bei allen Modellen circa zwischen 20.5°C und 22.5°C, während die 99%-Perzentile der Modelle ungefähr zwischen 23°C und 26°C liegen.

Die Sommertemperaturen für die zwei vergangenen Hitzesommer 2003 und 2018 sind in Abbildung 47 in orange respektive gelb gezeigt und lassen sich somit im zukünftigen Klima einordnen. 2018 liegt in



der Mitte der Verteilung des Medians der Modelle und unterhalb der Verteilung der anderen Perzentile. Somit entspricht 2018 bezüglich der Sommertemperatur einem durchschnittlichen Sommer in der Zukunft (2045-2074), unter Annahme eines starken Emissionsszenarios (RCP8.5). 2003 liegt über der Verteilung des Medians, innerhalb der Verteilung der 80%- und 90%- Perzentile und am unteren Ende des 99%-Perzentils. Deshalb ist eine Sommertemperatur wie im Jahr 2003 in Zukunft etwa alle 5 bis 10 Jahre zu erwarten. Die beiden Extremjahre '2068' Climabau und '2068' CH2018, welche mittels einer Skalierung von 2003 generiert wurden, liegen im oberen Bereich der Verteilung des 99%-Perzentils und sind somit einmal in 100 Jahren oder seltener zu erwarten.

Die Sommer 2003 und 2018 waren besonders bezüglich der Länge der Hitzeperioden extrem. Deswegen ist eine ähnliche Einordnung (wie oben für die Sommertemperatur) bezüglich der längsten konsekutiven Hitzeperiode naheliegend. Hitzeperioden sind definiert als aufeinanderfolgende Tage, an welchen die Maximaltemperatur von 30°C überschritten wird. Am Standort Basel-Binningen war dies im Jahre 2003 während 12 Tagen der Fall und 2018 während 11 Tagen. Die Länge dieser Hitzeperioden wird verglichen mit der durchschnittlichen Länge von Hitzeperioden in CH2018 für die mittlere Zukunft und das Emissionsszenario RCP8.5. Dabei zeigt sich, dass beide Ereignisse auch in Zukunft selten zu erwarten sind, mit einer Jährlichkeit von etwa 50 Jahren oder seltener.



14.2 Verfeinertes Modell zur Abschätzung der Aussentemperatur

14.2.1 Methodik

Für die Entwicklung des zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Temperaturmodells des Swiss TPH für die Schweiz wurde ein Ansatz gewählt, der in einem zweistufigen Verfahren verschiedene Datenquellen, wie Satellitendaten (Oberflächentemperaturen und Vegetation), meteorologische Re-Analysedaten (u.a. Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Wolkenbedeckung), Landnutzungsdaten, topographische Daten und Messdaten von MeteoSchweiz in einem Machine-Learning Modell vereint. Diese Methode erlaubt die Modellierung von komplexen, nicht-linearen Beziehungen zwischen den vielen verschiedenen Datenquellen.

In der ersten Stufe der Modellentwicklung für die Aussentemperatur wurden anhand von statistischen Modellen die fehlenden Satellitendaten vervollständigt. Dies war nötig, da nicht für jeden Tag ein Satellitenbild zur Verfügung steht (z.B. wegen Bewölkung). Für die zweite Stufe wurden die Satellitendaten mit den Messdaten von MeteoSchweiz (Tmin, Tmax und Tmean) und weiteren geographischen Datensätzen (Vegetation, Strassen- und Gebäudedichte, Landnutzung, Topografie etc.) verknüpft. Mit Hilfe von Machine-Learning Techniken (Random Forest) wurde die räumliche und zeitliche Variabilität der Temperatur erklärt und wichtige Einflussfaktoren bestimmt. Schlussendlich wurde so für jedes Jahr zwischen 2003 und 2019 ein Modell für die Aussentemperatur entwickelt, dass für ein Gitternetz von 100x100 m für jeden Tag die minimale, maximale und mittlere Temperatur bestimmen kann. Die Modelle Flückiger et al. (40) wurden anhand Messdaten geprüft und validiert.

14.2.2 Validierung

Das Temperaturmodell mit einer Auflösung von 100x100 m erlaubt es, die räumliche Variabilität der Temperatur genauer als mit bisher vorhandenen räumlichen Daten, z.B. von MeteoSchweiz, abzubilden. Gerade bei komplexen Oberflächenstrukturen (beispielsweise Täler) wird die Genauigkeit der Expositionsabschätzung verbessert. Abbildung 48 zeigt für einen Ausschnitt über Bellinzona (5. Juli 2015) die räumlichen Unterschiede der Tmax zwischen dem Modell Flückiger et al. (40) und dem MeteoSchweiz Gitterdatensatz (Auflösung 2x2 km) (51) auf. Die detailliertere Abbildung der räumlichen Temperaturverteilung im Ausschnitt des Modells Flückiger et al. ist deutlich erkennbar.

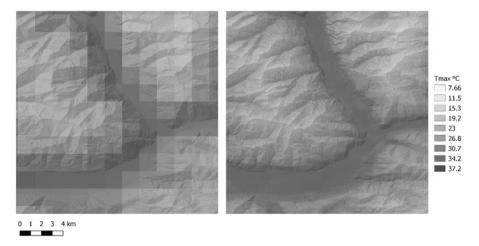


Abbildung 48: Modellierte Tageshöchst-Temperaturen (Tmax) am 5. Juni 2015 über Bellinzona. Gitterdatensatz von MeteoSchweiz (Auflösung 2x2 km) (links). Modell Flückiger et al. (Auflösung 100x100 m) (rechts).

Durch die hohe Auflösung ist das neue Modell ausserdem imstande, auch innerhalb von Städten die räumliche Variabilität besser abzubilden. Dies ist gerade für die Verwendung in epidemiologischen Studien von Vorteil, da ein grosser Teil der Bevölkerung in städtischen Gebieten wohnt. Abbildung 49



zeigt die modellierten Tmax (links) bzw. Tmin (rechts) an zwei Standorten in Basel, sowie die gemessene Temperatur an der MeteoSchweiz Messstation Basel-Binningen während einer Hitzeperiode im Sommer 2003 vom 2. Juli bis zum 13 Juli.

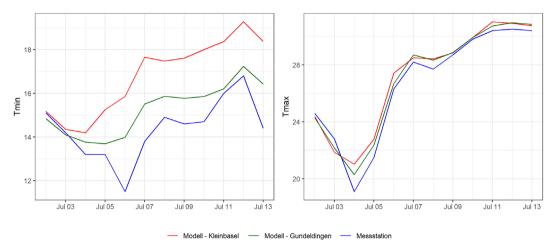


Abbildung 49: Vergleich von modellierten Tageshöchst-Temperaturen (Tmax) bzw. Tagesminimum-Temperatur (Tmin) an zwei städtisch geprägten Standorten in Basel (Gundeldingen, Kleinbasel) sowie der gemessenen Tmax bzw. Tmin an der MeteoSchweiz Messstation Basel-Binningen am Stadtrand während einer Hitzeperiode im Sommer 2003 vom 2. Juli bis zum 13. Juli

Während bei der Tmax keine grossen Unterschiede zwischen den Standorten bestehen, unterscheidet sich die Tmin deutlich. Sowohl zwischen den zwei modellierten Werten der Standorte Kleinbasel und Gundeldingen als auch zwischen den urbanen Standorten innerhalb der Stadt und dem gemessenen Wert an der Messstation. Das Modell zeigt, dass in dem sehr urban geprägten Standort in Kleinbasel die Temperatur weniger stark sinkt als am Stadtrand (Messstation Basel-Binningen).

Vergleiche des zeitlichen Verlaufs der modellierten maximalen Aussentemperatur Tmax des Modells Flückiger et al. mit vorhandenen Datensätzen zeigen eine gute Übereinstimmung. Es wurden keine nennenswerten Unterschiede betreffend der durchschnittlichen Tmax pro Monat und pro Jahr, gemittelt über alle Gitterpunkte der Schweiz, zwischen den beiden Ansätzen, gefunden.



14.3 Gebäudekennwerte und -bauteile

14.3.1 Basisgebäude Alt- und Neubau

Das in Abbildung 50 abgebildete Gebäude eines repräsentativen Altbaus und das in Abbildung 51 abgebildete Gebäude für einen repräsentativen Neubau bilden die Basis für die Simulationsberechnungen des Abschnittes 3.3 und Abschnittes 3.4. Die Gebäude werden am Standort Basel-Binningen berechnet. Die Berechnungen erfolgen mit IDA ICE Version 4.8 SP2.

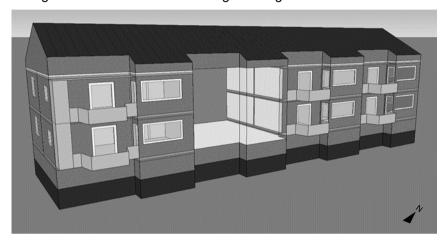


Abbildung 50: Repräsentativer Altbau als Basis für die Simulationsberechnungen.

Die verwendeten Klimaszenarien umfassen die Daten der SIA 2028 (für die Periode 1984-2003), das Medianjahr 2060 und das heisses Jahres 2060 (siehe Abschnitt 3.1).

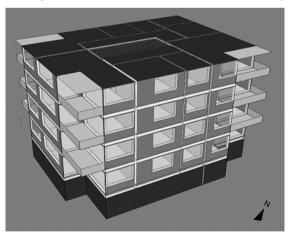


Abbildung 51: Repräsentativer Neubau als Basis für die Simulationsberechnungen.

Damit die Berechnungszeit und das Datenhandling in einer vernünftigen Zeitdauer durchgeführt werden konnte, wurden gleiche Raumzonen für die Simulationsberechnungen zusammengefasst.



14.3.2 Flächen Alt- und Neubau

In Tabelle 29 sind die in den Simulationsberechnungen verwendeten Flächen zusammengefasst.

Flächenkennwerte	Alth	oau	Neu	bau
	Wohnzimmer	Schlafzimmer	Wohnzimmer	Schlafzimmer
Fassadenfläche ohne Fenster	113 m²	324 m²	231 m²	222 m²
Fensterfläche	112 m²	89 m²	357 m²	111 m²
Fensteranteil auf Gesamtfassade bezogen	50%	21%	61%	33%
Öffenbarer Anteil der Fensterfläche	87%	71%	16%	33%
Wohnfläche	300 m ²	466 m²	636 m²	381 m²
Energiebezugsfläche (EBF)	494 m²	767 m²	947 m²	568 m²
Anzahl Räume	16 Stk.	32 Stk.	12 Stk.	24 Stk.
Fläche Kühldecke	177 m²	276 m²	378 m²	227 m²
Fläche Kühldecke / EBF	36	%	46	%
Fläche Kapillarrohrmatte	248 m²	388 m²	529 m²	317 m²
Fläche Kapillarrohrmatte / EBF	50%		64	%
Fläche Fussbodenheizung	248 m²	388 m²	529 m²	317 m²
Fläche Fussbodenheizung /EBF	50	%	64	%

Tabelle 29: Flächenkennwerte des Gebäudes für die Simulationsberechnungen.

14.3.3 Aufbau der Bauteile Altbau

Der geometrische und physikalische Aufbau der verwendeten Bauteile ist in Tabelle 30 bis Tabelle 35 dargestellt.

Aussenwand (von aussen nach innen)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Aussenputz	0.010	0.860	1800	1000
EPS	0.050	0.330	20	1450
Mauerwerk	0.300	0.580	1500	840
Innenputz	0.010	0.700	1400	1000

Tabelle 30: Verwendeter Aufbau der Aussenwand (Altbau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt $1.15 \ W/(m^2 \ K)$.

Steildach (von aussen nach innen)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Dachziegel Ton	0.020	1	2000	1000
Unterstruktur - Holztraverse	0.020	-	1.23	1008
Hinterlüftung	0.030	-	1.23	1008
Holzwerkstoffplatte	0.030	0.130	600	1700
Dämmung	0.080	0.044	100	1030

Tabelle 31: Verwendeter Aufbau des Steildaches (Altbau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt $0.45~\rm W/(m^2~\rm K)$.



Boden gegen unkonditionierte Räume (von oben nach innen)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Parkett	0.010	0.170	780	1700
Unterlagsboden Zement	0.070	1.200	2000	1000
Trittschalldämmung EPS	0.020	0.033	30	1450
Beton armiert mit 2% Stahl	0.150	2.500	2400	1000
Dämmung	0.040	0.044	40	1450
Innenputz	0.010	0.700	1400	1000

Tabelle 32: Verwendeter Aufbau des Bodens gegen unkonditionierte Räume (Altbau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt 0.53 W/(m² K).

Im Gebäude sind zwei Arten von Innenwänden verbaut. Die Innenwände parallel zur Hauptfassade weisen eine Dicke von 0.3 m auf, die übrigen Innenwände eine Dicke von 0.15 m.

Innenwand	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Innenputz	0.010	0.700	1400	1000
Mauerwerk	0.130 0.280	1.500	1500	840
Innenputz	0.010	0.700	1400	1000

Tabelle 33: Verwendeter Aufbau der Innenwände (Altbau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt 2.37 W/(m² K) beziehungsweise 1.20 W/(m² K).

Zwischenboden (von oben nach unten)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Parkett	0.010	0.170	780	1700
Unterlagsboden Zement	0.070	1.000	1800	1000
Trittschalldämmung EPS	0.020	0.033	30	1450
Beton armiert mit 2% Stahl	0.150	2.500	2400	1000
Innenputz	0.010	0.700	1400	1000

Tabelle 34: Verwendeter Aufbau des Zwischenbodens (Altbau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt 1.01 W/(m² K).

Die Verglasung und der Sonnenschutz weisen folgende Kennwerte auf:

Verglasung und Sonnenschutz	Beschreibung/Kennwert
Type der Verglasung	Dreifachverglasung
Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert Verglasung	0.64
Wärmedurchgangskoeffizient Glas	1.8 W/(m²/K)
Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen	1.5 W/(m²/K)
Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert Sonnenschutz	0.32
Betriebsweise des Sonnenschutzes	Schliesst, wenn Sonneneinstrahlung auf Fassade > 150 W/m² Innentemperatur > 20.5° und gleitender Mittelwert (48 h) unter 19°C 2/3 der Fensterfläche beschattet, 1/3 bleibt transparent

Tabelle 35: Verwendete Verglasung und eingesetzter Sonnenschutz (Altbau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).



14.3.4 Aufbau der Bauteile Neubau

Der geometrische und physikalische Aufbau der verwendeten Bauteile ist in Tabelle 36 bis Tabelle 42 dargestellt.

Aussenwand (von aussen nach innen)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Aussenputz	0.010	0.860	1800	1000
Dämmung, Swissspor Lambda White 030	0.160	0.030	19	1006
Backstein	0.175	0.170	750	1000
Innenputz	0.010	0.700	1400	1000

Tabelle 36: Verwendeter Aufbau der Aussenwand (Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt $0.15~W/(m^2~K)$.

Flachdach (von aussen nach innen)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Bitumen	0.008	0.170	1180	1000
Swisspor PUR Premium	0.120	0.020	30	1400
Beton armiert mit 2% Stahl	0.260	2.500	2400	1000
Innenputz	0.015	0.700	1400	1000

Tabelle 37: Verwendeter Aufbau des Flachdaches (Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt 0.16 W/(m² K).

Boden gegen unkonditionierte Räume (von oben nach unten)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Parkett	0.015	1	900	2200
Unterlagsboden Anhydrit mit Bodenheizung	0.075	-	2000	1000
Dämmung, Isover PS 81	0.020	0.032	80	1030
Dämmung, Swisspor PUR Alu	0.100	0.023	30	1404
Beton armiert mit 2% Stahl	0.240	2.500	2400	1000

Tabelle 38: Verwendeter Aufbau des Bodens gegen unkonditionierte Räume (Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt 0.19 W/(m² K).

Es sind zwei Arten von Innenwandkonstruktionen verbaut.

Innenwand 1	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Gipskartonplatte	0.026	0.250	900	1000
Luftspalt	0.062	0.170	1.2	1006
Dämmung	0.040	0.036	20	750
Gipskartonplatte	0.026	0.250	900	1000

Tabelle 39: Verwendeter Aufbau der Innenwand 1 (Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt $0.54~W/(m^2~K)$.



Innenwand 2	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Gipskartonplatte	0.013	0.250	900	1000
Luftspalt	0.032	0.170	1.2	1006
Dämmung	0.040	0.036	20	750
Gipskartonplatte	0.026	0.250	900	1000
Luftspalt	0.028	0.170	1.2	1006
Gipskartonplatte	0.026	0.250	900	1000
Dämmung	0.040	0.036	20	750
Luftspalt	0.032	0.170	1.2	1006
Gipskartonplatte	0.013	0.250	900	1000

Tabelle 40: Verwendeter Aufbau der Innenwand 2 (Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt $0.30~W/(m^2~K)$.

Zwischenboden (von oben nach unten)	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Parkett	0.015	ı	900	2200
Unterlagsboden Anhydrit mit Bodenheizung	0.075	1	2000	1000
Dämmung, Isover PS 81	0.020	0.032	80	1030
Dämmung, EPS 0.33	0.020	0.033	80	1030
Beton armiert mit 2% Stahl	0.240	2.500	2400	1000

Tabelle 41: Verwendeter Aufbau des Zwischenbodens (Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Der U-Wert beträgt 0.60 W/(m² K).

Die Verglasung und der Sonnenschutz weisen folgende Kennwerte auf:

Verglasung und Sonnenschutz	Beschreibung/Kennwert
Type der Verglasung	Dreifachverglasung
Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert Verglasung	0.51
Wärmedurchgangskoeffizient Glas	0.7 W/(m²/K)
Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen	1.1 W/(m²/K)
Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert Sonnenschutz	0.25
Betriebsweise des Sonnenschutzes	Schliesst, wenn Sonneneinstrahlung auf Fassade > 150 W/m² Innentemperatur > 20.5° und gleitender Mittelwert (48 h) unter 19°C 2/3 der Fensterfläche beschattet, 1/3 bleibt transparent

Tabelle 42: Verwendete Verglasung und eingesetzter Sonnenschutz (Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).



14.3.5 Interne Wärmelasten

In Tabelle 43 sind die in den Simulationsberechnungen verwendeten internen Lasten sowie deren Betriebszeit zusammengefasst.

Тур	Leistung	Anteil	Fahrplan
Geräte	8.0 W/m ²	100%	19:00-20:00
		80%	06:00-07:00, 12:00-13:00, 18:00-19:00
		20%	05:00-06:00, 07:00-08:00, 13:00-14:00,17:00-18:00, 20:00-23:00
		10%	00.00-05:00, 08:00-12:00, 14:00-17:00, 23:00-00:00
Beleuchtung	2.7 W/m ²	100%	06:00-08:00, 12:00-14:00, 18:00-21:00, wenn Beleuchtungsstärke < 50 Lux
Personen	70 W/Person	100%	06:00-22:00 Wohnzimmer, 22:00-06:00 Schlafzimmer, 30m²/Person

Tabelle 43: Interne Wärmelasten für den Alt- und Neubau.

14.3.6 Kühlbedarf Kühllösung (ergänzend zur Fensterlüftung) Alt- und Neubau

Die mit den Simulationsberechnungen ermittelten Energie- und Leistungsparameter sind in Tabelle 44 dargestellt.

Kühllösung ergänzend zur Fensterlüftung	Altbau	Neubau
Maximale Kühlleistung für Fernkälte und Kältemaschine mit Hybridkühler	35 kW, 27.7 W/m ² _{EBF}	45 kW, 29.7 W/m ² _{EBF}
Kühlenergiebedarf (Nutzenergie), Medianjahr 2060	4.6 kWh/(m ² _{EBF} a)	3.7 kWh/(m² _{EBF} a)
Kühlenergiebedarf (Nutzenergie), heisses Jahr 2060	6.2 kWh/(m ² _{EBF} a)	5.0 kWh/(m² _{EBF} a)

Tabelle 44: Ermittelte maximale Kühlleistung und berechneter Kühlenergiebedarf (Nutzenergie) der zur Fensterlüftung ergänzenden Kühllösung für das Medianjahr 2060 und das heisse Jahr 2060 für den Alt- und Neubau. Mittelwert aus den Kühllösungen (WP) EWS + Kapillarrohrmatte und KM mit Hybridkühler + Kühldecke.

Der Altbau verfügt über eine Wärmespeicherfähigkeit von 150 Wh/(m² K), der Neubau von 170 Wh/(m² K). Beide Bauten entsprechen einer massiven Bauweise.



14.4 Leistungswerte der Kühllösungen

14.4.1 Fensterlüftung

Die Fensterlüftung ist das wichtigste Kühlsystem, das zur Verfügung steht. Die erhöhten Temperaturen durch den Klimawandel haben auf die Kühlwirkung einen grossen Einfluss.

Die Kühlleistung, der durch eine Fensteröffnung strömenden Luft, lässt sich wie folgt berechnen

$$\dot{Q} = C_d H B \rho_l c_l \frac{1}{3} \sqrt{g H \frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{\vartheta_a + 273.15}} (\vartheta_i - \vartheta_a)$$
 (14.4.1-1).

Die Auswertung der Gleichung (14.4.1-1) zeigt, dass die Kühlleistung proportional zur Temperaturdifferenz $(\vartheta_i - \vartheta_a)^{1.5}$ ist, ebenfalls zur Höhe $H^{1.5}$. Die Breite B geht linear in die Gleichung ein. Sind die klimatischen Bedingungen gegeben, kann die Kühlleistung nur mit der Veränderung der Fensterfläche erhöht werden. Dabei führt eine Verdoppelung der Höhe zu einer 2.8-fachen, eine Verdoppelung der Breite zu einer Verdoppelung der Kühlleistung. Hohe Öffnungen sind deshalb breiten Öffnungen vorzuziehen. Reduziert sich die Temperaturdifferenz durch den Klimawandel an kritischen Tagen zwischen innen und aussen auf die Hälfte, reduziert sich die Kühlleistung auf $(0.5^{1.5} = 0.35)$ 35%. Dieses Resultat zeigt, wie sensitiv die Kühlleistung auf veränderte Aussenbedingungen reagiert. Hitzeinseln führen ebenfalls zu einer Reduktion der Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen, was die Kühlwirkung weiter verringert.

Die in den Simulationsberechnungen verwendete Fensterlüftung für den Alt- und Neubau weist folgende Parameter auf:

Fensterlüftung	Altbau		Neubau		
	Wohnzimmer	Schlafzimmer	Wohnzimmer	Schlafzimmer	
Art der Fensteröffnung	Geöffneter Flügel o	Geöffneter Flügel ohne Querlüftung		Geöffneter Flügel ohne Querlüftung	
Öffnungsfläche	98 m²	63 m ²	58 m²	37 m²	
Bodenfläche	300 m ²	466 m²	636 m²	381 m²	
Raumvolumen	733 m³	1138 m³	1589 m³	936 m³	
Bedingung Öffnen/Schliessen	Auf > 20 °C	Auf > 20 °C	Auf > 20 °C	Auf > 20 °C	
	Zu < 20 °C	Zu < 20 °C	Zu < 20 °C	Zu < 20 °C	
Freigabe zum Öffnen	22:00-06:00	22:00-06:00	22:00-06:00	22:00-06:00	

Tabelle 45: Verwendete Parameter der Fensterlüftung (Alt- und Neubau) in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).

14.4.2 Wearables (Embr Wave)

In der Tabelle 46 sind die Leistungswerte des am Handgelenk tragbaren Kühlelements zusammengefasst. Hinweise zur Funktions- und Wirkungsweise sind in Abschnitt 4.2 zu finden.

Einschalt-/Ausschaltpunkt Wearable (Embr Wave)	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Empfundene Temperaturreduktion während der Betriebszeit	2 K bei Start, danach Reduktion der Wirkung um 0.25 K/Std.
Nutzungsdauer und Anzahl Geräte	4 Jahre, 48 Stück (Altbau), 36 Stück (Neubau), 3 Geräte pro Wohnung

Tabelle 46: Verwendete Parameter, des auf der Haut tragbaren Kühlelementes (Embr Wave), in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).



14.4.3 Bettenkühlung

In der Tabelle 47 sind die Leistungswerte der Bettenkühlung zusammengefasst. Hinweise zur Funktions- und Wirkungsweise sind in Abschnitt 4.3 zu finden.

Einschalt-/Ausschaltpunkt Bettenkühlung	24°C Schlafzimmer
Erreichbares Mikroklima während der Betriebszeit	3 K
Nutzungsdauer und Anzahl Geräte	5 Jahre, 48 Stück (Altbau), 36 Stück (Neubau), 3 Geräte pro Wohnung

Tabelle 47: Verwendete Parameter der Bettenkühlung in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).

14.4.4 Standventilator

In der Tabelle 48 sind die Leistungswerte des Standventilators zusammengefasst. Hinweise zur Funktions- und Wirkungsweise sind in Abschnitt 4.1 zu finden.

Einschalt-/Ausschaltpunkt Ventilator	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Empfundene Temperaturreduktion während der Betriebszeit	Abhängig von Innentemperatur. Schlafzimmer (Person 60-
	70% mit Duvet bedeckt) bei 24°C 0.76 K, bei 26°C 0.52 K,
	bei 30°C 0.29 K. Wohnzimmer bei 24°C 2.52 K, bei 26°C
	1.73 K, bei 30°C 0.97 K
Nutzungsdauer und Anzahl Geräte	10 Jahre, 32 Stück (Altbau), 24 Stück (Neubau), 2 Geräte pro Wohnung

Tabelle 48: Verwendete Parameter des Standventilators in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).

14.4.5 Mobiles Kühlgerät (mobiles Kompaktgerät)

Mobile Kühlgeräte, auch mobile Kompaktgeräte genannt, sind in zwei Ausführungen erhältlich.

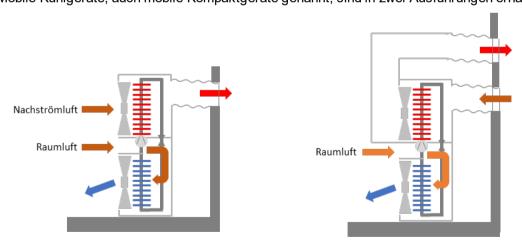


Abbildung 52: Schematische Darstellung des mobilen Kühlgerätes als Einschlauchsystem (links) und Zweischlauchsystem (rechts).

Einschlauchsystem

Das Kühlgerät saugt die warme Luft aus dem Raum an, kühlt sie durch das Verdampfen des Kältemittels im Kühlregister (blau, Kältemittelverdampfer) ab und bläst sie wieder in den Raum ein. Der Ventilator des Kältemittelkondensators (rot) saugt die Luft ebenfalls aus dem Raum an. Er bläst die Luft durch das Kondensatorregister, wo sich diese erwärmt und dann nach Draussen strömt. Gleichzeitig wird das Kältemittel wieder kondensiert. Der Nachteil des Einschlauchsystems liegt darin, dass sowohl



die Luft für die Raumkühlung als auch die Luft für die Wärmeabfuhr am Kältemittelkondensator aus dem Raum angesogen wird. Es entsteht für den Raum ein Luftdefizit, dass von anderen Räumen oder von Draussen nachströmen muss (Nachströmluft). Strömt als Nachströmluft heisse Aussenluft (z.B. 30°C) in den Raum, muss diese zusätzlich gekühlt werden, was die effektive Kühlleistung für den Raum stark reduziert. Wird das Einschlauchsystem ausschliesslich für die Raumkühlung des Schlafzimmers in der Nacht, während Zeiten wo die Fensterlüftung allein die Kühlleistung nicht mehr erbringen kann, eingesetzt, verbessert sich die Situation. Die Aussenlufttemperaturen liegt dann meist unterhalb der geforderten Raumlufttemperatur, wodurch die Nachströmluft den Raum nicht aufheizt.

Zweischlauchsystem

Das Zweischlauchsystem behebt den Nachteil der Nachströmluft des Einschlauchsystems, indem die benötigte Luft für den Kondensator durch den zweiten Schlauch Aussen angesogen, im Kondesator erwärmt und wieder nach Aussen geblasen wird. Damit entsteht im Raum kein Luftdefizit mehr und die Kühlleistung wird für die Raumkühlung genutzt.

Der Umgang mit der Nachströmluft ist entscheidend für die Wirkung des Kühlgerätes für den Raum. Eine optimale bauliche Integration ist unerlässlich.





Abbildung 53: Mobiles Kühlgerät als Einschlauchsystem (links) und Zweischlauchsystem (rechts) mit Fensteranschluss. Bilder: DeLonghi (links), Trotec Air Look (rechts).

In der Tabelle 49 sind die Leistungswerte des mobilen Kühlgerätes zusammengefasst. In den Simulationsberechnungen wird von einem Zweischlauchsystem ausgegangen (siehe Tabelle 9 zum Thema Kältemittel und GWP).

Kühlleistung des Kühlgerät	2.5 kW
Leistungszahl des Kühlgerätes	Mittelwert 2.4
Einschalt-/Ausschaltpunkt Kühlgerät	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Erreichbare Innentemperatur während der Betriebszeit	24 °C
Nutzungsdauer und Anzahl Geräte	10 Jahre, 32 Stück (Altbau), 24 Stück (Neubau), 2 Geräte pro Wohnung

Tabelle 49: Verwendete Parameter des mobilen Kühlgerätes in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.). Es wird von einem Zweischlauchsystem ausgegangen.



14.4.6 Kältemaschine mit Hybridkühler, Hybridkühler

In der Tabelle 50 sind die Leistungswerte der Kältemaschine und des Hybridkühler zusammengefasst.

Verdampfungstemperatur Kältemaschine	12°C
Rückkühlgrad Kältemaschine	0.33, 18°C-16°C bei 12°C Verdampfung
Rückkühlgrad Hybridkühler	0.67, 18°C-16°C bei 15°C Feuchtkugeltemperatur
Leistungszahl Kältemaschine mit Hybridkühler	Mittelwert 7.2 Reduktionsfaktor auf Carnot-Wirkungsgrad 0.53
Leistungszahl Hybridkühler	30
Einschalt-/Ausschaltpunkt Kühlung	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Umschaltung von Hybridkühler auf Kältemaschine mit Hybridkühler	Erreichbare Vorlauftemperatur zum Kälteabgabesystem höher als 18°C
Nutzungsdauer	20 Jahre

Tabelle 50: Verwendete Parameter der Kältemaschine und des Hybridkühlers in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).

14.4.7 Multifunktionale Luft-/Wasserwärmepumpe

In der Tabelle 51 sind die Leistungswerte der multifunktionalen Luft-/Wasserwärmepumpe zusammengefasst.

Verdampfungstemperatur Betrieb als Kältemaschine	12°C
Rückkühlgrad Betrieb als Kältemaschine	0.33, 18°C-16°C bei 12°C Verdampfung
Leistungszahl Betrieb als Kältemaschine	Mittelwert 5.6-5.9 Reduktionsfaktor auf Carnot-Wirkungsgrad 0.39
Einschalt-/Ausschaltpunkt Kühlung	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Nutzungsdauer	20 Jahre

Tabelle 51: Verwendete Parameter der multifunktionalen Luft-/Wasserwärmepumpe in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).

14.4.8 Erdwärmesonden

In der Tabelle 52 sind die Leistungswerte der Erdwärmesonden zusammengefasst.

Erdreichtemperatur	10°C
Rückkühlgrad Regeneration der Erdwärmesonden	0.25, 18°C-16°C bei 10°C Erdreichtemperatur
Leistungszahl Regeneration der Erdwärmesonden	Mittelwert 36
Einschalt-/Ausschaltpunkt Kühlung	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Nutzungsdauer	20 Jahre

Tabelle 52: Verwendete Parameter der Erdwärmesonden in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).



14.4.9 Grundwasser

In der Tabelle 53 sind die Leistungswerte der Grundwasserkühlung zusammengefasst.

Grundwassertemperatur	12°C
Rückkühlgrad direkter Grundwasserbetrieb	0.33, 18°C-16°C bei 12°C Grundwassertemperatur
Leistungszahl direkter Grundwasserbetrieb	Mittelwert 36
Einschalt-/Ausschaltpunkt Kühlung	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Nutzungsdauer	20 Jahre

Tabelle 53: Verwendete Parameter der Grundwasserkühlung in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).

14.4.10 Fernkälte

In der Tabelle 54 sind die Leistungswerte der Fernkälte zusammengefasst.

Wassertemperatur Fernkälte	12°C
Rückkühlgrad Fernkälte	0.33, 18°C-16°C bei 12°C Wassertemperatur Fernkälte
Leistungszahl Fernkälte	Mittelwert 7
Einschalt-/Ausschaltpunkt Kühlung	26°C Wohnzimmer, 24°C Schlafzimmer
Nutzungsdauer	20 Jahre

Tabelle 54: Verwendete Parameter der Fernkälte in den Simulationsberechnungen (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).

14.4.11 Fussbodenheizung, thermoaktives Bauteilsystem und Kapillarrohrmatte

Der nachfolgende Bodenaufbau wird für die Fussbodenheizung, das thermoaktive Bauteilsystem und das Anbringen der Kapillarrohrmatte verwendet.

Aufbau Fussbodenheizung	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmekapazität [J/(kg K)]
Parkett	0.015	0.200	900	2200
Unterlagsboden Anhydrit mit Bodenheizung	0.075	1.200	2000	1000
Trittschalldämmung	0.040	0.033	80	1030
Beton armiert, 2% Stahl	0.240	2.500	2400	1000

Tabelle 55: Verwendeter Bodenaufbau mit Fussbodenheizung für die Simulationsberechnungen (Neubau).



Fussbodenheizung

Der Wärmedurchgang von der Rohrebene der Fussbodenheizung nach oben beträgt 3.80 W/(m² K), nach unten 0.70 W/(m² K).



Abbildung 54 : Fussbodenheizung. Metall-Verbundrohre auf der Dämmung montiert vor der Einbringung des Unterlagsbodens Quelle: Xtegrasol.

Bei einem spezifischen Massenstrom von 5 kg/(h m²), einem Rohrabstand von 120 mm und einem Rohrdurchmesser von 14/10 mm ergibt sich gemäss Koschenz, Lehmann (15) (Fig. 4-11) ein Gesamtwiderstand zwischen der Vorlauftemperatur und der Temperatur in der Rohrebene von 0.13 m² K/W oder als Wärmedurchgang dargestellt von 7.7 W/(m² K). Der gesamte Wärmedurchgang zwischen der Vorlauftemperatur und dem Raum über die Decke und den Boden beträgt 2.8 W/(m² K). Dieser Wert ist bei der Nutzung der Fussbodenheizung zur Kühlung in den meisten Fällen zu gering und muss durch die Erhöhung des Wassermassenstroms und der Verringerung des Rohrabstandes reduziert werden. Es ist darauf zu achten, dass gut wärmeleitende Bodenbeläge eingesetzt werden.

Thermoaktives Bauteilsystem

Anstelle der Fussbodenheizung im Unterlagsboden wird das Rohrsystem in die Mitte der Betonschicht eingebaut.



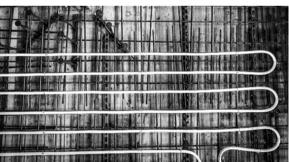


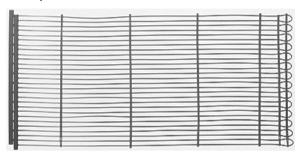
Abbildung 55: Thermoaktives Bauteilsystem TABS. Vorgefertigtes Rohrregister vor der Montage (links) und eingebautes TABS-System vor dem Betonieren. Quelle: Xtegrasol.

Der Wärmedurchgang von der Rohrebene des thermoaktiven Bauteilsystems nach oben beträgt 0.66 W/(m² K), nach unten 5.78 W/(m² K). Bei einem spezifischen Massenstrom von 15 kg/(h m²), einem Rohrabstand von 120 mm und einem Rohrdurchmesser von 14/10 mm ergibt sich gemäss (15) (Fig. 4-11) ein Gesamtwiderstand zwischen der Vorlauftemperatur und der Temperatur in der Rohrebene von 0.06 m² K/W oder als Wärmedurchgang dargestellt von 16.7 W/(m² K). Der gesamte Wärmedurchgang zwischen der Vorlauftemperatur und dem Raum über die Decke und den Boden beträgt 4.6 W/(m² K).



Kapillarrohrmatte

Die Kapillarrohrmatte wird auf die Betonunterseite aufgebracht und mit einer Gipsschicht überdeckt.



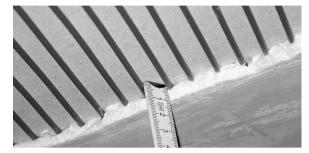


Abbildung 56: Kapillarrohrmatte vor der Montage (links) und an der Decke befestigt mit Gipsüberzug als Putzdecke (rechts). Gut zu erkennen ist die geringe Aufbauhöhe von ca. 10 mm, was den Einsatz auch in bestehenden Gebäuden und Umbauten ermöglicht. Quelle: Beka.

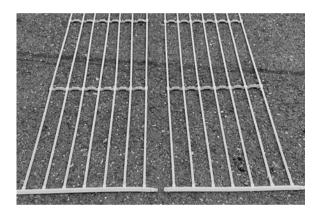




Abbildung 57: Kapillarrohrmatte vor der Montage (links) und an der Decke befestigt mit Sicht auf den Verteiler. Die Rohre an der Decke werden mit einem Grund- und Fertigputz, total ca. 28 mm, überdeckt (rechts). Quelle: Xtegrasol.

Der Wärmedurchgang von der Kapillarrohrmatte (gemäss Abbildung 56) nach oben beträgt 0.64 W/(m² K), nach unten 6.25 W/(m² K). Bei einem spezifischen Massenstrom von 15 kg/(h m²), einem Rohrabstand von 10 mm und einem Rohrdurchmesser von 3.1/0.55 mm ergibt sich gemäss (15) (Fig. 5.6) ein Gesamtwiderstand zwischen der Vorlauftemperatur und der Temperatur in der Rohrebene von 0.04 m² K/W oder als Wärmedurchgang dargestellt von 25 W/(m² K). Der gesamte Wärmedurchgang zwischen der Vorlauftemperatur und dem Raum über die Decke und den Boden beträgt 5.4 W/(m² K).

Im stationären Zustand und gleicher Vorlauf- und Raumtemperatur reduziert sich die Kühlleistung, ausgehend von der Kapillarrohrmatte, beim thermoaktiven Bauteilsystem um 15% und bei der Fussbodenheizung um 48%. Der grosse Unterschied zwischen der Kapillarrohrmatte und der Fussbodenheizung entsteht durch den bei der Fussbodenheizung um 67% geringeren Wassermassenstrom. Wählt man für die Konfiguration der Fussbodenheizung einen spezifischen Massenstrom von 15 kg/(h m²), resultiert eine Leistungsreduktion im Vergleich zur Kapillarrohrmatte von 34%.



14.4.12 Metallkühldecke

Bei der Metallkühldecke wird ein metallisches Rohrsystem auf eine Metalldecke möglichst stoffschlüssig aufgebracht.





Abbildung 58: Metallkühldecken Stahl. Quelle: Xtegrasol.

Für die Berechnungen wird von einer Kühlleistung von 70 W/m² bei einer Temperaturdifferenz zwischen der Raumlufttemperatur und der mittleren Wassertemperatur von 7 K ausgegangen.

14.4.13 Radiator

In der Tabelle 56 sind die Leistungswerte des Radiators zusammengefasst.

Modell	Zwei Heizplatten mit einem Konvektionsblech
Auslegetemperatur	Vorlauftemperatur 55°C, Rücklauftemperatur 45°C
Wärmeabgabe	Gemäss Heizleistung mit SIA 2028 Basel-Binningen berechnet
Heizkörperexponent	1.30

Tabelle 56: Verwendete Parameter des Radiators in den Simulationsberechnungen für den Altbau (Auswertung Abschnitt 3.3 und 3.4.).



14.5 Kosten der Kälteerzeugungs- und Kälteabgabesysteme

In den Tabelle 57 bis Tabelle 59 sind die in den Berechnungen verwendeten Kosten für die Anlagen, deren Montage, den jährlichen Unterhalt und den Rückbau zusammengefasst. Bei den Preisen handelt es sich um Erfahrungswerte der Industriepartner. Die Schwankungsbreite innerhalb einer Kühllösung hängt vor allem mit der Anlagengrösse zusammen. Anlagenpreis sind stark vom Markt und der Einkaufsmacht des Bestellers abhängig. Um nicht den Eindruck einer Scheingenauigkeit zu erlangen, wurde auf eine Net Present Value Berechnung (NPV) verzichtet.

Kälteerzeugung	Anlage [CHF/Stk] ^a [CHF/kW]	Montage [CHF/kW]	Unterhalt [CHF/ (kW Jahr)]	Rückbau [CHF/kW]	
Wearable (Embr Wave)	270°				
Bettenkühlung	270ª				
Standventilator	110ª				
Mobiles Kühlgerät	400°				
Fernkälte	150 + Grundanschluss CHF 8'000	400-650	10	10-30	
Hybridkühler	500-700 (500)	220-370	10-20	20-30	
Kältemaschine mit Hybridkühler	2'200-3'100 (1'690)	440-630	40-60	90-130	
Multifunktionale Luft- /Wasserwärmepumpe	2'700-3'400 (2'000)	410-520	40-50	80-100	
Wärmepumpe mit Erdwärmesonden	3'600-4'000 (2'500)	650-720	40-50	70-100	
Wärmepumpe mit Grundwasser	3'700-4'500 (2'500)	660-800	70-80	130-160	

Tabelle 57: Anlagen-, Montage-, Unterhalts- und Rückbaukosten der verschiedenen Kälteerzeugungssysteme. Der Leistungsbereich der Anlagen liegt zwischen 25-45 kW. Die in den Klammern angegebenen Werte entsprechen, als Vergleichswert, einer Kälteleistung von 100 kW. a) Einheit CHF/Stk. Kostenermittlung Implenia/Xtegrasol.

In Tabelle 58 sind die in den Berechnungen verwendeten Kosten (Neubau) für das Kälteabgabesysteme und die Verteilung, die Montage, den jährlichen Unterhalt und den Rückbau dargestellt.

Kälteabgabe Neubau	Abgabesystem und Verteilung	Montage	Unterhalt	Rückbau
	[CHF/(m ² _{EBF})]	[CHF/(m ² _{EBF})]	[CHF/ (m² _{EBF} Jahr)]	[CHF/(m ² _{EBF})]
Metallkühldecke	111	53	2	2
Kapillarrohrmatte	35ª	23	1	1
Thermoaktives Bauteilsystem	53	29	1	2
Fussbodenheizung	34	17	1	1

Tabelle 58: Kosten für verschiedene Kälteabgabesysteme und für die Verteilung, Montage und den Unterhalt und Rückbau (Neubau). a) Die Überdeckung der Kapillarrohrmatte mit einem Putz erfolgt bauseits und ist in den Kosten nicht eingerechnet. Kostenermittlung Implenia/Xtegrasol.



In Tabelle 59 sind die in den Berechnungen verwendeten Kosten für den Umbau dargestellt.

Kälteabgabe Umbau	Abgabesystem und Verteilung [CHF/(m² EBF)]	Montage [CHF/(m² EBF)]	Anpassung Steigzone [CHF/(m² _{EBF})]	Unterhalt [CHF/ (m² _{EBF} Jahr)]	Rückbau [CHF/(m² _{EBF})]
Metallkühldecke	119	53	21	2	2
Kapillarrohrmatte	62ª	23	21	1	1
Fussbodenheizung	Bestehend			1	1
Radiator	Bestehend			1	1

Tabelle 59: Kosten für verschiedene Kälteabgabesysteme und für die Verteilung, die Montage, Anpassungen in der Steigzone sowie für den Unterhalt und Rückbau (Umbau). a) Inklusive der Überdeckung der Kapillarrohrmatten mit einem Putz. Kostenermittlung Implenia/Xtegrasol.

Die Tabelle 60 fasst die in den Berechnungen verwendeten Energiepreise zusammen.

Energieform	Energiepreis [CHF/kWh]
Elektrizität	0.24
Fernkälte	0.16

Tabelle 60: Energiepreise, die in den Berechnungen berücksichtigt wurden.



14.6 Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb der Kälteerzeugungs- und Kälteabgabesysteme

In Tabelle 61 sind die in den Berechnungen verwendeten Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb der Kälteerzeugungssysteme zusammengefasst.

Kälteerzeugung	Erstellung [kg CO ₂ -eq/ Bezugseinheit]	Bezugs- einheit	Betrieb (Leistungszahl berücksichtigt) [kg CO ₂ -eq/ (kWh Elektrizität)]	Quelle
Wearable (Embr Wave)	9.2	Gerät	0.102	Eigene Berechnung
Bettenkühlung	31.4	Gerät	0.102	Eigene Berechnung
Standventilator	17.0	Gerät	0.102	Eigene Berechnung
Mobiles Kühlgerät	101.7	Gerät	0.043	Eigene Berechnung
Fernkälte	Neubau 0.2 Altbau 0.5	m ² _{EBF}	0.015	1/2 von KBOB ID 31.001 + 31.002 KBOB ID 31.003 (Sygren)
Hybridkühler	4.0	kg	0.003	Eigene Berechnung
Kältemaschine	11.6	kg	0.014	KBOB ID 31.018
Luft-/Wasserwärmepumpe	12.0	kg	0.018	KBOB ID 31.020
Wasserwasserwärmepumpe	11.6	kg		KBOB ID 31.018
Erdwärmesonden	28.1	m	0.003	KBOB ID 31.024
Grundwasserbrunnen	67.0	m	0.003	Eigene Berechnung

Tabelle 61: Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb der Kälteerzeugungssysteme.

Alle Kälteerzeugungssysteme werden mit Elektrizität betrieben. Als Grundlage für die Treibhausgasemissionen wird der CH-Verbrauchermix mit 0.102 kg CO₂-eq/kWh verwendet.

In Tabelle 62 sind die in den Berechnungen verwendeten Treibhausgasemissionen aus der Erstellung des Kälteabgabesystems dargestellt.

Kälteabgabe	Erstellung [kg CO ₂ -eq/(m ² _{FBF})]	Quelle
	[kg 002 0d/(iii EBF)]	
Metallkühldecke	22.6	KBOB ID 31.025, eigene Berechnung
Kapillarrohrmatte	Neubau 1.3 Umbau 1.7	Überdeckung mit Putz bauseits. Eigene Berechnung Inklusiv der Überdeckung mit einem Putz. Eigene Berechnung
Thermoaktives Bauteilsystem	4.8	Eigene Berechnung
Fussbodenheizung	Neubau/Umbau 5.1 Altbau 0.0	KBOB ID 31.024
Radiator	Altbau 0.0	KBOB ID 31.023

Tabelle 62: Treibhausgasemissionen aus der Erstellung der Kälteabgabesysteme.

Die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung, die in Abschnitt 3.3 und 3.4 (Abbildung 11 bis Abbildung 14) dargestellt sind, werden auf eine Lebensdauer von 20 Jahren normiert. Geräte mit einer kürzeren Lebensdauer als 20 Jahre, werden entsprechend ihrer Lebensdauer ersetzt (siehe Abschnitt 14.4).



14.7 Berechnungsmodell für die Dimensionierung von Kapillarrohrmatten

Damit der Komfort für die Person, die mit der Kühlfläche in Kontakt kommt, hoch ist, muss die Temperatur über die Kühlfläche ausgeglichen sein und möglichst nahe an die Körpertemperatur herankommen. Gleichzeitig muss der für die Kühlung benötigte Wärmestrom fliessen können. Ein Kapillarrohrsystem kann diese Anforderungen erfüllen. Der geringe Rohrabstand führt zu einem ausgeglichenen Temperaturfeld und erreicht einen hohen Wärmetauscherwirkungsgrad. Das nachfolgend beschriebene Berechnungsmodell bildet die Grundlage für den Vergleich mit den Messungen in Abschnitt 4.3.2.

Die Berechnung basiert auf den Grundlagen von Koschenz, Lehmann (15) (Kapitel 5 Thermische Modellierung von Kapillarrohrsystemen).

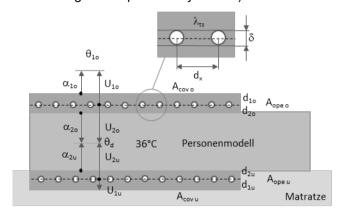


Abbildung 59: Personenmodell liegend mit der oberen und unteren Kapillarrohrmatte.

Die Gleichung

$$R_{t} = \frac{1}{m_{sp} c \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\left(R_{W} + R_{r} + R_{X} + \frac{1}{U_{1} + U_{2}}\right) m_{sp} c}\right]} - \frac{1}{U_{1} + U_{2}}$$
(14.7-1)

beschreibt den Widerstand zwischen der Kerntemperatur in der Rohrebene und der Vorlauftemperatur.

Der Widerstand zwischen dem Fluid und der Rohrwand wird, für laminare Strömung, mit

$$R_{w} = \frac{d_{x}}{\pi \lambda_{w}} \left(49.03 + 4.17 \, \frac{4}{\pi} \, \frac{m_{sp} \, c \, d_{x}}{\lambda_{w}} \right)^{-\frac{1}{3}} \tag{14.7-2}$$

berechnet. Der Widerstand der Rohrwand hat die Form

$$R_r = \frac{d_x \ln\left(\frac{\delta}{\delta - 2 d_r}\right)}{2 \pi \lambda_r} \tag{14.7-3}.$$

Der Widerstand der Rohranordnung basiert auf dem Rippenwirkungsgrad, ausgedrückt durch

$$R_{\chi} = \frac{1-\eta}{\eta(U_1 + U_2)} \tag{14.7-4}.$$

Bei einem Rippenwirkungsgrad $\eta=1$ wird der Widerstand $R_x=0$.

Der Rippenwirkungsgrad wird mit durch

$$\eta = \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\sqrt{\frac{U_1+U_2}{\lambda_{ts}\delta}}\frac{d_X}{2}\right)}{\frac{\sqrt{2}}{\pi}\sqrt{\frac{U_1+U_2}{\lambda_{ts}\delta}}\frac{d_X}{2}}$$
(14.7-5)

beschrieben.



In der Tabelle 63 sind die, in den Berechnungen in Abschnitt 4.3.2, verwendeten Werte zusammengefasst.

d ₁	λ ₁	α_1	U ₁	d ₂	λ_2	α_2	U ₂	d _x	λ_{ts}	δ	d _r	λ_{r}	A _{cov}	A _{ope}
Oben														
0.01	0.03	10.0	2.31	0.003	0.03	16.0	6.86	0.018	0.03	0.0031	0.00055	0.21	0.88	0.40
Unten														
0.01	0.03	0.0	0.00	0.003	0.03	16.0	6.86	0.018	0.03	0.0031	0.00055	0.21	0.40	0.16

Tabelle 63: Parameter für die Berechnung der Kapillarrohrmatte auf der oberen und unteren Seite des Personenmodells.

Der in den Berechnungen verwendete spezifische Wassermassenstrom beträgt 19 kg/(h m²). Tabelle 64 fasst die Resultate aus den Berechnungen mit den Gleichungen (14.7-1) bis (14.7-5) zusammen.

η	R _X	R _r	α_{w}	R _w	R _t	U _t
Oben						
0.67	0.05	0.01	1105	0.001	0.08	11.93
Unten						
0.73	0.05	0.01	1105	0.001	0.08	11.78

Tabelle 64: Resultat der berechneten Kapillarrohrmatten gemäss Gleichung (14.7-1) bis (14.7-5) bei einem spezifischen Wassermassenstrom von 19 kg/(h m²).

Mit der Veränderung des Wassermassenstroms kann, bei einem gegebenen Wärmestrom, die Temperaturdifferenz zwischen der Kerntemperatur in der Rohrebene und der Vorlauftemperatur verändert werden. Aus Sicht des thermischen Komforts soll der Wassermassenstrom hoch sein, damit die Vorlauftemperatur und die Kerntemperatur möglichst nahe beieinander liegen. Mischt man dem Rücklaufwasser zur Kühlung Frischwasser zu, soll der Massenstrom möglichst gering sein, um den Frischwasserverbrauch zu minimieren.

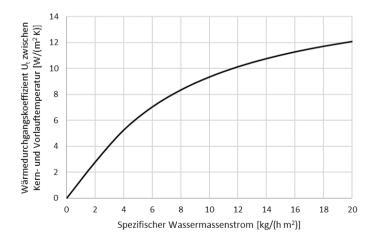


Abbildung 60: Abhängigkeit des Wärmedurchgangskoeffizienten U_t, zwischen der Kem- und Vorlauftemperatur, vom spezifischen Wassermassenstrom m_{so}.

Geht man beispielsweise von einer Kühlleistung der Kapillarrohrmatte von 15 W/m² aus, stellt sich bei einem Wassermassenstrom von 20 kg/(h m²) eine Temperaturdifferenz zwischen der Kerntemperatur und der Vorlauftemperatur von 1.3°C (Ut=12.1 W/(m² K) gemäss Abbildung 60), beim halben Wassermassenstrom eine Temperaturdifferenz von 1.6°C (Ut=9.4 W/(m² K)) ein. Die Anpassung des Wassermassenstroms weist damit ein Optimierungspotential für das Gesamtsystem auf.



A_{cov}	Mit Kapillarrohrmatten bedeckte Fläche	m²
A_{ope}	Nicht mit Kapillarrohrmatten bedeckte Fläche	m²
d	Bauteildicke	m
d_r	Dicke des Rohrmantels	m
d_x	Rohrmittenabstand	m
\dot{m}_{sp}	Spezifischer Wassermassenstrom	kg/(s m²); kg/(h m²)
R_r	Widerstand der Rohrwand	m²K/W
R_t	Totaler Widerstand zwischen der Kerntemperatur und der Vorlauftemperatur	m²K/W
R_w	Reziprokwert des Wärmeübergangs vom Fluid an die Rohrwand	m²K/W
$R_x^{"}$	Widerstand zwischen der äusseren Rohroberfläche und der Vorlauftemperatur	m²K/W
Ü	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
δ	Rohrdurchmesser aussen	m
η	Rippenwirkungsgrad der Kapillarrohrmatte	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
λ_r	Wärmeleitfähigkeit des Rohrmantels	W/(m K)
λ_{ts}	Wärmeleitfähigkeit der Schicht zwischen den Rohren	W/(m K)



14.8 Raummodell für die Ermittlung der Innentemperatur

Zur Darstellung der Sterblichkeit in Funktion der Innentemperatur ist ein Berechnungsmodell nötig, das die Innentemperatur aus der Solarstrahlung, der Aussentemperatur, den internen Wärmelasten, den physikalischen Kennwerten der Aussenflächen, der Verglasung, des Sonnenschutzes und der Beschaffenheit der speichernden Raummasse (Boden) ermittelt. Grundsätzlich kann diese Aufgabe mit einem thermischen Simulationsmodell, wie zum Beispiel mit IDA-ICE, für einen beliebigen Zeitpunkt gelöst werden. In der vorliegenden Untersuchung werden 301'437 Todesfälle und 1'032'707 Kontrolltage, mit einer Einschwingdauer pro Fall von 14 Tagen, berücksichtigt. Dies entspricht einer aneinander gereihten Zeitdauer von 54'828 Jahren. Um diese Berechnung in einer nützlichen Frist durchführen zu können, wurde ein vereinfachtes Verfahren entwickelt.

Die Energiebilanz am Knoten ϑ lautet

$$U_{fa} A_{fa} (\vartheta_a - \vartheta) + U_b A_b (\vartheta_b - \vartheta) + \dot{m} c (\vartheta_a - \vartheta) + \dot{Q}_v = 0$$
 (14.8-1)

und am Knoten ϑ_h

$$U_b A_b (\vartheta - \vartheta_b) + \dot{Q}_s = d_b \rho_b c_b A_b \frac{d\vartheta_b}{dt}$$
 (14.8-2).

Fügt man die Abkürzungen

$$A = U_{fa} A_{fa}; B = U_b A_b; C = \dot{m} c; D = \frac{d_b \rho_b c_b A_b}{\Delta t}$$
 (14.8-3)

ein, erhält man das Gleichungssystem

$$A(\theta_a - \theta) + B(\theta_b - \theta) + C(\theta_a - \theta) + Q_v = 0$$
(14.8-4)

$$B(\vartheta - \vartheta_h) + \dot{Q}_s = D(\vartheta_h - \vartheta_{h-1}) \tag{14.8-5}$$

Für die Innentemperatur ergibt sich daraus

$$\frac{\frac{B\ (D+B)}{(A+B+C)\ (D+B)-B^2}}{\left(\frac{1}{(D+B)}\dot{Q}_s + \frac{D}{(D+B)}\vartheta_{b-1} + \frac{(A+C)}{B}\vartheta_a + \frac{\dot{Q}_v}{B}\right] = \vartheta \tag{14.8-6}$$

und für die aktuelle Bodentemperatur

$$\frac{1}{(D+B)} \left[\dot{Q}_S + B \vartheta + D \vartheta_{b-1} \right] = \vartheta_b \tag{14.8-7}.$$

Der Luftmassenstrom durch das offene Fenster wird durch die Gleichung

$$\dot{m} = C_d H B \rho_l \frac{1}{3} \sqrt{g H \frac{\vartheta - \vartheta_a}{\vartheta_a + 273.15}}$$
 (14.8-8)

beschrieben. Die Fläche der Öffnung kann wie folgt dargestellt werden

 $H B = A_{fa} a_{fo}$ mit einer mittleren Höhe $H = \overline{H} = 1.2 m$.

Eingesetzt in Gleichung (14.8-8) ergibt sich für das vollständig geöffnete Fenster

$$\dot{m} = C_d A_{fa} a_{fo} \rho_l \frac{1}{3} \sqrt{g \, \overline{H} \, \frac{\vartheta - \vartheta_a}{\vartheta_a + 273.15}}$$
 (14.8-9).

Die empirische Grösse des Durchflusskoeffizienten kann näherungsweise mit 0.6 angenommen werden.

Klimadaten

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Abschnitt 3, wo zukünftige Klimadaten verwendet werden, basieren die Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Sterblichkeit und der Innentemperatur auf aktuellen, gemessenen Wetterdaten. In Konsistenz zu den Mortalitätsdaten umfasst die betrachtete Zeitperiode die Jahre 2003 bis 2016. Das verfeinerte Datenmodell auf Basis eines 100x100 Meter Rasters (siehe Abschnitt 14.2) berechnet die Temperatur- und Strahlungsverhältnisse für jeden



Standort mit einem Todesfall. Dabei wird für die Aussenlufttemperatur das Tagesmaximum und das Tagesminimum ermittelt. Die Ausgangsdaten stammen aus den Messungen von MeteoSchweiz. In der vorliegenden Untersuchung werden zwischen 294 (Jahr 2003) und 534 (Jahr 2018) unterschiedliche Messtationen berücksichtigt. Da für die Simulationsberechnungen, zur Bestimmung der Innentemperatur, stündlich Werte der Aussenlufttemperatur nötig sind, werden diese aus den Extremwerten umgerechnet. Für diese Umrechnung wird der in (52) von Chow et al. publizierte Ansatz verwendet:

$$\vartheta_a = f_1 \,\vartheta_{a,min} + f_2 \,\vartheta_{a,max} \tag{14.8-10}$$

$$mit f_1 + f_2 = 1 (14.8-11)$$

also

$$\vartheta_a = f_1 \, \vartheta_{amin} + (1 - f_1) \, \vartheta_{amax}$$
 (14.8-12).

Für $t \le t_{a.min}$ gilt

$$f_1 = \frac{\cos(\pi (t_{a,min} - t)/(24 + t_{a,min} - t_{a,max})) + 1}{2}$$
 (14.8-13)

 $\mbox{für } t_{a,min} < t < t_{a,max}$

$$f_1 = \frac{\cos(\pi (t - t_{a,min})/(t_{a,max} - t_{a,min})) + 1}{2}$$
(14.8-14)

und für $t \ge t_{a,max}$

$$f_1 = \frac{\cos(\pi (24 + t_{a,min} - t)/(24 + t_{a,min} - t_{a,max})) + 1}{2}$$
 (14.8-15).

In Abbildung 61 ist der Vergleich des Tagesverlaufes der Aussenlufttemperatur für die Station Basel-Binningen mit dem aus dem Tagesmaximum und Tagesminimum berechneten Tagesverlauf für die Periode vom 20. April 2003 bis 29. April 2003 dargestellt.

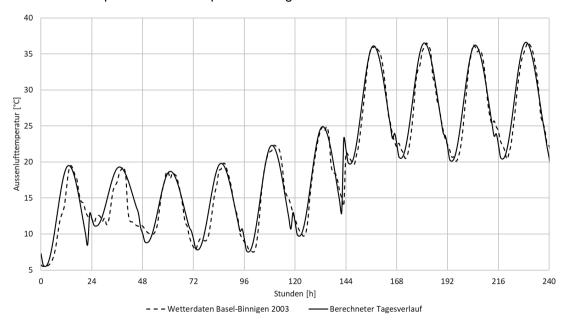


Abbildung 61: Vergleich des Tagesverlaufes der Aussenlufttemperatur für die Station Basel-Binningen mit dem aus dem Tagesmaximum und Tagesminimum berechneten Tagesverlauf für die Periode vom 20. April 2003-29. April 2003.

Der Vergleich des zweiten Tages zeigt eine Abweichung zwischen den gemessenen und den aus den Extremwerten berechneten Temperaturen sowohl am Morgen als auch am Nachmittag. Die Berechnung nach der Gleichung (14.8-10) geht von einem Cosinus förmigen Tagesverlauf (14.8-13) bis



(14.8-15)) aus. Die Messdaten zeigen am Morgen und am Nachmittag eine Bewölkungssituation. Die Aussenlufttemperatur wird mit dem Berechnungsmodell in diesem Fall überschätzt. Die Minimal- und Maximalwerte werden jedoch korrekt abgebildet. Vergleicht man die Temperaturverläufe der ganzen dargestellten Periode, wird eine gute Übereinstimmung sichtbar. Für den betrachteten Zeitpunkt in der Berechnung wird von einer Morgendämmerung um 05:00 und einer Abenddämmerung um 20:00 ausgegangen. Die höchste Aussentemperatur wird um 15:00, die tiefsten um 04:00 erreicht.

A_{b}	Bodenfläche	m ²
A_{fa}	Fassadenfläche	m ²
a_{fo}	Öffnungsanteil des Fensters bezogen auf die Fassadenfläche	-
\vec{B}	Breite der Öffnung	m
C_d	Durchflusskoeffizient (Discharge Coefficient)	-
C	Spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)
d_b	Speicheraktive Dicke des Bodens	m
f_1 , f_2	Gewichtungsfaktor der maximalen, minimalen Aussenlufttemperatur	-
g	Erdbeschleunigung	m/s²
Н	Höhe der Öffnung	m
ṁ	Luftmassenstrom	kg/s
U_b	Wärmedurchgangskoeffizient Boden	W/(m ² K)
U_{fa}	Wärmedurchgangskoeffizient Fassade	W/(m ² K)
ϑ_a	Aussentemperatur	°C
$\vartheta_{a,max}$	Maximale Aussenlufttemperatur	°C
$\vartheta_{a,min}$	Minimale Aussenlufttemperatur	°C
θ	Innentemperatur	°C
t	Zeit	h
$t_{a,max}$	Zeitpunkt der maximalen Aussenlufttemperatur	h
$t_{a,min}$	Zeitpunkt der minimalen Aussenlufttemperatur	h
ϑ_b	Bodentemperatur	°C
ϑ_{b-1}	Bodentemperatur im vergangen Zeitschritt	°C
ρ_b	Dichte des speicheraktiven Bodenmaterials	kg/m³
$ ho_l$	Dichte der Luft	kg/m³
\dot{Q}_v	Wärmetransport durch Ventilation	W
\dot{Q}_s	Wärmetransport durch Strahlung	W

Für die Berechnungen wurden die in Tabelle 62 aufgelisteten Daten verwendet.

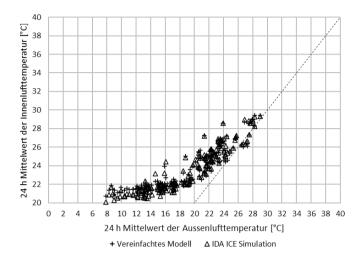
Parameter	EFH	MFH Alt (Altbau)	MFH Neu (Neubau)
U_{fa}	1.62 W/(m ² K)	1.72 W/(m ² K)	0.46 W/(m ² K)
A_{fa}	86 m²	229 m²	231 m ²
U_b	10.0 W/(m ² K)	8.34 W/(m ² K)	9.1 W/(m ² K)
A_b	75 m²	265 m²	325 m²
d_b	0.15 m	0.15 m	0.15 m
\dot{Q}_{int}	3.1 W/m ²	4.8 W/m ²	4.5 W/m ²
a_{fo}	8.4%	11.7%	10.3%

Tabelle 65: Kennwerte der Gebäude für den Vergleich der Berechnungsmodelle. Das MFH Alt (Altbau) und MFH Neu (Neubau) werden für den Modellvergleich verwendet. Alle Typen werden für die Berechnungen in Abschnitt 5.3.2 eingesetzt.

Bei den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass in den Gebäuden eine aktive Fensterlüftung (ohne Querlüftung) betrieben wird. Ab 20°C wird das Fenster geöffnet, unter 20°C wieder geschlossen. Der Wohnung wird nicht unterkühlt. Das Fenster kann zwischen 20:00 und 05:00 geöffnet werde.



Abbildung 62 zeigt auf der linken Seite den Zusammenhang zwischen der mittleren Aussenlufttemperatur und der mittleren Innenlufttemperatur (24h Mittelwert).



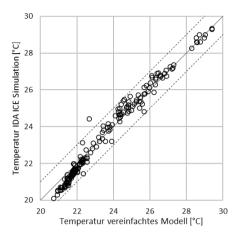
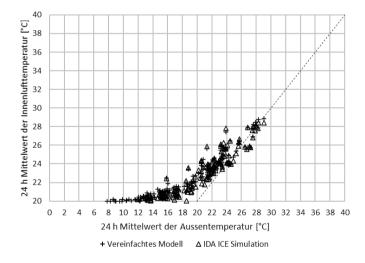


Abbildung 62: Vergleich des 24 h Mittelwert der Innenlufttemperatur (Neubau) in Abhängigkeit des 24 h Mittelwert der Aussenlufttemperatur zwischen dem Referenzmodell IDA ICE und dem vereinfachten Modell (links). Gegenüberstellung der, mit den beiden Modellen berechneten, Innenlufttemperatur (rechts).

Gut zu erkennen ist, dass sich die mittlere Innenlufttemperatur und die mittlere Aussenlufttemperatur bei höherer Aussenlufttemperatur annähern (gestrichelte Linie, wo Innenlufttemperatur gleich Aussenlufttemperatur). Dieser Effekt gilt sowohl für den Alt- als auch für den Neubau.



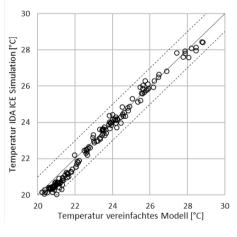


Abbildung 63: Vergleich des 24 h Mittelwert der Innenlufttemperaturen (Altbau) in Abhängigkeit des 24 h Mittelwert der Aussenlufttemperatur zwischen dem Referenzmodell IDA ICE und dem vereinfachten Modell (links). Gegenüberstellung der, mit den beiden Modellen berechneten, Innenlufttemperatur (rechts).

Ebenso zeigen die Abbildungen deutlich, dass sich bei einer bestimmten Aussenlufttemperatur nicht immer die gleiche Innenlufttemperatur einstellt, sondern eine grosse Bandbreite (5 K) entsteht. Dieses Ergebnis ist der unterschiedlichen Temperaturentwicklung des Gebäudes in der Vergangenheit bis zum betrachteten Tag des Todesfalls geschuldet. Das als Speicher agierende Gebäude hat einen unterschiedlichen Ladezustand, was eine Auswirkung auf die Innenlufttemperatur hat. Auf der rechten Seite der Abbildung 62 sind die berechneten Innenlufttemperaturen für das vereinfachte Modell (x-Achse) und für das Referenzmodell IDA ICE (y-Achse) dargestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Verteilung der Werte in einem Band von +/-1 K liegt. Die Auswertung, des in Abbildung 63



auf der rechten Seite dargestellten Modellvergleiches, zeigt wiederum eine gute Übereinstimmung zwischen dem Referenzmodell IDA ICE und dem vereinfachten Modell. Das vereinfachte Modell unterschätzt die Innenlufttemperaturen unterhalb von 22°C leicht.

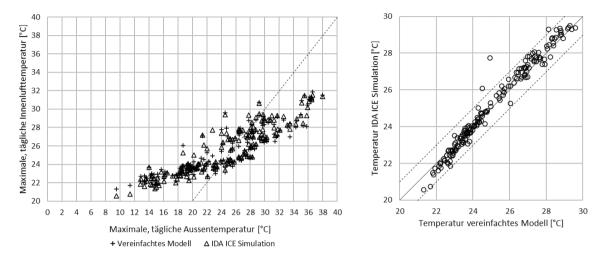


Abbildung 64: Vergleich der maximalen täglichen Innenlufttemperatur (Neubau) in Abhängigkeit der maximalen täglichen Aussenlufttemperatur zwischen dem Referenzmodell IDA ICE und dem vereinfachten Modell (links). Gegenüberstellung der, mit den beiden Modellen berechneten, Innenlufttemperatur (rechts).

Betrachtet man anstelle der Mittelwerte die maximalen Temperaturen aussen und innen (Abbildung 64) wird sichtbar, dass ab einer maximalen Aussenlufttemperatur von 28°C die maximale Innenluft-temperatur unterhalb der Aussenlufttemperatur liegt. Der Modellvergleich auf der rechten Seite zeigt wiederum eine gute Übereinstimmung innerhalb des Temperaturbandes von +/-1 K.

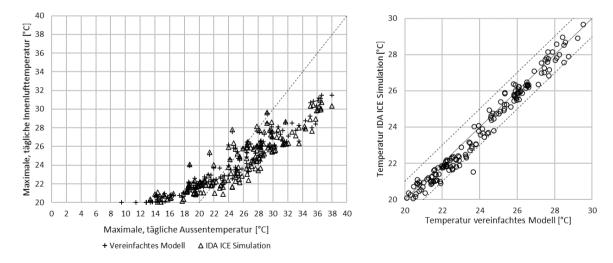
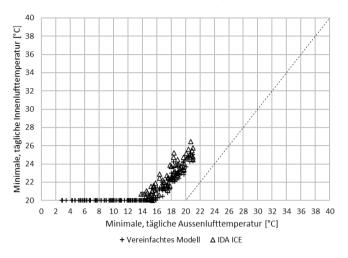


Abbildung 65: Vergleich der maximalen täglichen Innenlufttemperatur (Altbau) in Abhängigkeit der maximalen täglichen Aussentemperatur zwischen dem Referenzmodell IDA ICE und dem vereinfachten Modell (links). Gegenüberstellung der, mit den beiden Modellen berechneten, Innenlufttemperatur (rechts).

Abbildung 65 zeigt für den Altbau im Vergleich zum Neubau tiefere Innenlufttemperaturen unterhalb von 22° maximaler Aussenlufttemperatur. Bereits ab 24°C maximaler Aussenlufttemperatur liegt die Innenlufttemperatur unterhalb der Aussenlufttemperatur. Der Modellvergleich auf der rechten Seite zeigt eine gute Übereinstimmung innerhalb des Temperaturbandes von +/-1 K.







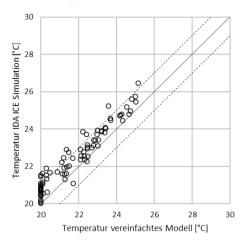
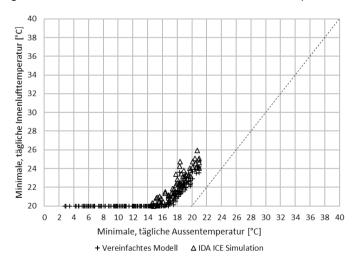


Abbildung 66: Vergleich der minimalen täglichen Innenlufttemperatur (Neubau) in Abhängigkeit der minimalen Aussenlufttemperatur zwischen dem Referenzmodell IDA ICE und dem vereinfachten Modell (links). Gegenüberstellung der, mit den beiden Modellen berechneten, Innenlufttemperatur (rechts).

Abbildung 66 zeigt den Zusammenhang zwischen der minimalen Aussenlufttemperatur und der minimalen Innenlufttemperatur. Gut zu erkennen ist die Parallelität dieser Kurve mit der gestrichelten Linie, wo beide Temperaturen den gleichen Wert annehmen. Diese Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen treibt den Luftvolumenstrom durch das geöffnete Fenster an. Damit wird die, während des Tagesverlaufs eingetragene Wärme, wieder abgeführt. Der Modellvergleich auf der rechten Seite zeigt, dass das vereinfachte Modell die Innenlufttemperaturen um ca. 0.5 K überschätzt.



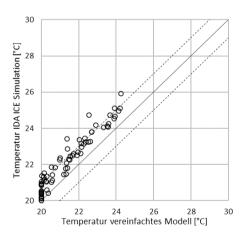


Abbildung 67: Vergleich der minimalen täglichen Innenlufttemperatur (Altbau) in Abhängigkeit der minimalen Aussenlufttemperatur zwischen dem Referenzmodell IDA ICE und dem vereinfachten Modell (links). Gegenüberstellung der, mit den beiden Modellen berechneten, Innenlufttemperatur (rechts).

Analog zu den Aussagen zum Neubau ist auch im Altbau eine Parallelität zwischen der Darstellung der minimalen Innenlufttemperatur in Funktion der minimalen Aussenlufttemperatur und der gestrichelten Linie, wo beide Temperaturen gleich sind, sichtbar. Auch im Altbau wird die Temperaturdifferenz als Antrieb für den Abtransport der Wärmelasten benötigt. Wie in Abbildung 67 rechts ersichtlich, unterschätzt das vereinfachte Modell die Innenlufttemperatur im ganzen Temperaturbereich im Mittel um ca. 0.7 K.

