



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und  
Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**

**Schlussbericht** 15. April 2011

---

# **KÜHLEN ÜBER THERMISCH AKTIVIERTE AUSSENFLÄCHEN**

## Potenzialstudie

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Fachhochschule Nordwestschweiz - FHNW  
Institut Energie am Bau - IEBau  
Sankt-Jakobs-Strasse 84  
CH-4132 Muttenz  
[www.fhnw.ch/iebau](http://www.fhnw.ch/iebau)

**Autoren:**

Carsten Wemhöner, Andreas Genkinger und Thomas Afjei  
IEBau-FHNW, [carsten.wemhoener@fhnw.ch](mailto:carsten.wemhoener@fhnw.ch)

Die Autoren danken der Fr. Sauter AG, Basel für den fachlichen Austausch

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

**BFE-Programmlleiter:** Dr. Charles Filleux, [filleux.ren@baslerhofmann.ch](mailto:filleux.ren@baslerhofmann.ch)

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154235 / 103213

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

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	3
Zusammenfassung .....	5
Abstract .....	6
1. Grundlagen und Vorgehen .....	7
1.1. Motivation für die Durchführung des Projekts .....	7
1.2. Zielsetzung und Lösungsweg .....	7
1.3. Auswertemethodik und Gütekriterien .....	8
1.3.1. Energetische Bewertung .....	8
1.3.2. Behaglichkeitsbewertung .....	9
1.4. Wärmeübergang an Aussenflächen .....	10
1.4.1. Wetterbedingungen und typische Kennwerte .....	13
1.5. Geeignete Materialien .....	15
1.6. Marktverfügbare Komponenten .....	16
1.6.1. Klassifizierung und Eigenschaften .....	16
1.6.2. Detaillierte Marktübersicht .....	17
1.7. Anforderungen an Gebäude und System für passiven Kühlbetrieb .....	20
1.8. Systemlösungen zur passiven Kühlung über Aussenflächen .....	20
1.8.1. Wassergeführte Systemlösungen .....	21
1.8.2. Luftgeführte Systemlösungen .....	23
1.9. Schlussfolgerung für die untersuchten Systemlösungen .....	24
1.10. Systemkonfiguration und Modellierung der Komponenten .....	25
1.10.1. Aussenflächen .....	25
1.10.2. Nutzungen .....	26
1.10.3. Charakterisierung und Modellierung der Referenzgebäude .....	27
1.10.4. Hydraulik .....	27
1.11. Auswertung des Potenzials anhand von Schweizer Wetterdaten .....	28
2. Parametervariationen Kühlleistung .....	32
2.1. Emissionsgrad .....	32
2.2. Wind .....	34
2.3. Neigung der Fläche .....	36
2.4. Massenstrom und Eintrittstemperatur .....	36
2.5. Zusammenfassung Parametervariationen Kühlleistung .....	38
3. Parametervariationen Kühlenergie .....	40
3.1. Lasten und passive Massnahmen .....	40
3.2. Nutzungen .....	41
3.2.1. Einzelbüro .....	42
3.2.2. Grossraumbüro .....	43
3.2.3. Einfamilienhaus .....	45
3.3. Vorlauftemperatur des Kühlsystems .....	48
3.4. Parametervariation für die Nutzung Einzelbüro .....	49
3.5. Emissionsgrad .....	49
3.6. Neigung der Fläche .....	50
3.7. Massenstrom .....	51
3.8. Einfluss der Kühllast .....	52
3.9. Hydraulische Einbindung der Aussenflächen .....	53
3.9.1. Indirekte hydraulische Einbindung über Wärmetauscher .....	53
3.9.2. Hydraulische Einbindung ohne Wärmetauscher .....	54
4. Potenzialbewertung .....	55
4.1. Erreichbare Kühlleistungen .....	55
4.2. Deckungsanteile passive Kühlung .....	56
4.3. Aufwandsberechnung .....	58
4.3.1. Arbeitszahlen .....	59
4.3.2. Sensitivitätsanalyse der Komponenten-Effizienz .....	59
4.4. Folgerungen für die Auslegung .....	60
4.5. Anwendungen und Synergien zu Wärmenutzung .....	61

4.5.1. Anwendungen des passiven Kühlverfahrens .....	61
4.5.2. Warmwasserbetrieb .....	62
4.5.3. Heizbetrieb .....	62
4.6. Systemkosten .....	62
4.7. Vergleich mit anderen passiven Kühlverfahren .....	63
5. Schlussfolgerungen .....	66
6. Symbolverzeichnis .....	67
Konstanten .....	67
Abkürzungen und Indizes .....	67
7. Literaturverzeichnis .....	69
Anhang .....	71
Anhang 1 : Simulationsplattform .....	71
Anhang 2 : Raummodell .....	71
Anhang 3 : Modellierung Wärmeübergabesysteme .....	71
Anhang 4 : Charakterisierung der Referenzgebäude .....	72
Anhang 5 : Druckverlust im Kollektorkreis .....	74

# Zusammenfassung

Ziel des Projekts ist eine Potenzialanalyse, über eine Aktivierung von aussenliegenden Flächen der Gebäudehülle eine Kühlfunktion für das Gebäude zur Verfügung zu stellen. Dazu werden zunächst Konzepte, Materialien und Systemlösungen analysiert. Marktverfügbare Komponenten kommen hauptsächlich aus dem Bereich Solarthermie, die in Kunststoffabsorber zur Schwimmbadbeheizung und unverglaste Metallabsorber als Solardächer unterschieden werden können. Die Anforderung nach hohem langwellige Emissionsgrad, die für den Kühlbetrieb wichtig ist, wird von den meisten Materialien mit Ausnahme von unbehandelten Metallen erfüllt. Metallabsorber für solarthermische Anwendungen weisen aber häufig eine selektive Beschichtung auf, welche die Emission im langwelligen Bereich stark vermindert.

Günstige Eigenschaften des Gebäudes hinsichtlich der Kühlkonzepts sind eine massive Bauweise und moderate Glasanteile, die den Kühlbedarf reduzieren. Eine Bauteilaktivierung bietet die Möglichkeit einer Speicherung der nächtlichen Kühlenergie in der Bausubstanz. Durch die Begrenzung des Kühlbetriebs mit den Aussenflächen auf die Nachtstunden sind in jedem Fall Speicher oder allfällige Zusatzkälteerzeuger vorzusehen.

Zur Bewertung des Potenzials wurden die Systemkomponenten in der Simulationsumgebung Matlab-Simulink abgebildet. Die Aussenfläche wird als unabgedeckter Kollektor modelliert. Mit den modellierten Komponenten wurden Parametervariationen hinsichtlich der Eigenschaften der aktivierten Aussenfläche (Grösse, Neigungswinkel, Emissionsgrad) und der Randbedingungen hinsichtlich Nutzung, Standort und hydraulischer Einbindung durchgeführt.

Für klimatisch normale Jahre im Mittelland nach (Zürich Meteoschweiz normal nach SIA Merkblatt 2028) werden bei der Nutzung Einzelbüro mit einer Kollektorfläche in der Grösse der halben gekühlten Nettogeschossfläche hohe Deckungsanteile von über 90% der Nutzungszeit erreicht. Dabei werden in rund 75% der Nachtstunden Kühlleistungen von  $50 \text{ W/m}^2$  Kollektorfläche überschritten. Für die Nutzung Grossraumbüro sinkt der Deckungsgrad auf 85% und die Häufigkeit der Kühlleistung  $50 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  auf ca. 60% der Nachtstunden. Die betrachtete Einfamilienhausnutzung kann unter den Wetterbedingungen "Zürich normal" allein mit der aktivierten Aussenfläche im Temperaturbereich nach SIA 382/1 gehalten werden.

Bei den extremen klimatischen Bedingungen des Wetterdatensatzes "Lugano warmes Jahr" treten Hitzeperioden auf, die zur Überschreitung der Behaglichkeitsgrenze der operativen Temperatur nach SIA 382/1 führen, so dass bei der Nutzung Einzelbüro nur etwa 60% der Nutzungszeit durch rein passive Kühlung gedeckt werden kann und eine Zusatzkühlung erforderlich ist. Im Grossraumbüro sinkt der Deckungsgrad auf 45%, und für die Nutzung Einfamilienhaus auf ca. 80 %. Durch die hohen Nachttemperaturen der Aussenluft wirkt hier die Konvektion in den Sommermonaten der Strahlung entgegen, was die Kühlleistung limitiert.

Mit effizienten Pumpen, die den einzigen Aufwand für die passive Kühlung darstellen, werden die für die passive Kühlung typischen hohen Nutzungsgrade von 10-40 erreicht. Daher kann mit einer passiven Kühlung über Aussenflächen die Kühlfunktion sehr effizient bereitgestellt werden.

Im Hinblick auf die Auslegung ist ein hoher Emissionsgrad die wichtigste Eigenschaft. Hohe Einstrahlzahlen zum Himmel, also ein flacher Aufstellwinkel, haben im Mittelland geringeren Einfluss, sind aber bei warmen Aussenbedingungen und damit begrenzter Konvektion vorteilhaft. Der wichtigste Betriebsparameter ist die mittlere Kollektortemperatur, so dass Übergabesysteme mit hohen Vorlauftemperaturen zu bevorzugen sind.

Zusammenfassend bestätigen die Simulationen, dass für die Randbedingungen der Schweizer Wetterdaten ein passiver Kühlbetrieb über aktivierte Aussenflächen als Alternative zu eingeführten Verfahren wie der erdgekoppelten Kühlung Potenzial hat, insbesondere im Mittelland. Noch interessanter wird der Einsatz des Systems, wenn ein Wärmebedarf besteht und damit Synergien einer Wärmenutzung während des Tages und einer Wärmeabfuhr während der Nacht bestehen. Für eine Heizungsunterstützung gibt es aber teils gegenläufige Anforderungen an die Flächeneigenschaften, was die Erträge einschränken kann.

## Abstract

The objective of the project is an analysis of potentials to provide a cooling function for the building by activated outer surfaces of the building envelope.

Therefore, first concepts, materials and system solutions have been analysed. Market available components mainly refer to solar thermal applications, which comprise plastic absorbers for swimming pool heating and unglazed metal absorbers for solar roofs. The most important material characteristic for the cooling operation is the long-wave emissivity in the infrared spectrum. Except for non-coated metals most of the materials have high long-wave emissivity, for metal absorbers of solar thermal applications, though, often a selective coating is used, which limits the emission in the long-wave spectrum.

Regarding the requirements of the cooling concept for the building, a massive building with moderate glazing fraction reduces the cooling needs and a thermally-activated building system enables the storage of the nighttime cooling energy in the concrete building structure. Due to the restriction of the cooling operation by the activated outer surfaces to nighttime hours, storage options and eventually back-up generators shall be provided in the system design.

For the evaluation of the potentials, the system components have been implemented in the simulation environment Matlab-Simulink. The outer surface is modelled as unglazed collector. Parameter variations have been performed with the modelled components regarding the characteristics of an activated outer surface (size, inclination angle, long-wave emissivity) and the boundary conditions regarding load profiles, location and hydraulic integration.

For climatic normal years in the Swiss midland ("Zuerich normal" according to SIA 2028) and an individual office room, high degree of coverage above 90% is reached for a collector area of half the zone area, and cooling capacities exceed  $50 \text{ W/m}^2$  collector area during about 75% of the nighttime hours. For an open plan office, the degree of coverage decreases to about 85%, while the nighttime hours exceeding  $50 \text{ W/m}^2_{\text{coll}}$  decrease to about 60%. The considered single family house can be entirely kept in the temperature range according to SIA 382/1 by the activated outer surfaces.

Extreme climatic conditions as e.g. the weather data set "Lugano warm" lead to overshooting of the operative temperature in the individual office, so that only about 60% of the cooling demand is covered by passive cooling, and additional cooling is necessary to keep the room temperatures in the defined range of SIA 382/1. In an open plan office, the degree of coverage decreases to about 45% and in the single family house, about 80% of the cooling demand can be covered by passive cooling. In the summer month, the convection counteracts on radiation due to high nighttime outdoor air temperatures, which limits the radiative cooling.

With high efficiency pumps, which are the only expenditure in passive cooling operation, performance factors of 10-40 are reached, which are typical for passive cooling systems. Thereby, a passive cooling function for the building can be accomplished efficiently by the use of outer surfaces.

Regarding the design of the system a high long-wave emissivity is the most important feature. View factors to the sky have less impact in the Swiss midland, but have advantages in warm areas. The most important operation parameter is the average collector temperature, so that an emission system with high flow temperatures is advantageous.

Summarising, the simulations confirm that for the Swiss weather boundary conditions a passive cooling operation by activated outer surfaces has potential as an alternative to other passive cooling methods like ground-coupled cooling, in particular in the Swiss midland. The application of the system is even more interesting, if there is a heat demand and synergies by a heat generation during the day and heat rejection during the night can be used. For heating applications, though, some opposite requirements concerning the characteristic of the outer surface exist, which can affect the generation in heating or the rejection in cooling mode.

# 1. Grundlagen und Vorgehen

## 1.1. Motivation für die Durchführung des Projekts

Die Menschen in Europa verbringen einen grossen Teil ihrer Zeit in Gebäuden. Die menschliche Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden stehen in engem Zusammenhang mit äusseren Einflüssen, zu denen im Wesentlichen Licht, Schall, Gerüche, stoffliche Emissionen, Wärme und Feuchte zählen. Die sommerliche Kühlung von Gebäuden, insbesondere von Bürogebäuden, aber auch von Wohngebäuden, gewinnt daher zunehmend an Bedeutung. Hauptgründe sind höhere innere thermische Lasten in Verbindung mit modernen Bauweisen, die einen zunehmenden Anteil an transparenten Flächen aufweisen, bis hin zu den populären vollverglasten Fassaden. Hinzu kommen die durch den Klimawandel verursachte Verschiebung hin zu höheren Aussentemperaturen sowie der gestiegene Lebensstandard mit hohen Ansprüchen an die thermische Behaglichkeit. Die Minimierung des Energiebedarfs der Gebäudekühlung stellt daher zunehmend eine Herausforderung an die Energieeffizienz von Gebäuden dar, da in Bürogebäuden teils bereits heute der Kühlbedarf dominiert.

Zur Schaffung des Innenraumklimas für behagliches Arbeiten und Wohnen gilt es, zuerst die thermischen Lasten zu minimieren, beispielsweise durch Verschattung oder Reduktion der Abwärme elektrischer Geräte. Der verbleibende Kühlbedarf sollte dann mit möglichst geringem Aufwand gedeckt werden. Passive Systeme erschliessen natürliche Kältequellen, beispielsweise das Erdreich oder die nächtliche Aussenluft. Auf Aufwandsseite fällt grösstenteils Transportenergie zur Abfuhr der Wärme über einen Wärmeträger an, weshalb solche Systeme äusserst effizient und kostengünstig betrieben werden können. Lassen sich die Systeme auch für weitere Anwendungsfälle nutzen, beispielsweise für die winterliche Wärmeproduktion, so relativiert sich zudem die Höhe der Anfangsinvestitionen.

Die hier betrachteten passiven Systeme können jedoch durch die Limitierung natürlicher Kältequellen nicht in jedem Fall eine maximale Temperatur genau einhalten, wie dies bei aktiv betriebenen Kühlsystemen der Fall ist. Im Wohnbereich, wo der Fokus nicht auf einer strikten Einhaltung einer oberen Temperaturgrenze liegt, sondern darauf, Temperaturspitzen zu vermeiden, das Temperaturniveau insgesamt leicht zu senken und Handlungsspielraum in der Nutzung zu schaffen, können die Systeme aber trotzdem monovalent betrieben werden, da hier nur ein geringer zusätzlicher Energieaufwand für die Kühlung akzeptiert wird. Für eine Einhaltung einer maximalen Temperatur können mit passiven Systemen hingegen zumindest hohe Deckungsanteile erzielt werden, so dass nur eine geringe Zusatzkühlenergie notwendig ist und so gesamthaft der Aufwand klein gehalten wird.

## 1.2. Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel dieser Studie ist die Bewertung des Potenzials für den Einsatz von aktivierten Aussenflächen als System zur passiven Gebäudekühlung in der Schweiz. Mit aktivierten Aussenflächen soll dabei eine sanfte energieeffiziente Kühlung realisiert werden, um damit ohne nennenswerten Zusatzaufwand die Anforderungen an die sommerliche thermische Behaglichkeit einhalten zu können. Für das Projekt wurden folgende Etappen definiert:

- **Übersicht geeigneter Materialien, Komponenten und marktverfügbarer Produkte** zur Charakterisierung des Standes der Technik
- **Übersicht von Systemlösungen für eine gebäudeintegrierte Kühlfunktion** zum Kühlen für unterschiedliche Anwendungsbereiche (Wohngebäude, Bürogebäude)
- **Erstellung der notwendigen Modelle für die Systemuntersuchung mittels Simulation**
- **Parametervariationen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit und Effizienz mittels Simulation, Folgerungen für die Systemkonfiguration und Auslegung**
- **Bewertung des Potenzials der gebäudeintegrierten Kühlfunktion und Ausblick auf Synergien bei der Nutzung des gleichen Systems für Heizanwendungen**

Basierend auf theoretischen Überlegungen zur optimalen Beschaffenheit einer wärmeabgebenden Aussenfläche und anschliessender Marktanalyse wurde aus der Vielfalt technischer Möglichkeiten eine sinnvolle und verfügbare Variante ausgewählt und modelliert. Es ist nicht sinnvoll, mit einem Kühlsystem begrenzter Leistungsfähigkeit ungeeignete Gebäudekonzepte kompensieren zu wollen, deshalb wurden Eigenschaften und Massnahmen an einem Gebäude definiert, welches mittels passiver Kühlung erfolgreich in einem behaglichen Zustand gehalten werden soll. Diese bilden eine wichtige Grundlage zur Potenzialabschätzung. Die Leistungsfähigkeit des gewählten Systems wurde anhand eines theoretischen Referenzgebäudes in Simulationen untersucht. Parametervariationen zeigen die Sensitivität gegenüber Randbedingungen wie Klima und Eigenschaften der Aussenfläche. Das Referenzgebäude ist dokumentiert und alle für die Raumtemperaturdynamik relevanten Bauteile des Gebäudes inklusive der technischen Anlage sind in der Simulation abgebildet. Die Potenzialabschätzung wurde mit einem vergleichenden Überblick über alternative passive Kühlverfahren und deren Vor- und Nachteile abgerundet.

### 1.3. Auswertemethodik und Gütekriterien

Die Analyse und Bewertung der untersuchten Systeme zum Kühlen über aktivierte Aussenflächen erfolgt hinsichtlich der Kriterien Effizienz, gesamter Endenergieaufwand und thermische Behaglichkeit in den gekühlten Zonen. Die Bewertungskriterien werden in den folgenden Unterkapiteln detaillierter erläutert. Die gewünschte thermische Behaglichkeit kann – typisch für passive Kühlsysteme – nicht unter allen Umständen erreicht werden. Bei der Systemfestlegung wird daher von einer sinnvollen Konfiguration ausgegangen, welche durch eine aktive Zusatzkühlung ergänzt werden kann. Die mit rein passiver Kühlung in den meisten Fällen erreichbare thermische Behaglichkeit kann so mit vertretbarem Aufwand auf alle Nutzungsstunden ausgeweitet werden. Als Ergebnis von Systemsimulationen stellen sich der Energieaufwand, der thermische Nutzen in Form abgeführter Wärme sowie die thermische Behaglichkeit ein. Als Auswertungszeitraum wird ein Sommerhalbjahr, d.h. die Jahrestage 91 bis 273 (1. April bis 30. September) angenommen, gesamthaft 182 Tage.

#### 1.3.1. Energetische Bewertung

Abb. 1 zeigt die verwendeten Definitionen der Effizienz-Kennzahlen und die zugehörigen Bilanzgrenzen für die Bewertung einer Wärme- respektive Kälteversorgung mit Wärmepumpenanlagen. In dieser Untersuchung werden nur die in schwarzer Schrift dargestellten Komponenten betrachtet, hauptsächlich die Aussenfläche. Die Wärmepumpe dient als aktive Zusatzkühlung, falls eine rein passive Kühlung nicht alle Nutzungsstunden abdecken kann.

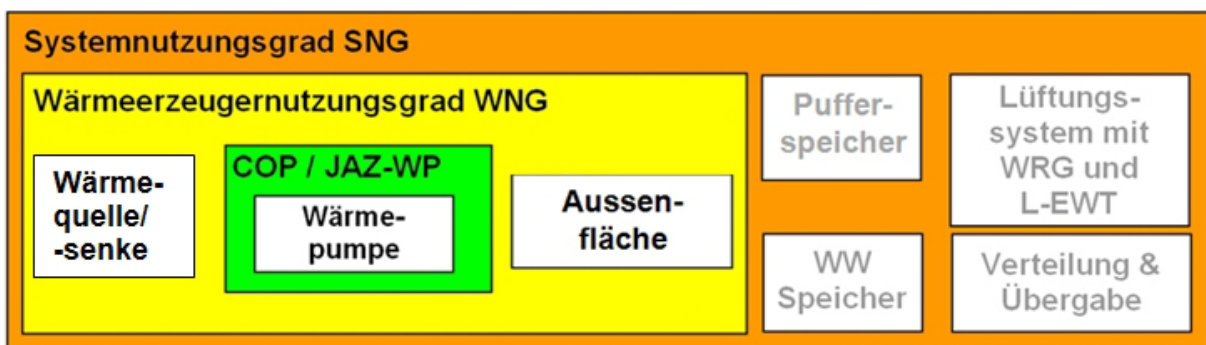


Abb. 1: Effizienz-Kennzahlen und Bilanzgrenzen zur energetischen Bewertung der Kühlung über Aussenflächen

In den Betrachtungen ist immer eine solche Zusatzkühlung aktiviert, die Betriebszeiten dieser Zusatzkühlung beschränken sich aber auf die frühen Morgenstunden zwischen 5.00 Uhr und 8.00 Uhr, falls durch den nächtlichen passiven Kühlbetrieb die gewünschten Bauteil-

temperaturen noch nicht erreicht werden konnten. Die hellgrau dargestellten Elemente zeigen die Einordnung in die Bilanzgrenzen, werden jedoch in diesem Projekt nicht betrachtet. Da in der vorliegenden Arbeit schwergewichtig der Kühlbetrieb betrachtet wird, werden keine Bewertungen für den Warmwasser und Raumheizbetrieb vorgenommen. Als wichtigste Kenngrößen für die energetische Bewertung werden die Deckungsanteile der passiven Kühlung (resp. der aktiven Zusatzkühlung) an der gesamten Nutzkälte berechnet:

$$DG_{K,passiv} = \frac{Q_{K,passiv}}{Q_{K,passiv} + Q_{K,Zusatz}} \quad \text{und} \quad DG_{K,Zusatz} = 1 - DG_{K,passiv} \quad \text{Gl.1}$$

$DG_{K,passiv}$	Deckungsgrad passive Kühlung	[-]
$DG_{K,Zusatz}$	Deckungsgrad Zusatzkühlung	[-]
$Q_{K,Zusatz}$	Nutzkälte für Raumkühlung im Zusatzkühlbetrieb	[kWh]
$Q_{K,passiv}$	Nutzkälte für Raumkühlung im passiven Kühlbetrieb	[kWh]

Da die gesamthaft erzeugte Kälte dem Gebäude zugutekommt, wird die Nutzkälte mit der erzeugten Kälte  $Q_{K,gen}$  gleichgesetzt. Als Kenngrösse der Anlageneffizienz wird der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad Raumkühlung  $WNG_K$  für den kombinierten passiven/aktiven Kühlbetrieb bestimmt.

#### Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad Raumkühlung $WNG_K$

Der Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad ist das Verhältnis der von allen Erzeugern erzeugten Wärme resp. Kälte zu dem dafür erforderlichen Energieaufwand in diesen Erzeugern, jeweils ermittelt über eine definierte Zeitperiode. Der Aufwand ist sowohl während den Betriebs- als auch während der Stand-By-Zeiten enthalten, er besteht bei den untersuchten Systemen einzig aus elektrischer Energie.

Gl.2 zeigt die Berechnung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades für Raumkühlung aus den zugehörigen Wärmemengen und elektrischen Energien.

$$WNG_K = \frac{Q_{K,gen}}{E_{K,gen}} \quad \text{Gl.2}$$

$WNG_K$	Wärmeerzeuger – Nutzungsgrad Raumkühlung	[-]
$Q_{K,gen}$	erzeugte Kälte aller Kälteerzeuger für Raumkühlung	[kWh]
$E_{K,gen}$	elektrischer Aufwand zur Erzeugung der Kälte zur Raumkühlung	[kWh]

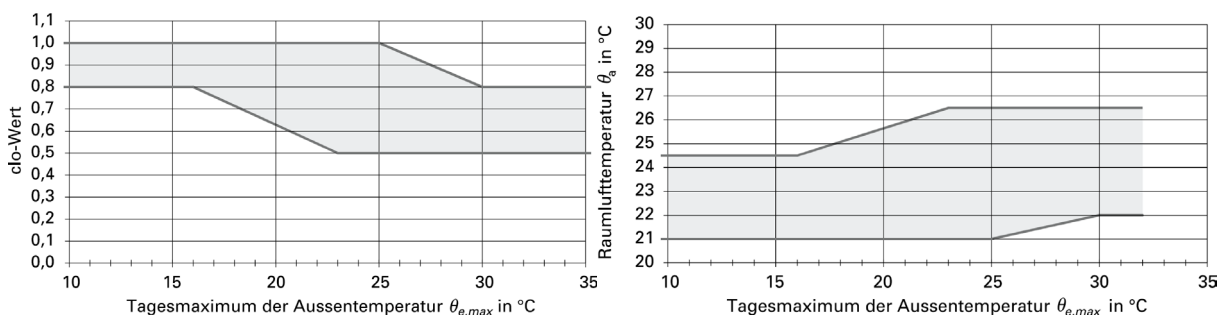
Der elektrischer Aufwand  $E_{K,gen}$  zur Erzeugung der Kälte enthält den Aufwand während dem Kühlbetrieb und der dem Kühlbetrieb zeitlich zugeordnete Aufwand für den Stand-By-Betrieb.

#### **1.3.2. Behaglichkeitsbewertung**

Die Bewertungskriterien und -methoden für die thermische Behaglichkeit eines Menschen in einem Raum werden in den Normen SIA 180/1:1999 [6] beschrieben, zusätzliche Anforderungen für klimatisierte Wohn- und Bürogebäude mit typischer Nutzung werden in der Norm SIA 382/1:2007 [7] vorgegeben. Demgemäss ist die Behaglichkeit unter anderem abhängig von

- Der Tätigkeit der Raumnutzer (ausgedrückt als met-Wert)
- Der Bekleidung der Raumnutzer (ausgedrückt als clo-Wert)
- Der Raumlufttemperatur
- Der Oberflächentemperatur der Raumumgebungsflächen
- Der relativen Raumluftfeuchte

Im Weiteren wird von einer sitzenden Tätigkeit (1.2 met) ausgegangen. Bei den betrachteten Gebäuden mit einem guten baulichen Wärmeschutz werden die operative (empfundene) Temperatur und die Raumlufttemperatur gemäss SIA 382/1:2007 als gleich betrachtet. Die Bekleidung der Personen in Wohn- und Büroräumen ist abhängig von der Aussentemperatur (siehe Abb. 2). In der Zuordnung wird die Anpassung der Nutzer an die Umgebungsbedingungen antizipiert.



**Abb. 2:** Bereich der typischen Bekleidung, ausgedrückt als clo-Wert, in Abhängigkeit vom Tagesmaximum des 1 h Mittelwertes der Aussentemperatur (links) und Temperaturbereich der als behaglich bewerteten Raumzustände bei sitzender Tätigkeit gemäss SIA 382/1:2007 (rechts)

Als wesentliches Kriterium für die thermische Behaglichkeit wird die Raumlufttemperatur betrachtet, mit der Bekleidungsvariation gemäss Abb. 2 links ergibt sich das in Abb. 2 rechts dargestellte Band als behaglich bewerteter Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit von der Aussentemperatur. Auf eine explizite Berücksichtigung der relativen Luftfeuchte wird hier verzichtet, da deren Beeinflussung nicht Gegenstand dieser Studie ist. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die relative Raumluftfeuchte in einem für die Behaglichkeit günstigen Bereich zwischen 30% (Winter) und 70% (Sommer) liegt.

Anhand der Simulationsresultate für die operative Raumtemperatur werden die Überschreitungsstunden der oberen und unteren Grenztemperatur für die Bewertung ermittelt. Da nicht nur die Zeitdauer der Überschreitung, sondern auch deren Überschreitungshöhe Einfluss auf die Behaglichkeit hat, werden als zusätzliche Kenngrösse auch Überschreitungskelvinstunden aus 1 h Mittelwerten der Raumtemperatur ermittelt, die als Summe der stündlich ermittelten Übertemperaturen der Raumluft gegenüber der zulässigen Grenztemperatur berechnet werden.

#### 1.4. Wärmeübergang an Aussenflächen

Die Wärmeübergangsmechanismen an einer Aussenfläche lassen sich grundsätzlich in einen Strahlungsanteil und einen konvektiven Anteil unterteilen. Auch Wärmeübertragung durch Verdunstung (Verdunstungskälte) lässt sich zum Kühlen nutzen, beispielsweise durch Benetzen der Wärmeübertragungsfläche mit Wasser. Bei der Übertragung von aus dem Gebäudeinneren abgeführter Wärme an die Aussenfläche spielen auch Wärmeleitungsprozesse eine gewisse Rolle. Diese Vorgänge sollen hier kurz erörtert werden. Betrachtet wird dazu ein Oberflächenelement, welches zum Aussenklima orientiert ist (Abb. 3). Da die auftreffende Solarstrahlung ein Kühlen tagsüber nicht erlaubt, wird die Situation nachts betrachtet. Dem Element wird aus dem Gebäudeinneren über ein Wärmeträgermedium der Temperatur  $\theta_F$  Wärme zugeführt, so dass sich die Oberfläche ebenfalls auf die Temperatur  $\theta_A$  aufwärmt. Diese Oberfläche gibt nun Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab, und zwar umso mehr, je höher ihre Temperatur ist. Fühlbar ist diese Abstrahlung beispielsweise bei Heizkörpern. Bei genügend hohen Temperaturen – so wie sie unter anderem in Glühbirnen vorkommen – wird sie in Form von Licht auch sichtbar.



oder für kleine Temperaturdifferenzen linearisiert:

$$\dot{q} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot (T_A - T_H) = h_r \cdot (\theta_A - \theta_H) \quad \text{Gl.6}$$

$T_m$	Mitteltemperatur zwischen Oberfläche und Himmel	[K]
$\theta_A$	Oberflächentemperatur	[°C]
$\theta_H$	Himmelstemperatur	[°C]

Für günstige Randbedingungen einer äquivalenten Himmelstemperatur, die 15 K unter der Aussenlufttemperatur liegt, und einem hohen Emissionsgrad von 0.9 bleibt die Abweichung der Kühlleistung durch die Linearisierung des Wärmeübergangskoeffizienten unter 1%. Wird statt der Mitteltemperatur zwischen Aussenfläche und Himmel vereinfacht die Aussenlufttemperatur angesetzt, ergeben sich unter den obigen Bedingungen höhere Abweichungen unter 10%. Im betrachteten Schweizer Klima kann die Himmelstemperatur bis 20 K unterhalb der Lufttemperatur abfallen und in wolkenlosen Sommernächten auch Werte unter 0 °C erreichen. Emission, der Wärmeübergang durch Strahlung, ist daher ein sehr wichtiger Wärmeabgabemechanismus zur Kühlung mit Aussenflächen. Für den Kühlbetrieb sind daher hohe Emissionsgrade  $\varepsilon$  im Bereich der langwelligen Wärmestrahlung günstig. Typische Werte sind in Tab. 1 zusammengestellt.

**Tab. 1: Emissionsgrade verschiedener Stoffe bei Raumtemperatur \* [2], \*\* [3]**

Material	Emissionsgrad $\varepsilon$
Kupfer poliert	0.03*
Kupfer oxidiert	0.76*
Beton, rau	0.94*
Glas	0.87**
Wasser	0.92**
Heizkörper	0.93*

Nebst der Emission trägt auch der Wärmetransport durch Luftbewegungen, die Konvektion, zum Abkühleffekt einer Oberfläche bei. Die konvektiv abgegebene Leistung ist im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Umgebungsluft abhängig:

$$\dot{q} = h_c \cdot (\theta_A - \theta_L) \quad \text{Gl.7}$$

$h_c$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[W / m <sup>2</sup> / K]
-------	---------------------------------------	--------------------------

Die konvektive Wärmeübertragung wird aber auch massgeblich von den Strömungsverhältnissen an der Oberfläche beeinflusst. So fühlt sich beispielsweise Wind auch bei moderaten Lufttemperaturen kalt an, weil der konvektive Wärmeabtransport – genauer der Wärmeübergangskoeffizient – dadurch stark erhöht wird. Formal lässt sich die Konvektion in einen Anteil freier Konvektion ohne Luftbewegung – alleine durch die Temperaturdifferenz  $\theta_A - \theta_L$  angetrieben – und einen Anteil erzwungener Konvektion – angetrieben durch Wind – aufteilen. Gebräuchlich ist eine Darstellung in der Form:

$$h_c = h_0 + h_w \cdot v \quad \text{Gl.8}$$

$h_0$	windunabhängiger Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> /K]
$h_w$	windabhängiger Wärmeübergangskoeffizient	[W * s/m <sup>3</sup> /K]
$v$	Windgeschwindigkeit	[m/s]

Abhängig von den Verhältnissen zwischen Oberflächen-, Luft- und Himmelstemperatur verhält sich die Wärmeübergabe durch Konvektion gleich- oder gegenläufig zur Emission. Bei klarem Nachthimmel mit sehr tiefer Himmelstemperatur ist es beispielsweise möglich, dass eine Oberfläche durch Emission unter Umgebungstemperatur abkühlt. In diesem Fall verursacht ein konvektiver Wärmeübergang für den Kühlbetrieb unerwünschte konvektive Wärmegewinne.

Zur Vollständigkeit sei hier noch aufgeführt, dass sich Wärme auch über Verdunstung einer Flüssigkeit abgeben lässt. Zum Verdunsten von 1 kg Wasser werden beispielsweise 2.4 MJ Energie benötigt, welche der Umgebung entzogen werden und diese dadurch abkühlen. Um nebst Konvektion und Emission auch diesen Effekt nutzen zu können, muss die betrachtete Oberfläche aber benetzt werden, weshalb dieser Wärmeabgabemechanismus im Weiteren nicht betrachtet wird. Massgebende Grösse ist die Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_V$ , diejenige Energie, die für den Verdunstungsprozess benötigt wird.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H_V \quad \text{Gl.9}$$

$\Delta H_V$     Verdampfungsenthalpie    [J / kg]

$\dot{m}$         Verdunstungsrate                    [kg / s]

Bei den betrachteten Systemen zur Wärmeabgabe über Gebäudeausenflächen sind auch Wärmeleitvorgänge von einer gewissen Bedeutung, insbesondere beim Wärmeübergang zwischen Wärmeträgermedium, welches die Wärme aus dem Gebäude transportiert, zur Oberfläche, welche diese Wärme abgeben soll. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Materials zwischen Fluid und Oberfläche beschränkt die Leistungsfähigkeit dieser Wärmeübertragung. Diese berechnet sich mit

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (\theta_A - \theta_F) \quad \text{Gl.10}$$

$\theta_F$         Fluidtemperatur                        [K]

$\lambda$          Wärmeleitfähigkeit                    [W / m / K]

A         Querschnittsfläche                    [m<sup>2</sup>]

Diesbezüglich sind Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  wie Metalle ideal.

#### 1.4.1. Wetterbedingungen und typische Kennwerte

Aufgrund der vorgängig beschriebenen Wärmeübergangsmechanismen sind die Himmels-temperatur  $T_H$ , die Lufttemperatur  $T_L$  sowie die Windgeschwindigkeit  $v$  entscheidende klimatische Einflussgrössen auf das Kühlpotenzial aktivierter Aussenflächen.

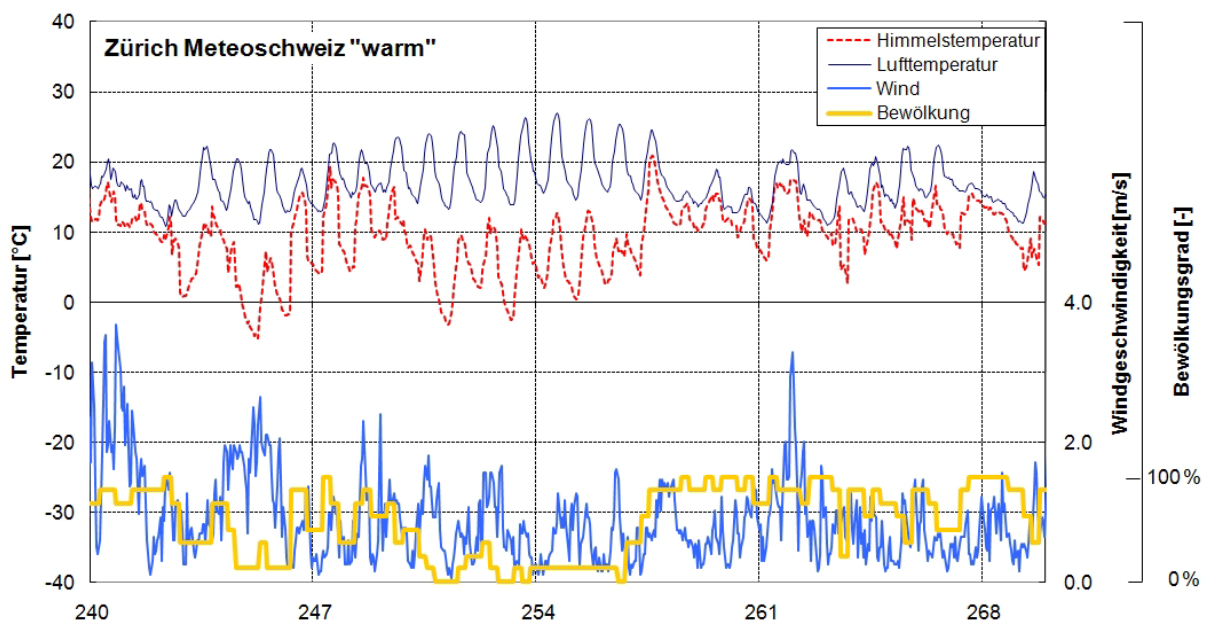


Abb. 4: Günstige Klimabedingungen zum passiven Kühlen über Aussenflächen zwischen Tag 251 bis 257 (Stundenmittelwerte). Wetterdatensatz SIA 2028 Zürich-MeteoSchweiz „warm“: geringe Bewölkung, tiefe Himmelstemperatur und mässige nächtliche Lufttemperaturen um 15 °C.

In Abb. 4 ist zur Illustration der Klimaverlauf während einer sommerlichen Schönwetterperiode mit günstigen Klimabedingungen zum Kühlen zwischen den Jahrestagen 250 und 256 (Anfang September) dargestellt: Trotz täglicher Aussentemperaturen um 25 °C werden in der bewölkungslosen Nacht tiefe Himmelstemperaturen um 0 °C erreicht – ideale Bedingungen für hohe Emissionsleistung der Wärmeabgabefläche. Da gleichzeitig die Aussenlufttemperaturen unter 20 °C fallen, kann auch konvektiv Wärme abgegeben werden.

Unter den genannten Randbedingungen lässt sich die Kühlleistung einer aktivierten Oberfläche wie folgt abschätzen (Abb. 5.): Bei 20 °C Eintrittstemperatur des Wärmeträgermediums wird sich an der Oberfläche eine mittlere Temperatur von etwa 18 °C einstellen. Bei hohem Emissionsgrad von  $\varepsilon=0.9$  und angenommener Aussenlufttemperatur von 15 °C (entsprechend 288.15 K) ergibt sich für den Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizienten  $4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3$  aus Gl.6 ein Wert von ca. 4.6 W/m<sup>2</sup>/K siehe Gl.11. Daraus berechnet sich die radiative Wärmeabgabeleistung bei einer Himmelstemperatur von 0 °C zu ca. 80 W je Quadratmeter Oberfläche.

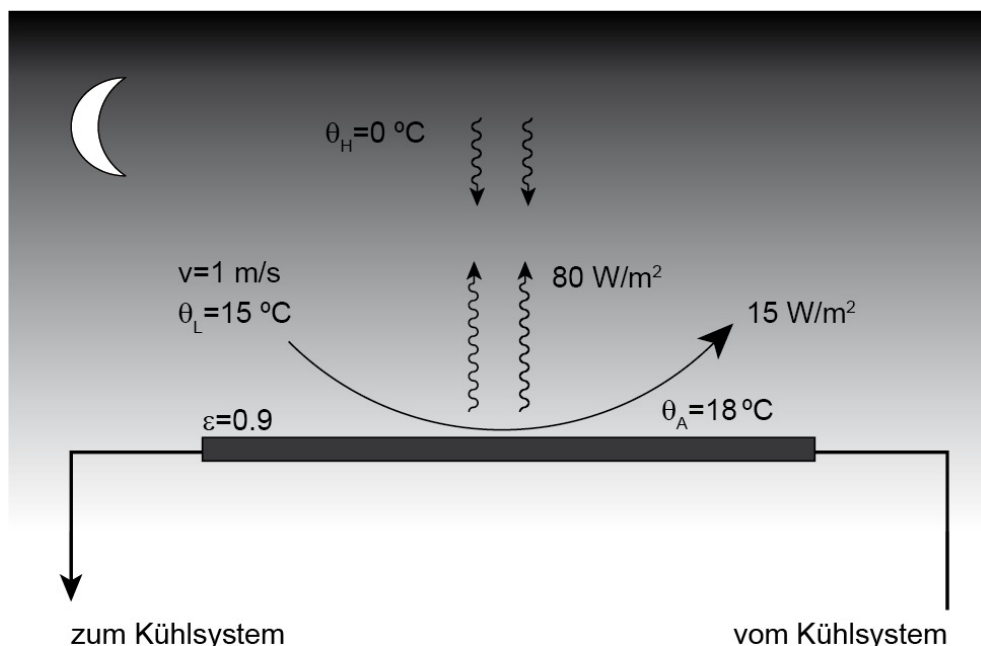
$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3 \approx 4.6 \text{ W/m}^2/\text{K} \quad \text{Gl.11}$$

$h_r$	Wärmeübergangskoeffizient Strahlung	[W/m <sup>2</sup> /K]
$\varepsilon$	Emissionsgrad (0.9)	[-]
$T_m$	Mitteltemperatur zwischen Oberfläche und Himmel	[K]

Als typische Werte für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten aus Gl.8 werden  $h_0 = 2.8 \text{ W/m}^2/\text{K}$  und  $h_w = 3 \text{ W} \cdot \text{s}/\text{m}^3/\text{K}$  genannt [4], [5], damit lässt sich also Gl.8 schreiben als

$$h_c = 2.8 + 3 \cdot v \quad \text{Gl.12}$$

Bei  $v=1 \text{ m/s}$  Wind beträgt damit die Wärmeabgabeleistung durch Konvektion je Quadratmeter gerundete 15 W, ein Sechstel der Kühlleistung durch Strahlung. Der Grund für diesen deutlichen Unterschied liegt im deutlich höheren Temperaturpotenzial für die Wärmeabgabe über Strahlungsprozesse. Zusammen kann also mit einer Kühlleistung um 100 W/m<sup>2</sup> gerechnet werden, wobei die tatsächlich erreichbaren Werte stark von der jeweiligen Witterungssituation abhängig sind.

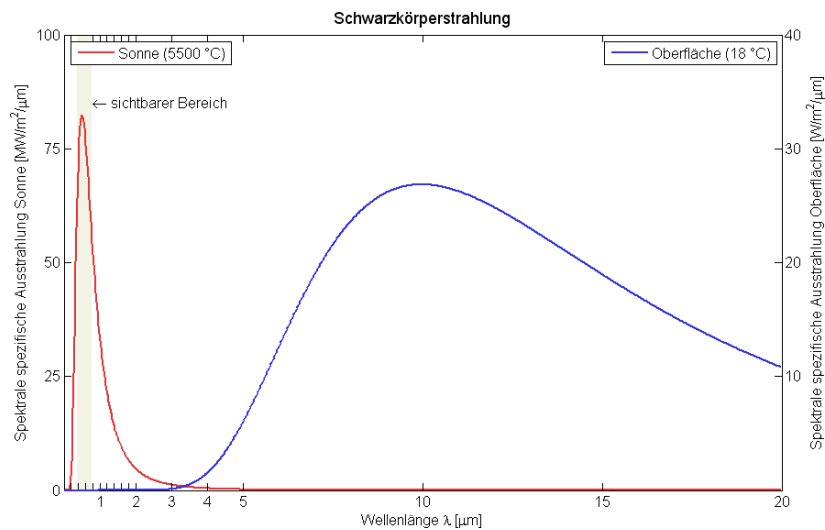


**Abb. 5:** Günstige Randbedingungen und Leistungskennwerte einer Oberfläche zum passiven Kühlen. Klimastation Zürich-MeteoSchweiz normal.

Die angenommenen Werte aus Abb. 5 widerspiegeln jedoch eine durchaus typische Situation für das schweizerische Mittellandklima: Die nächtlichen Lufttemperaturen der Klimastation Zürich-Meteoschweiz (Normalklima) liegen im Mittel des Sommerhalbjahres bei rund 15 °C, die Himmelstemperaturen bei klarem Himmel etwas unter 0 °C. Diese Begebenheit wird sich aber aufgrund der Klimaerwärmung hin zu ungünstigeren Bedingungen verschieben, weshalb in die Betrachtungen dieser Studie verschiedene Klimatypen berücksichtigt werden. Die Wetterdatensätze werden in Kapitel 1.11 detaillierter beschrieben.

## 1.5. Geeignete Materialien

Übliche Solarkollektoren zur Warmegewinnung sollen die tagsüber eintreffende Solarstrahlung (kurzwellig; Wellenlängen-Maximum bei rund 0.5  $\mu\text{m}$ , Abb. 6 links) möglichst gut absorbieren, die dabei entstehende Wärme (Strahlung langwellig; Wellenlängenmaximum bei rund 10  $\mu\text{m}$ , Abb. 6) aber möglichst wenig wieder abstrahlen.

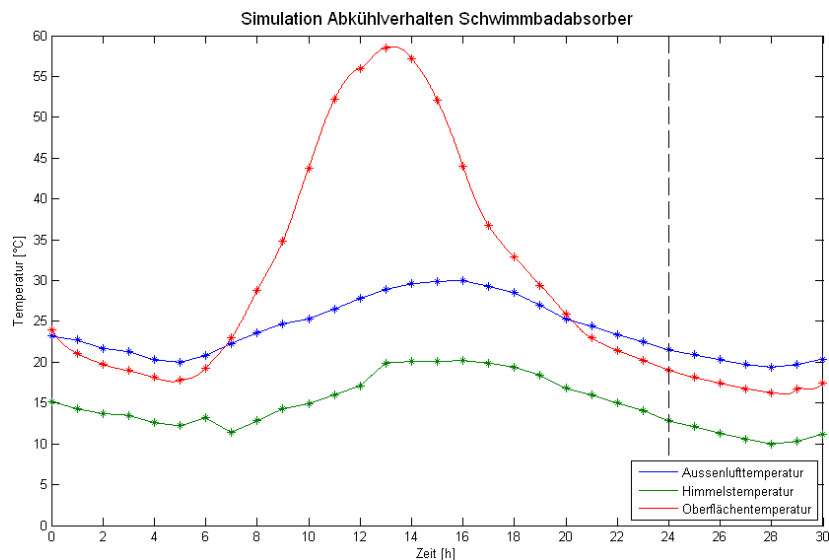


**Abb. 6:** Ideale spektrale Verteilung der Sonne und einer Oberfläche von 18 °C Temperatur. Das Maximum der Sonnenstrahlung liegt bei rund 0.5  $\mu\text{m}$ , dasjenige der Wärmestrahlung der Oberfläche bei 10  $\mu\text{m}$ .

Um beide Eigenschaften (hohe Absorption im kurzwelligen Bereich und niedrige Emission im langwelligen Bereich) zu vereinen, werden die Oberflächen dieser Kollektoren meist mit einem Material beschichtet, welches diese Eigenschaften erfüllt, also einer wellenlängenselektiven, kurz selektiven Beschichtung. Um auch die konvektive Wärmeabgabe einzuschränken, werden übliche Solarkollektoren zudem mit einer Glasscheibe gegenüber Luftströmungen (Konvektion) geschützt.

Während übliche Solarkollektoren auf Warmegewinn ausgelegt sind, sollen Oberflächen zum Kühlen möglichst hohe Wärmeverluste aufweisen. Solche Oberflächen müssen demnach grundsätzlich umgekehrte Eigenschaften besitzen, sie sollen möglichst viel Wärme abgeben und möglichst wenig Strahlung absorbieren. Ideal dazu wäre ein Material mit hohem Emissionsgrad  $\varepsilon$  im langwelligen und niedriger Absorption  $\alpha$  im kurzwelligen Bereich. Auch ein Schutz gegenüber Konvektion an der Umgebungsluft ist für den Kühlbetrieb meist unerwünscht.

Aufgrund der Vergleichbarkeit bieten sich für den Kühlbetrieb nicht selektiv beschichtete, nicht-abgedeckte Solarkollektoren an. Solche Kollektoren werden typischerweise zur Wassererwärmung in Schwimmbädern benutzt, sind einfach aufgebaut und dadurch relativ preiswert herzustellen. Die hohe Absorption dieser Kollektoren im kurzwelligen (optischen) Bereich ist zwar für den Kühlbetrieb prinzipiell unerwünscht, jedoch nicht wesentlich einschränkend: Tagsüber können zwar hohe Temperaturen entstehen, aufgrund der ebenfalls guten Wärmeabgabe kühlen sich solche Schwimmbadabsorber aber nach Sonnenuntergang innerhalb kurzer Zeit wieder auf Umgebungstemperaturen ab (Abb. 7).



**Abb. 7:** Verlauf von Aussenlufttemperatur, Himmelstemperatur und Oberflächentemperatur an einem nicht-abgedeckten Schwimmbadkollektor ohne Durchfluss (Simulationsergebnisse). Der Kollektor heizt sich tagsüber auf ca. 60 °C auf, kühlt sich abends aber rasch wieder auf Umgebungstemperatur ab.

Die solare Absorption der verwendeten Materialien ist für den Kühlbetrieb deshalb unerheblich, solange nur im Nachtbetrieb gekühlt werden soll. Dies wiederum ermöglicht Synergien zur Nutzung als Wärmequelle tagsüber: Oberflächen mit hoher solarer Absorption und hoher Emission im langwelligen Bereich können tagsüber Wärme erzeugen und nachts zum Kühlen genutzt werden.

## 1.6. Marktverfügbare Komponenten

### 1.6.1. Klassifizierung und Eigenschaften

Auf dem Markt verfügbare, geeignete Komponenten und Systeme zur Kühlung über Gebäudeausenflächen lassen sich insbesondere im Bereich nicht-abgedeckter Schwimmbadabsorber in unterschiedlichsten Varianten finden. Nebst Schwimmbadkollektoren sind auch Metalldächer, gekühlte Photovoltaik-Module oder Luftkollektoren mit guten Eigenschaften für einen Kühlbetrieb erhältlich. Die wichtigsten Eigenschaften marktverfügbarer Komponenten werden im Folgenden kurz beschrieben.

Klassische, **nicht-abgedeckte Schwimmbadkollektoren** sind üblicherweise aus schwarz gefärbten Kunststoffen wie Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) oder synthetischem Kautschuk (EPDM) gefertigt. Oft sind sie aus mehreren parallelen Rohren – allenfalls mit stabilisierenden Zwischenstegen zu Bahnen verbunden – oder aus zwei parallelen Platten als Vollflächenkollektor aufgebaut. Kollektoren aus einzelnen Rohren werden als Varianten mit glatten und solche mit gerippten Rohren zur Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche hergestellt. Schwimmbadkollektoren sind preisgünstig herzustellen und weisen sowohl eine hohe Absorption von Sonnenlicht als auch hohe Emission von Wärmestrahlung auf, was für Kühlzwecke günstig ist. Beispielsweise werden in [16] gemessene Werte von  $\alpha=0.95$  und  $\varepsilon=0.8$  angegeben. Wasserbefüllte Kollektoren und Zuleitungen aus Polypropylen oder Polyethylen müssen im Winter entleert werden, die mechanische Belastung durch einfrierendes Wasser könnte diese beschädigen. Absorber aus EPDM sind hingegen auch in gefülltem Zustand frostsicher, auch bei Befüllung mit Wasser. EPDM ist überdies auch ohne besondere Schutzmassnahmen ausserordentlich UV-beständig. Nachteilig bei Kunststoffabsorbern ist die schlechte Wärmeleitfähigkeit für den Wärmetransport vom Fluid zur Absorberoberfläche (EPDM: 0.3 W/m/K; Aluminium 235 W/m/K).

Aktiviert Aussenflächen aus **Metall** lassen sich gleichzeitig als konventioneller Witterungsschutz und zur Abgabe von Wärme nutzen. Angeboten werden Dachsysteme, welche die Wetterschutzfunktion einer normalen Dachhaut übernehmen und durch Ankopplung an einen Flüssigkeitskreislauf zur gleichzeitigen Gewinnung solarer Wärme ausgelegt sind. Blanke Metalloberflächen weisen jedoch eine geringe Emission der langwelligen Wärmestrahlung auf, was aber durch Oberflächenbehandlung oder Verwitterung entscheidend beeinflusst werden kann. Die konkreten Oberflächeneigenschaften der einzelnen Produkte sind hier also massgebend.

**Photovoltaikzellen** erwärmen sich durch Sonneneinstrahlung weit über Umgebungstemperatur, worunter der Ertrag leidet. Üblicherweise werden die Module daher etwas oberhalb der eigentlichen Dachfläche aufgeständert, was eine kühlende Hinterlüftung ermöglicht. Angeboten werden aber auch Photovoltaikmodule, welche zur Kühlung der Zellen mit der Rückseite an einen thermischen Kreislauf angebunden werden können, sogenannte Photovoltaisch-Thermische Kombimodule (PV/T-Module). Die bei Sonneneinstrahlung frei werdende Wärme der Photovoltaikzellen lässt sich so beispielsweise zur Vorwärmung von Trinkwasser benutzen. Umgekehrt besitzt Glas, welches zur Frontabdeckung der Zellen benutzt wird, einen hohen Emissionsgrad (Tab. 1 auf Seite 12). Solche Kombimodule liessen sich deshalb auch gut zur Wärmeabgabe nutzen. Solch ein Modul könnte gleichzeitig mehrere Funktionen übernehmen, was besonders attraktiv erscheint: Stromerzeugung mit verbessertem Wirkungsgrad durch Zellenkühlung, Wärmeerzeugung, Kühlfunktion und – bei entsprechendem Aufbau – Dachhaut.

### 1.6.2. Detaillierte Marktübersicht

Im Bereich von Schwimmbadabsorbern sind mehrere Anbieter mit teilweise gleichartigen Produkten auf dem Markt vertreten, eine Auswahl aus dem deutschsprachigen Raum ist in Tab. 2 zusammengestellt.

Tab. 2: *Auswahl nicht-abgedeckter Schwimmbadkollektoren*

Anbieter	Produkt	Bauart	Material
FRIAP AG, Ittigen	Sola	Multischlauch	EPDM
Aqsol GmbH (D) Conergy GmbH, Flurlingen (CH)	Schwimmbad-Absorber	Multischlauch	EPDM
AST GmbH (A)	AST Solarmatte 120/10	Multischlauch	EPDM
Soltop Schuppisser	Solana	Multischlauch	EPDM
Solar-Ripp (D)	Solar-Ripp	Rippenrohr	PP
Solar-Flex (D)	Solar-Flex®	Rippenrohr	PP
OKU Obermaier GmbH (D)	OKU-Absorber	Vollflächenkollektor	PE
Roth Werke GmbH (D)	HelioPool	Vollflächenkollektor	PE

Exemplarisch soll hier der Kollektor von Aqsol / Conergy näher beschrieben werden (Abb. 8 links). Der Absorber ist aus mehreren parallelen Absorberröhrchen von 10 mm Aussen- und 7.4 mm Innendurchmesser mit jeweils 12.5 mm Abstand aufgebaut.

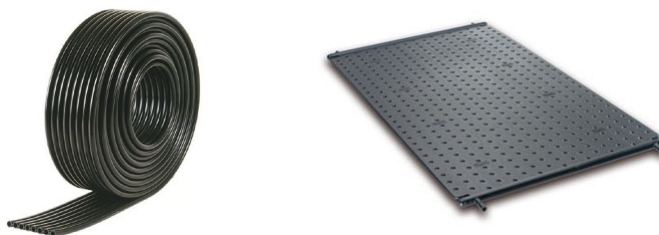


Abb. 8: *Aqsol Multischlauch Schwimmbadabsorber (links; Quelle: Aqsol GmbH) und Vollflächenabsorber HelioPool (rechts; Quelle: Roth Werke GmbH)*

Je acht dieser Röhrrchen sind über Zwischenstege zu einer Bahn von 10 cm Breite verbunden und werden so an ein Verteiler- respektive Sammelrohr mit 50 mm Aussendurchmesser angeschlossen. Der Hersteller empfiehlt für Wärmeanwendung einen Volumenstrom von 80 bis 120 l/m<sup>2</sup>/h.

Im Bereich metallischer Dacheindeckungen sind recht unterschiedliche Systeme verfügbar, alle ersetzen aber eine herkömmliche Dacheindeckung komplett. Das Atmova System [8] von Swissmetal imitiert herkömmliche Dachziegel durch metallene Ziegel, welche dank der verwendeten Bronzelegierung auch optisch einer herkömmlichen Ziegeleindeckung sehr ähnlich sind. Die Ziegel sind aus einem Blech geformt und rückseitig mit einem Röhrrchen verbunden, darin zirkuliert ein Wärmeträgermedium zum Verbraucher und zwischen den Ziegeln.

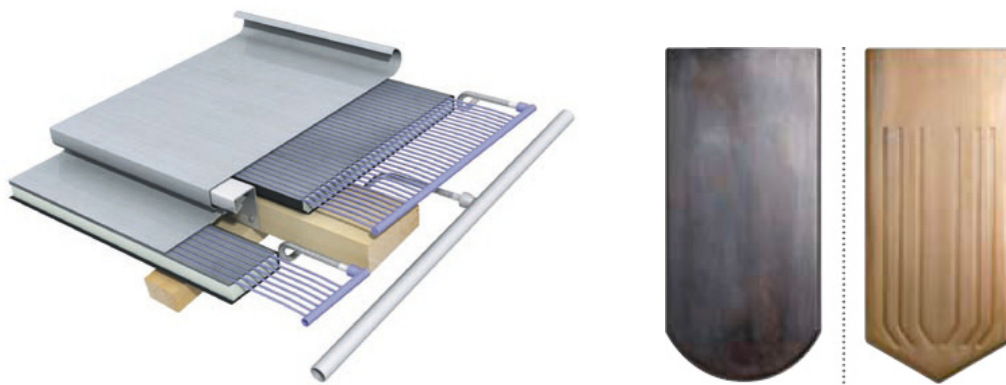
Das Solardach von Energie Solaire ist als nicht-abgedeckter Edelstahl-Vollflächenabsorber ausgeführt und ersetzt ebenfalls eine herkömmliche Dacheindeckung. Der Absorber wird mit unterschiedlichen Beschichtungen für verschiedene Anwendungen angeboten, für solare Wärmeengewinnung und als Element zur Raumkühlung/Beheizung, welche hauptsächlich auf Strahlungswärmeaustausch basiert.

Sowohl die Metalldächer von Rheinzink als auch von MAAS Profile sind nicht selektiv beschichtet und werden für die solare Wärmeengewinnung angeboten. Die QuickStep® Lösung der Fa. Rheinzink setzt dabei auf eine Dacheindeckung aus Titanzinkblech, die rückseitig mit einer Kapillarrohrmatte zum Wärmetransport verbunden wird. Die Eindeckung wird mit verschiedenen Oberflächeneigenschaften (vorbewittert blaugrau resp. vorbewittert schiefergrau) und entsprechend unterschiedlichem Emissions- und Absorptionsverhalten hergestellt. Messungen zur Verwendung als passive Kühlelemente wurden am ZAE Bayern durchgeführt [13], die Emissionsgrade wurden dort mit  $\epsilon \approx 0.65$  für die schiefergraue resp.  $\epsilon \approx 0.25$  für die blaugraue Oberfläche angegeben. Die Dacheindeckung von MAAS Profilen besteht aus Stehfalz-Profilen aus nicht-selektiv beschichtetem Aluminium von jeweils 500 mm Breite. In der Fläche zwischen den Fälzen sind runde, parallel zur Profilrichtung verlaufende Vertiefungen eingebracht, in die mit je 10 cm Abstand EPDM-Schläuche eingepresst werden. Diese dienen zur Wärmeübertragung vom Metalldach auf ein flüssiges Wärmeträgermedium (Elastomer Metall Absorber - EMA).

**Tab. 3: Marktübersicht verfügbarer und geeigneter Absorber**

Anbieter	Produkt	Bauart	Material
Energie Solaire SA, Sierre	Solardach AS	Vollflächenabsorber	Edelstahl
Swissmetal Design Solutions AG, Dornach	Atmova	Dachziegel	Baubronze <sup>1)</sup>
Rheinzink (CH) AG, Baden-Dättwil	QUICK STEP® SolarThermie	Metalldach	Titanzink
MAAS Profile GmbH (D)	BEMO-SOL	Metalldach	Aluminium (nicht-selektiv)

<sup>1)</sup> Legierung aus Kupfer, Zink, Mangan und Eisen



**Abb. 9: Links: Systemschnitt Quick Step®-SolarThermie (Quelle: Rheinzink Produktbroschüre) Rechts: Atmova Dachziegelsystem (Quelle: Atmova Produktbroschüre)**

Das Solarzentrum Allgäu bietet unter dem Namen PV-Therm Photovoltaik-Solarthermie Kombimodule an. Aufgebaut sind diese als handelsübliche Photovoltaikmodule mit polykristallinen Zellen. Zusätzlich ist hinter dem Modul eine verzinkte Stahlwanne angebracht, in dem ein Wärmeträger mit thermischer Kopplung an das PV-Modul zirkulieren kann. Ähnlich, aber mit Luft als Wärmeträgermedium, sind die SolarHybrid Kollektoren der Fa. Grammer Solar aufgebaut. Die bei Photovoltaikmodulen gewünschte Hinterlüftung ist bei diesem Produkt in Form eines Stahlblechgehäuses direkt in das Modul integriert und erfolgt mittels Ventilator mechanisch angetrieben. Der Hersteller empfiehlt dazu einen Luft-Volumenstrom von 40 – 100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, geeignet sind diese Module für Aufdach- oder Fassadenmontage. In der Schweiz arbeitet die Firma 3S-Swiss Solar Systems an einem wassergekühlten PV/T-Kollektor, der nach Angaben des Herstellers 2012 auf dem Markt verfügbar sein soll.

**Tab. 4: Marktübersicht verfügbarer PV/T-Kombimodule**

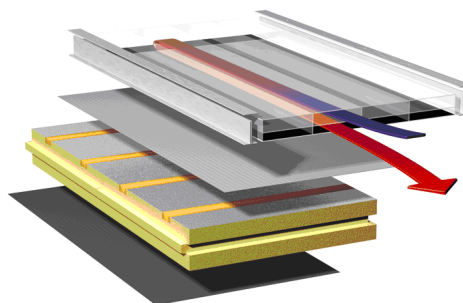
Anbieter	Produkt	Wärmeträger	Material
Solarzentrum Allgäu (D)	PV-Therm	Wasser/Glykol	
Grammer Solar (D)	SolarHybrid / PV/T	Luft	

Reine Luftkollektoren sind in der Schweiz im Gegensatz zu wassergebundenen Lösungen längst nicht so verbreitet. Sie werden beispielsweise von den deutschen Firmen Grammer Solar als Einzelkollektoren oder von Puren als komplettes Dacheindeckungssystem angeboten. Zur Verwendung als Kühlelement ist das Bomatherm-Dacheindeckungssystem von Puren aufgrund der fehlenden Frontabdeckung am geeignetsten. Die Frontseite besteht aus einem Kunststoffprofil (Doppelstegplatten, Abb. 10), durch welches Luft geführt wird. Kunststoffe weisen üblicherweise gute Eigenschaften bezüglich Emissionsverhalten für Kühlanwendungen auf.

Die Firma Consolar bietet mit dem SOLAERA Kollektor einen Hybridkollektor für Wärmeübertragung an Solarflüssigkeit und Luft an. Der selektiv beschichtete Absorber ist mit einem Frontglas abgedeckt, rückseitig befinden sich sowohl Rohrleitungen für die Wärmeübertragung an eine Solarflüssigkeit als auch Rippen zur Wärmeübertragung an einen mechanisch geförderten Luftstrom. Der Kollektor ist vollständig auf Wärmeanwendung ausgelegt, die Frontabdeckung und selektive Beschichtung machen das Modul ohne weitere Modifikationen ungeeignet für Kühlzwecke.

**Tab. 5: Marktübersicht verfügbarer Luftkollektoren**

Anbieter	Produkt	Bauart	Material
Grammer Solar GmbH (D)	TwinSolar	Kollektor	Aluminium mit Glasabdeckung
Puren GmbH (D)	Bomatherm	Dachsystem	Kunststoffprofil
Consolar	Solaera	Hybridkollektor	selektiv beschichtet, Glasabdeckung



**Abb. 10: Bomatherm Dacheindeckungssystem der Fa. Puren GmbH (Quelle: Puren)**

Gerade im Bereich von Luftkollektoren sind aber auch diverse produktunabhängige, vor Ort erstellte Lösungen denkbar. Gut geeignet wäre beispielsweise eine hinterlüftete Fassade mit lackierten Trapezprofil aus Metall als Aussenhaut. Die Wärmeleitung im Metall ist sehr gut, der Emissionsgrad von Lacken meist über  $\epsilon=0.9$ .

## 1.7. Anforderungen an Gebäude und System für passiven Kühlbetrieb

Typisch für passive Gebäudekühlung über Aussenflächen ist das periodisch Dargebot der natürlichen Kältequellen Aussenluft und Nachthimmel (Weltall). Diese stehen ausschliesslich nachts zur Verfügung, was eine Speicherung für den Tagbetrieb, den Zeitpunkt des Kühlbedarfs, notwendig macht. Günstig zur Nutzung solcher Kältequellen sind daher massiv gebaute, schwere Gebäude mit genügend hoher Wärmespeicherfähigkeit in ihrer Struktur. Diese kann die tagsüber anfallende Wärmelast ohne zu grosse Temperaturerhöhung aufnehmen, durch den nächtlichen Kühlbetrieb wird die gespeicherte Wärme dann wieder abgeführt, womit der Zyklus von vorne beginnen kann. Bedingt durch die natürlich begrenzte Leistungsfähigkeit der Kühlfunktion sowie durch die hohen Kühltemperaturen sollten die anfallenden Kühllasten durch einen guten baulichen Wärmeschutz und effiziente Geräte mit wenig Abwärme im Gebäudeinneren so weit wie möglich reduziert und die Wärmeübergabeflächen in den Räumen so gross wie möglich ausgelegt werden. Grosse Übertragungsflächen ermöglichen trotz relativ hohen Vorlauftemperaturen, wie sie bei passiven Kühlsystemen üblich sind, hohe Übertragungsleistungen. Geeignet sind Flächenabgabesysteme mit direkter Kopplung an die Speichermasse des Gebäudes wie TABS oder Fussbodenheizungen.

Wegen der fehlenden Speichermasse müssten grossflächige Kühldecken mit einem technischen Speicher als Ersatz kombiniert werden. Zur Reduktion der externen Lasten ist ein guter äusserer Sonnenschutz und moderater Umgang mit Glasflächen unabdingbar, zur Vermeidung hoher interner Lasten ist auf effiziente Geräte und Beleuchtungslösungen (z.B. Präsenzmeldern) zu achten.

Für eine optimale Wärmeabgabe der Aussenfläche an die Umgebung sind horizontal orientierte Oberflächen wegen Ihrer ungehinderten „Sicht“ zum kühlenden Nachthimmel optimal, besonders geeignet sind daher Bauten mit flachen oder nur gering geneigten Dachkonstruktionen. Zu beachten ist, dass durch das Kühlsystem nennenswerte zusätzliche Dachlasten entstehen können, insbesondere im befüllten Zustand. Die Konstruktion muss also darauf ausgelegt werden, diese Lasten aufzunehmen. Die über Dachabgabesysteme typischerweise erreichbaren Kühlleistungen von  $100 \text{ W/m}^2$  Dachfläche beschränken die Anwendung auf Gebäude mit wenigen Geschossen, für ein fünfgeschossiges Gebäude ergeben sich als Richtwert einer Kühlleistung  $20 \text{ W/m}^2$  Energiebezugsfläche (EBF). Ist bereits für den winterlichen Wärmeschutz eine gute Wärmedämmung des Daches wichtig, so gilt dies je nach Aufbau noch mehr für den Sommerfall. Schwimmbadabsorber, welche sich gut für die nächtliche Kühlung eignen, heizen sich tagsüber ohne Wärmeabnahme wegen ihrer hohen solaren Absorption gegen  $60 \text{ °C}$  auf. Eine thermische Entkopplung vom Gebäudeinneren gegenüber der Kollektorfläche ist daher wichtig.

Wirtschaftlich gesehen ist es günstig, wenn das Wärmeübergabesystem im Gebäude sowohl für den winterlichen Heiz- als auch den sommerlichen Kühlbetrieb genutzt wird. Beide Betriebsarten können bei geeigneter Systemgestaltung über geringe Temperaturdifferenzen zwischen Wärmeübergabesystem und Raumluft bereitgestellt werden (sog. Low-Ex-Prinzip).

## 1.8. Systemlösungen zur passiven Kühlung über Aussenflächen

Lösungen zum passiven Kühlen über Aussenflächen basieren auf den in 1.4 beschriebenen Mechanismen der Wärmeübertragung. Die Aussenfläche muss für den Kühlbetrieb geeignete physikalische Eigenschaften und Orientierung aufweisen und thermisch an das Innenraumklima gekoppelt werden. Da die Kühlung wegen klimatischer Randbedingungen nur nachts aktiviert werden kann, Kühlbedarf üblicherweise aber tagsüber anfällt, wird der Einbezug eines thermischen Speichers zur Überbrückung notwendig. Dieser ist entweder in der Gebäudestruktur vorhanden oder muss als technischer Speicher realisiert werden. An Energieeinsatz für die Kühlfunktion wird lediglich Elektrizität für die Steuerung sowie Transportenergie für die thermische Kopplung zwischen Innenraum und Aussenfläche benötigt, meist über ein Verteilsystem mit Wasser oder Luft als Wärmeträgermedium.

Die Effizienz solcher Lösungen ist daher weitestgehend von den klimatischen Rahmenbedingungen abhängig, da die erreichbare Kühlleistung im Wesentlichen dadurch bestimmt wird, der Transportaufwand aber unabhängig davon konstant anfällt. Auch die zur Verfügung stehende Aussenfläche limitiert die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Entscheidend ist die Wahl des Wärmeträgermediums, denn die Umsetzung eines luftbasierten Systems erfordert ein anderes Konzept als eine wasserbasierte Lösung.

### 1.8.1. Wassergeführte Systemlösungen

In der Schweiz sind wassergeführte Systemlösungen um einiges weiter verbreitet als solche mit Luft als Wärmeträgermedium. Zahlreiche Solaranlagen zur Warmegewinnung bewähren sich seit Jahren im Alltagseinsatz, fast jedes Heizsystem basiert auf wassergeführter Wärmeübertragung. Entsprechend verbreitet ist auch das Wissen über Installation, Unterhalt und Umgang mit solchen Systemen.

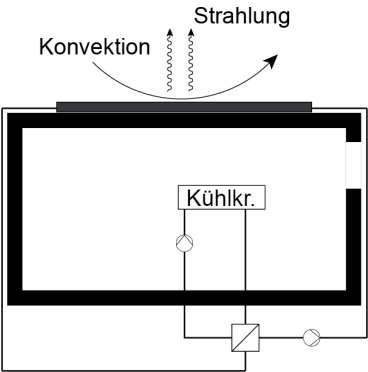
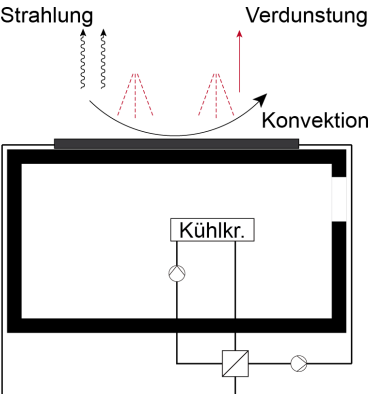
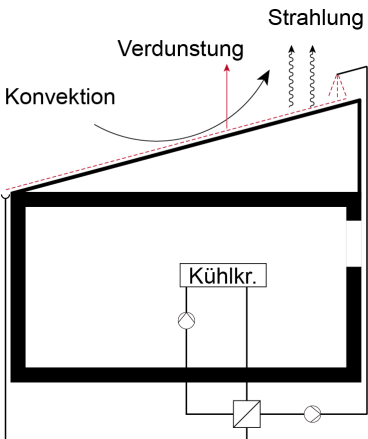
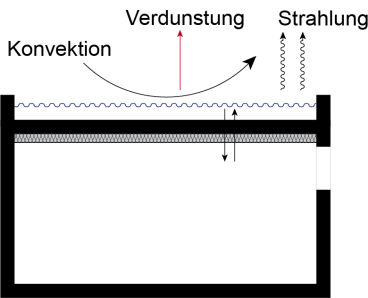
Physikalisch eignet sich Wasser mit seiner hohen Wärmekapazität sehr gut als Wärmeträger. Pro Kubikmeter Wasser lassen sich pro Grad Temperaturerhöhung rund 4.2 MJ Energie speichern, bei Luft beträgt die entsprechende Grösse etwa 1.3 kJ, also rund drei Tausendstel davon. Entsprechend fordern Lüftungssysteme deutlich grössere Kanalquerschnitte als wasserbasierte Lösungen, um dieselbe Energiemenge übertragen zu können. Durch die typischerweise höheren Transportgeschwindigkeiten bei Lüftungen werden zwar nicht mehr derart viel grössere Querschnitte notwendig, andererseits erhöht sich dadurch aber der Aufwand zum Transport der Luft.

Wassergeführte Systeme bestehen in der Regel aus zwei Teilen, einem Teil zur Wärmeaufnahme in den gekühlten Räumen, und ein Teil zur Wärmeabgabe an die Umgebung. Die Wärmeübergabe im Gebäudeinneren sollte bei passiven Systemen wegen der geringen Temperaturdifferenzen über möglichst grosse Übertragungsflächen erfolgen, beispielsweise über Fussbodenheizungen, TABS oder grossflächige Kühldecken. Solche Systeme werden üblicherweise aber auch zu Heizzwecken im Winter benötigt, sie müssen sich daher hydraulisch sowohl an die Wärmesenke (im Sommer) als auch an eine Wärmequelle (im Winter) koppeln lassen. Da der Wärmetransport an Aussenflächen irgendeine Form von Frostschutzmassnahmen für den Winterfall benötigt (Frostschutzmittel, Entleeren der Kollektoren), wird diese Anbindung meist über einen Wärmetauscher erfolgen. Im Anlagenteil zur Rückkühlung über die Aussenfläche kann grundsätzlich zwischen Systemen mit geschlossenem und solche mit offenem Kreislauf unterschieden werden. Eine Übersicht über die genannten Systemlösungen gibt Tab. 6.

Bei **geschlossenen Kühlkreisläufen** zirkuliert stets dasselbe Wärmeträgermedium im Kühlkreis, die Rückkühlung basiert im Wesentlichen auf Emission und Konvektion, durch Benetzen der wärmeabgebenden Oberfläche lässt sich aber auch Verdunstungskälte nutzen. Die Wärmeabgabe erfolgt beispielsweise mit unverglasten Solarkollektor und Wasser oder Sole als Wärmeträgermedium zur Ankoppelung an die Innenräume. Die Kollektoren werden nachts mit Wasser durchströmt und durch die dem Innenraum entzogene Energie erwärmt. Diese Wärme wird an die kühlere Umgebung abgegeben. Nebst unverglaster Solarkollektoren ist eine Vielfalt an geeigneter Wärmeabgabeflächen, wie sie in Kapitel 1.6.2 beschrieben wurden, denkbar. Messungen an einer Pilotanlage des ZAE mit diesem Funktionsprinzip und einem aktivierten Blechdach als Wärmeabgabefläche ergaben flächenspezifische Kühlleistungen im Bereich 20..80 W/m<sup>2</sup>, je nach Beschaffenheit der Oberfläche [13].

**Offene Kühlkreisläufe** nutzen nebst Emission und Konvektion auch Verdunstungskälte des Wärmeträgermediums (Wasser), beispielsweise durch dessen Verrieselung an der Aussenluft. Nachteilig wirkt sich der stete Wasserbedarf aus, der durch die Verdunstung entsteht, zumal dieser in einer Zeit mit tendenzieller Trockenheit anfällt. In einer Demonstrationsanlage des Zentrums für Angewandte Energieforschung (ZAE) Bayern in Würzburg [14] wurde dieses System an einer Pilotanlage getestet, wobei als Wärmeträgermedium gesammeltes Regenwasser benutzt wurde.

**Tab. 6: Übersicht wasserbasierte Systemlösungen. Bei allen Systemen ist die Integration eines Speichers denkbar.**

Beschreibung	Verbreitung	Schema
Geschlossenes System	Marktverfügbare Produkte (QuickSTEP Solar, Atmova), bisher nicht zum Kühlen eingesetzt	
Geschlossenes System mit Berieselung der Kollektoren (Nutzung der Verdunstungskälte)	Demonstrationsanlagen	
Offenes System (Nutzung der Verdunstungskälte)	Demonstrationsanlagen	
Offener oder Geschlossener Dachteich	Demonstrationsanlagen (v.a. in heissen Klimazonen)	

Das Wasser wird in einer Zisterne gesammelt und gespeichert und zur Kühlung nachts umgewälzt. Dazu wird es als flächiger Wasserfilm auf der Dachhaut (Trapezblech QUICK STEP®) verteilt. Beim Abfließen wird Wärme an die Umgebung abgegeben. Das abfließende Wasser wird anschliessend in der Dachrinne wieder gesammelt und der Zisterne zugeführt.

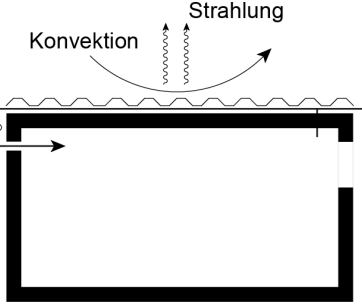
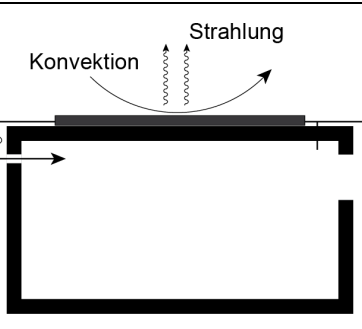
Über einen Wärmetauscher ist die Kälte des Zisternenspeichers für den Kühlkreis im Gebäude nutzbar. Messungen ergaben nächtliche Kühlleistungen im Bereich 50 - 150 W/m<sup>2</sup>. Wie immer bei Umgang mit Wasser besteht besonders bei offenen Systemen mit häufiger Wasserführung ein gewisses Risiko für Schäden durch Feuchteindringung oder Pilzbefall.

Als weitere Möglichkeit für eingeschossige Bauten wird beispielsweise in [15] eine Systemlösung mit Dachteich beschrieben, bei der die tagsüber anfallende Wärme aus dem Gebäude in einem grossen Wasservolumen auf dem Dach gespeichert und nachts an die Umgebung abgeführt wird. Der Teich ist als offenes oder – in Plastikhüllen verpackt – geschlossenes System ausgeführt. Um eine zusätzliche Aufwärmung des Teichwassers durch Sonneneinstrahlung zu verhindern, muss dieser durch eine mobile Vorrichtung tagsüber abgeschattet werden. Nachts, bei geöffneter Abdeckung, dient die Teichoberfläche zur Abstrahlung der gespeicherten Wärme. Bei freier Wasseroberfläche kann auch Verdunstungskälte genutzt werden. Der Teich dient bei diesem System zugleich als thermische Masse und als Wärmeabgabefläche, er stellt eine direkte Verbindung zwischen Aussenklima und Innenraum her. Mechanische Transportenergie wird dadurch keine benötigt, allerdings ist dadurch höchstens eine geringe Dämmung des Dachs für den Winterfall möglich, da die thermische Kopplung sonst getrennt würde. Geeignet ist diese Variante deshalb eher für Klimazonen mit milden Wintern und, da der Teich als thermische Speichermasse dient, leichte Baukonstruktionen, allerdings mit hohen statischen Anforderungen, um die Dachlast des Teiches abtragen zu können. Demonstrationsanlagen solcher Lösungen sind insbesondere in den südlichen USA zu finden. Denkbar ist auch eine Verlagerung des Teiches vom Gebäudedach in die Umgebung des Gebäudes (Swimming Pool). Die thermische Ankoppelung des Teiches an das Gebäude müsste in diesem Fall durch ein mechanisch angetriebenes Umwälzsystem erfolgen. Der Teich kann aber auch deutlicher tiefer erstellt werden als auf dem Gebäudedach und somit mehr Wärmekapazität zur Verfügung stellen. Eine zusätzliche Verrieselung des Teichwassers (Brunnen) erhöht die Wärmeabgabe durch Verdunstung weiter.

### **1.8.2. Luftgeführte Systemlösungen**

Übliche luftgeführte Lösungen zur passiven Kühlung basieren meist auf Nachtlüftung mit hohem Luftwechsel, um die Gebäudemasse durch nächtliche Aussenluft abzukühlen. Eine Kopplung an die thermische Speichermasse ist bei luftgeführten Systemen prinzipiell schwieriger und kann beispielsweise über Kanäle mit grossen Oberflächen in Böden und Wänden erfolgen (Hypokausten- resp. Murokaustenspeicher). Hinfällig wird bei luftbasierten Systemen die Thematik des Frostschutzes, die Kollektoren können problemlos ganzjährig und ohne Frostschutzmassnahmen (z.B. Entleeren der Kollektoren wie bei wasserbasierten Systemen) betrieben werden, auch geht von Leckagen ein weitaus geringeres Schadenspotenzial aus als bei flüssigkeitsbasierten Systemen. Die Kühlung lässt sich ideal mit einer mechanischen Belüftung des Gebäudes kombinieren, im Idealfall kann auf ein weiteres Wärmeübergabesystem im Gebäude komplett verzichtet werden. Gute Voraussetzungen für den Einsatz von luftbasierten Kühlsystemen sind also bei Gebäuden gegeben, die einen hohen Luftbedarf aus hygienischen Gründen haben, beispielsweise Schul- und Verwaltungsbauten mit hohen Belegungsdichten. Marktverfügbare Luftkollektoren sind meist mit einer transparenten Abdeckung versehen, was für den Kühlfall nicht notwendig ist. Nebst vorgefertigter Luftkollektoren bietet sich aber auch die grossflächige Anwendung von hinterlüfteten Fassaden- oder Dachaufbauten an, bei denen die Luft aus der Hinterlüftung genutzt wird. Diese kühlt sich beim mechanisch angetriebenen Durchströmen der Hinterlüftungsebene an der kalten Aussenfläche ab und kann so konditioniert zu Kühlzwecken im Gebäudeinneren genutzt werden. Als Absorber kommen dabei vielerlei Fassadenbekleidungen oder Dacheindeckungen in Frage, gegebenenfalls auch mit Zusatznutzung (Kühlung Photovoltaik durch aktive Hinterlüftung bei gleichzeitiger Wärmenutzung tagsüber). Gefordert sind geeignete Emissionseigenschaften der Oberfläche sowie eine genügend gute Wärmeübertragung von der Aussenfläche zur Hinterlüftungsebene. Erfüllt würde dies beispielsweise von Fassadenbekleidungen oder Blechdächern mit Oberflächenbehandlungen für hohen Emissionsgrad  $\epsilon$ .

**Tab. 7: Übersicht luftgeführte Systemlösungen. Bei beiden Systemen ist zusätzliche Nutzung von Verdunstungskälte (z.B. Besprühen der Absorberfläche mit Wasser) denkbar.**

Beschreibung	Verbreitung	Schema
Hinterlüftetes Dach (Fassade)	Marktverfügbar (Konstruktion vor Ort), bisher nicht zum Kühlen eingesetzt	 <p>The diagram shows a cross-section of a building with a rear-ventilated roof. A thick black line represents the roof structure. Above it, a wavy line indicates the roof surface. Arrows show air entering from the left, circulating under the roof, and exiting on the right. Labels 'Konvektion' and 'Strahlung' with arrows point to the roof surface, indicating cooling mechanisms.</p>
Luftkollektor	Marktverfügbar, bisher nicht zum Kühlen eingesetzt	 <p>The diagram shows a cross-section of a building with an air collector. A thick black line represents the collector structure. Arrows show air entering from the left, circulating through the collector, and exiting on the right. Labels 'Konvektion' and 'Strahlung' with arrows point to the collector surface, indicating cooling mechanisms.</p>

Gegenüber reiner Nachtlüftung bieten solche Systeme die Möglichkeit, durch Strahlungskühlung über die Aussenfläche Temperaturen unterhalb der Aussenlufttemperatur zu erreichen. Die hohen benötigten Volumenströme verursachen bei luftgeführten Anlagen aber in jedem Fall einen höheren Transportaufwand als bei wassergeführten, was sich auf die Systemeffizienz nachteilig auswirkt. In Tab. 7 sind die beschriebenen Systemlösungen zusammenfassend dargestellt.

### 1.9. Schlussfolgerung für die untersuchten Systemlösungen

Von den vorgestellten Systemlösungen konzentriert sich die folgende Potenzialstudie auf die wassergeführten geschlossenen Systeme, da sie, wie oben ausgeführt, in der Schweiz verbreiteter als luftgeführte oder offene Systemkonfigurationen sind. Die Ergebnisse der durchgeführten Parametervariationen zu den Eigenschaften der Aussenfläche lassen sich aber auch auf geschlossene luftgeführte Systeme übertragen.

Offene Systeme sind aufgrund des Wasserbedarfs und des dadurch notwendigen grossen Wasserspeichers eher marktferner und werden daher nicht weiter untersucht. Damit reduzieren sich die Kühleffekte an der Aussenfläche auf die Mechanismen der Strahlung und Konvektion.

Die folgende Potenzialstudie legt einen Schwerpunkt auf die Eigenschaften, die Betriebsparameter und die hydraulische Einbindung der Aussenfläche, die in vielen Konfigurationen vorkommen, um eine Charakterisierung der Leistungsfähigkeit einer Aussenfläche unter den Schweizer Randbedingungen vorzunehmen, die nach der oben dargestellten Marktanalyse aus unterschiedlichen kommerziellen Komponenten aufgebaut sein kann. Dazu wird zunächst ein verallgemeinertes Modell einer Aussenfläche als unabgedeckter Kollektor anhand der optischen und thermischen Eigenschaften modelliert, das sukzessive um andere Systemkomponenten ergänzt wird. Beginnend mit den Eigenschaften der Aussenflächen und der Leistungsabgabe unter konstanten Randbedingungen werden die Betriebsparameter der Aussenfläche variiert. Schliesslich werden die Auswirkungen unterschiedlicher Integrationsmöglichkeiten, und abschliessend die Deckungsanteile für unterschiedliche Nutzung im Innenraum (Einzelbüro, Grossraumbüro, Wohngebäude) untersucht. In den folgenden Kapiteln werden dazu zunächst die Modellierung, MeteoDaten und die Randbedingungen für die Potenzialstudie vorgestellt.

## 1.10. Systemkonfiguration und Modellierung der Komponenten

Die Simulationen von Aussenfläche und Gebäude wurde mit der Simulationsumgebung Matlab/Simulink [20] und der Toolbox CARNOT [21], [22] durchgeführt (Abb. 11).

Das Gebäudemodell umfasst das thermische Verhalten der Räume und Bauteile sowie die Abbildung des thermoaktiven Bauteilsystems (TABS) resp. Fussbodenheizung mit dem dynamischen Verhalten des Wärmeträgermediums. Die zugrundeliegenden Modelle werden im Anhang kurz erläutert. Die Nutzung des Gebäudes kann mit frei definierbaren Lastgängen modelliert werden. Sie wurde anhand des Merkblatts SIA 2024 "Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik" [12] festgelegt. Die Kältegewinnung über die Aussenfläche wird zu den Freigabezeiten nach der Regelgrösse (z.B. Vorlauf- oder Rücklauf-temperatur) kontinuierlich geregelt. Die Simulation rechnet mit dynamischer Zeitschrittweite, abhängig von der zeitlichen Änderung der Zustandsgrössen.

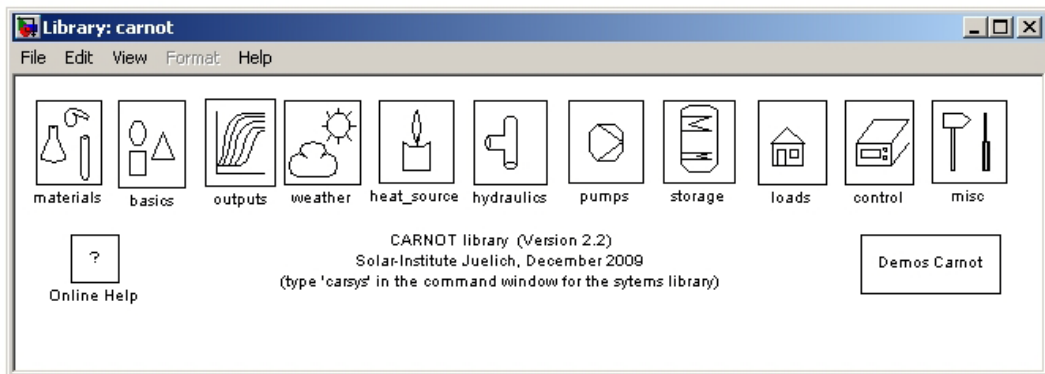


Abb. 11: Bibliothek CARNOT Blockset [21] für die Simulationsumgebung Matlab/Simulink [20].

### 1.10.1. Aussenflächen

Die Aussenfläche zur Wärmeabgabe wird als unabgedeckter Kollektor auf Grundlage des Modells aus der EN 12975-2 nach Gl.13 als differentielles Knotenmodell modelliert, um Bereiche mit konvektiven Gewinnen bei über die Länge des Kollektors sinkender Temperatur aufzulösen.

$$c_5 \cdot \frac{d\theta_m}{dt} = F' \cdot (\tau\alpha)_{en} \cdot K_{\theta b}(\gamma) \cdot G_b + F' \cdot (\tau\alpha)_{en} \cdot K_{\theta d}(\gamma) \cdot G_d - c_6 \cdot v \cdot G^* - c_1 \cdot (\theta_m - \theta_L) - c_2 \cdot (\theta_m - \theta_L)^2 - c_3 \cdot v \cdot (\theta_m - \theta_L) + c_4 \cdot (E_L - \sigma \cdot T_L^4) - \dot{Q} / A \quad \text{Gl.13}$$

$\theta_m$	mittlere Fluidtemperatur	[°C]
$F'$	Kollektorwirkungsgradfaktor	[-]
$\tau$	solarer Transmissionsgrad	[-]
$\alpha$	solarer Absorptionsgrad	[-]
$K_{\theta b,d}$	Einfallswinkel-Korrekturfaktor für direkte bzw. diffuse solare Einstrahlung	[-]
$\gamma$	Einfallswinkel	[°]
$G_{b,d}$	direkte bzw. diffuse (solare) Bestrahlungsstärke	[W/m <sup>2</sup> ]
$G^*$	globale (solare) Bestrahlungsstärke	[W/m <sup>2</sup> ]
$v$	Umgebungsluftgeschwindigkeit	[m/s]
$\theta_L$	Umgebungs-(luft)temperatur	[°C]
$E_L$	langwellige Einstrahlung	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}$	Nutzleistung	[W]
$A$	Kollektorfläche	[m <sup>2</sup> ]

Im Gegensatz zu den bei der Normprüfung aus den Messwerten identifizierten Parameter  $c_1$  bis  $c_6$  wurden die in Kap. 1.4 aufgeführten Gleichungen für die Beschreibung der Wärmeübergangsvorgänge über Strahlung und Konvektion benutzt.

Beim Strahlungswärmeübergang (Term mit Parameter  $c_4$ ) wird dabei in Abhängigkeit vom Flächenneigungswinkel mittels der Einstrahlzahlen nach Gl.14 und Gl.15 zwischen der Wärmeabgabe an den Himmel und an die Aussenlufttemperatur unterschieden.

$$\dot{q}_r = F' \cdot \left[ h_r \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot (\theta_m - \theta_H) + h_r \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \cdot (\theta_m - \theta_L) \right] \quad \text{Gl.14}$$

$\beta$	Kollektor – Neigungswinkel	[°]
$F'$	Kollektorwirkungsgradfaktor	[-]

mit den Einstrahlzahlen

$$\varphi = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad \text{Gl.15}$$

und dem Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung  $h_r$  nach Gl.6.

Die langwellige Gegenstrahlung  $E_L$  wird dabei nach Gl.17 - Gl.19 mit der Himmelstemperatur beschrieben. Der Wärmewiderstand zwischen Absorber und mittlerer Fluidtemperatur wird mit einem Kollektorwirkungsgradfaktor  $F'$  nach Duffie-Beckman [4] modelliert.

$$F' = \frac{1/U_t}{w \cdot \left[ \frac{1}{U_t \cdot [(w - d_e) \cdot F + d_e]} + \frac{1}{\lambda_{\text{con}}} + \frac{1}{h_{fi} \cdot \pi \cdot d_i} \right]} \quad \text{Gl.16}$$

$U_t$	Wärmedurchgangskoeffizient Absorber - Umgebung	[W/m <sup>2</sup> /K]
$w$	Abs tan d Absorberrohre	[m]
$d_i$	Innendurchmesser Absorberrohre	[m]
$d_e$	Aussendurchmesser Absorberrohre	[m]
$F$	Rippenwirkungsgrad	[-]
$\lambda_{\text{con}}$	Kontaktleitfähigkeit	[W/m/K]
$h_{fi}$	Wärmeübergangskoeffizient Rohrströmung Absorber	[W/m <sup>2</sup> /K]

Der konvektiven Wärmeübergang (Term mit Parameter  $c_1, c_2, c_3$ ) in Gl.13 wird mit Wärmeübergangsgesetzen für die überströmte Platte als eine Überlagerung aus freier und erzwungener Konvektion nach [2] und [17] modelliert, wobei die Wärmeübergangskoeffizienten für die freie Konvektion je nach Temperaturverhältnissen für einen Wärmestrom aufwärts oder einen Wärmestrom abwärts berechnet werden.

Ein integrales Modell gleichen Typs wurde von Erell und Etzion [23] zur Beschreibung der nächtlichen Kühlung unter Wüstenklima mit guter Übereinstimmung zwischen simulierten und Messwerten eingesetzt.

### 1.10.2. Nutzungen

Die energetische Bewertung basiert grösstenteils auf der Nutzung „Einzel-, Gruppenbüro“ gemäss Merkblatt SIA 2024 [12]. Dieses Nutzungsprofil steht für mittleren interne Lasten in einem typischen Bürogebäude. Als Variante einer Büronutzung mit höheren internen Lasten wurde zudem die Kategorie „Grossraumbüro“ betrachtet. Beide Nutzungsprofile entsprechen gängigen Büronutzungen, die Haupt-Nutzungszeiten (Personen und Geräte) liegen von Montag bis Freitag jeweils tagsüber (7.00 Uhr - 18.00 Uhr).

Als zusätzliche Variante mit geringeren internen Lasten wurde die Nutzung "Wohnen" für ein Einfamilienhaus im Minergie-Standard betrachtet. Das Gebäude wird als eine einzige Zone mit dem Nutzungsprofil "Wohnraum, Schlafraum" gemäss SIA 2024 simuliert.

**Tab. 8:** *Typischerweise anfallende Lasten für die Nutzungsprofile "Einzel-, Gruppenbüro", "Grossraumbüro" und "Wohnraum, Schlafzimmer" gemäss Merkblatt SIA 2024 (Standardwert).*

	Einheit	Einzel-, Gruppenbüro	Grossraumbüro	Wohnraum, Schlafraum
spez. interne Wärmelast	[W/m <sup>2</sup> ]	9.6	19.9	1.8
spez. externe Wärmelast	[W/m <sup>2</sup> ]	17.5	15.2	12.9
spez. interne Wärmelast pro Tag	[Wh/m <sup>2</sup> /d]	80	190	80

Die Personenbelegung erstreckt sich über den ganzen Tag, mit reduzierter Gleichzeitigkeit tagsüber. Abwärme von Geräten fällt den ganzen Tag über an, insbesondere aber auch in den Abendstunden. Zur Einordnung der Verhältnisse anfallender Lasten sind in Tab. 8 auszugswise Werte gemäss SIA 2024 Standardnutzung angegeben.

### 1.10.3. Charakterisierung und Modellierung der Referenzgebäude

Den Nutzungen Einzelbüro und Grossraumbüro liegen jeweils identische Gebäude, aber unterschiedliche Flächen der Büros zugrunde. Sowohl für das 17.5 m<sup>2</sup> grosse Einzel- als auch für das 144 m<sup>2</sup> grosse Grossraumbüro wurde jeweils eine Zone mit Südausrichtung als auch eine mit Nordausrichtung der Hauptfassade simuliert und bewertet. Der Glasanteil an der Fassadenfläche beträgt jeweils 58 %, Büros mit Nordausrichtung bleiben unverschattet.

Dem Wohngebäude liegt ein typisches Einfamilienhaus, welches ungefähr dem Minergie-Standard entspricht, zugrunde. Es besteht aus einer einzigen Zone mit der Nutzung „Wohnraum, Schlafraum“. Die Hauptfassade ist gegen Süden ausgerichtet, mit 16.7 % Glasanteil an der Fassade aber moderat verglast. Weitere Angaben zu den Gebäudetypen und deren Betriebsparametern finden sich im Anhang 4.

Zur Regelung der TABS und der Fussbodenheizung wird eine Rücklauftemperaturregelung mit aussentemperaturgeführter Kühlkurve eingesetzt, d.h. der Betrieb wird beendet, wenn die Sollrücklauftemperatur aus der Zone erreicht wird. Bei Bedarf wird in allen Gebäuden zwischen 18.00 Uhr und 5.00 Uhr passiv gekühlt. Sofern die Rücklaufsoltemperatur bis 5.00 Uhr noch nicht erreicht wird – beispielsweise in einer warmen Nacht – wird die Zusatzkühlung von 5.00 Uhr - 8.00 Uhr (Lugano warm bis 10.00 Uhr) aktiviert, die mit einer Vorlauftemperatur von 15 °C die Bauteile bis auf Solltemperatur herunterkühlt. Die jeweilige Wärmeabfuhr über passiven Kühlbetrieb und aktive Zusatzkühlung werden aufgezeichnet, um den Nutzungsgrad berechnen zu können.

### 1.10.4. Hydraulik

Im Vergleich zu solarthermischen Systemen zur Wärmegewinnung sind bei Lösungen zum Kühlen deutlich geringere Leistungsdichten am Kollektor erreichbar, das Verhältnis zwischen Ertrag und Aufwand daher tendenziell kleiner. Der Aufwand an Transport- und Regelungsenergie wird die Systemeffizienz daher noch entscheidender beeinflussen als bei solarthermischen Systemen zur Wärmegewinnung.

Für die Abschätzung des Aufwandes an Pumpenergie in einem geschlossenen System sind die Druckverluste in den einzelnen Anlagenteilen des Solarkreises ausschlaggebend. In den folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Wärmeaufnahme im Gebäude über einen Wärmetauscher an die Solarseite angebunden ist, der Solarkreislauf lässt sich somit in die Anlagenteile

- Absorber
- Zuleitungen zum Absorber und Armaturen
- Wärmetauscher

unterteilen. Eine Abschätzung des gesamten Druckverlustes im Kollektorkreis befindet sich im Anhang 5. Aus den dort getroffenen Annahmen wird der Druckverlust des Kollektorkreises zu 200 mbar abgeschätzt. Aus diesem Planungswert lässt sich eine passende Pumpe für den Solarkreislauf finden. Bei dem angenommenen Volumenstrom von 5 m<sup>3</sup>/h benötigt eine Hocheffizienzpumpe der Effizienzklasse A im Betrieb etwa 50 W elektrisch (Pumpenwirkungsgrad 56%). Bei einer durchschnittlichen Betriebszeit von 6 h je Nacht würde für die Umwälzung im Kollektorkreis während des Sommerhalbjahres (182 Tage) somit 55 kWh elektrische Energie benötigt.

## 1.11. Auswertung des Potenzials anhand von Schweizer Wetterdaten

Zur Abschätzung des Kühlpotenzials wurden zwei Stationen aus unterschiedlichen Klimazonen der Schweiz gewählt. Sämtliche Meteodaten stammen aus dem SIA Merkblatt 2028 [11]. Die Himmelstemperatur, die im Datensatz nicht enthalten ist, wurde mit Hilfe der Aussentemperatur, der Taupunkttemperatur und des Bewölkungsgrades b anhand der folgenden Gleichungen nach Martin und Berdahl [29] berechnet:

$$\dot{q}_{H,klar} = (0.711 + 0.0056 \cdot T_{TP} + 0.73 \cdot 10^{-4} \cdot T_{TP}^2) \cdot \sigma \cdot T_L^4 \quad \text{Gl.17}$$

$\dot{q}_{H,klar}$	Strahlungsleistung des klaren Nachthimmels	[K]
$T_{TP}$	Taupunkt – Temperatur	[K]
$T_L$	Aussenlufttemperatur	[K]

$$\dot{q}_{H,bewölkt} = (\sigma \cdot T_L^4 - \dot{q}_{H,klar}) \cdot b \cdot \varepsilon_{Wolk} \cdot \exp\left(\frac{-H_{Wolk}}{8200m}\right) \quad \text{Gl.18}$$

$\dot{q}_{H,bewölkt}$	Strahlungsleistung des bewölkten Nachthimmels	[K]
$H_{Wolk}$	Höhe der Wolkenbasis	1000 m
$\varepsilon_{Wolk}$	Emissionsgrad der Wolken	1
b	Bewölkungsgrad	[-]

aus denen sich die Himmelstemperatur nach Gl.19 ergibt.

$$T_H = \sqrt[4]{\frac{\dot{q}_H}{\sigma}} \quad \text{Gl.19}$$

Zürich MeteoSchweiz steht als Repräsentant eines eher gemässigten Mittellandklimas, Lugano stellvertretend für eine Klimastation mit den wärmeren Bedingungen des Tessins.

Die weltweite klimatische Entwicklung lässt zukünftig ein gegenüber heute tendenziell wärmeres Klima erwarten, dem Rechnung getragen wird durch die Wahl zweier unterschiedlicher Datensätze, nebst einem heutigen Bedingungen entsprechenden „normalen“ Jahr auch ein „warmes“ Referenzjahr (DRY). Für die Klimastation Zürich sind diese beiden Klimaverläufe in Abb. 12 für ein normales und in Abb. 13 für ein warmes Sommerhalbjahr dargestellt. Das Sommerhalbjahr wird dabei kalendarisch als Zeitraum vom 1. April bis 30. September festgelegt, entsprechend den Tagen 91 bis 273 vom Jahr. Deutlich erkennbar sind die im Durchschnitt rund 3 °C höheren Temperaturen im „warmen“ Jahr mit länger anhaltenden Hitzeperioden.

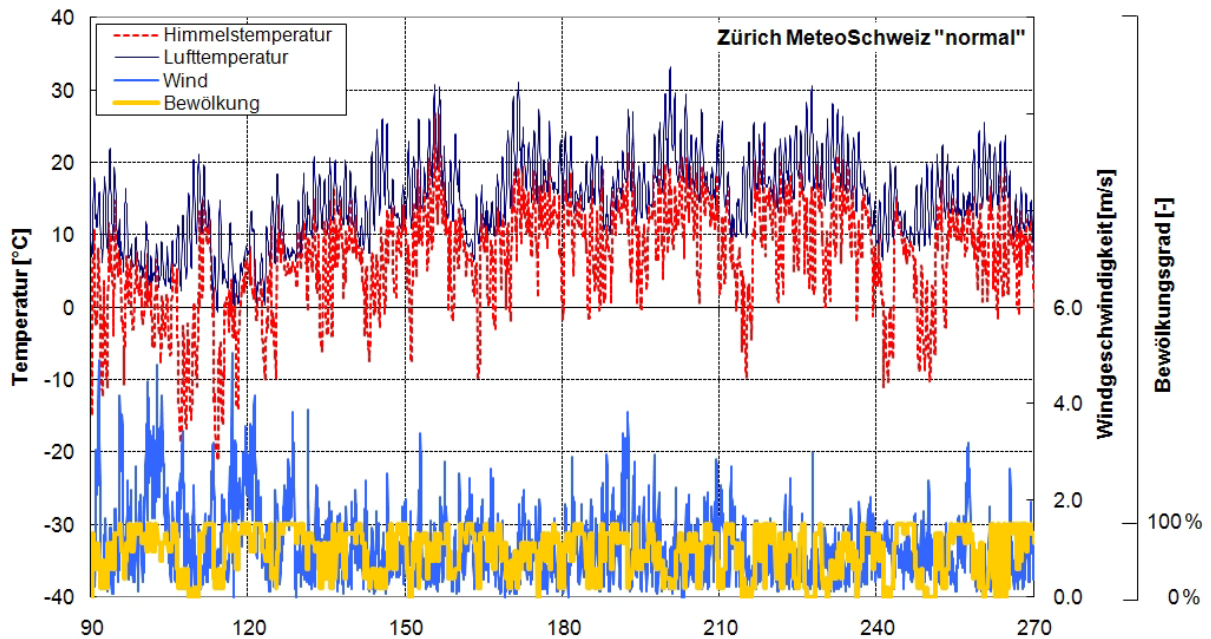


Abb. 12: Klimaverlauf Sommerhalbjahr für die Klimastation Zürich MeteoSchweiz in einem „normalen“ Jahr (SIA 2028) (Stundenmittelwerte)

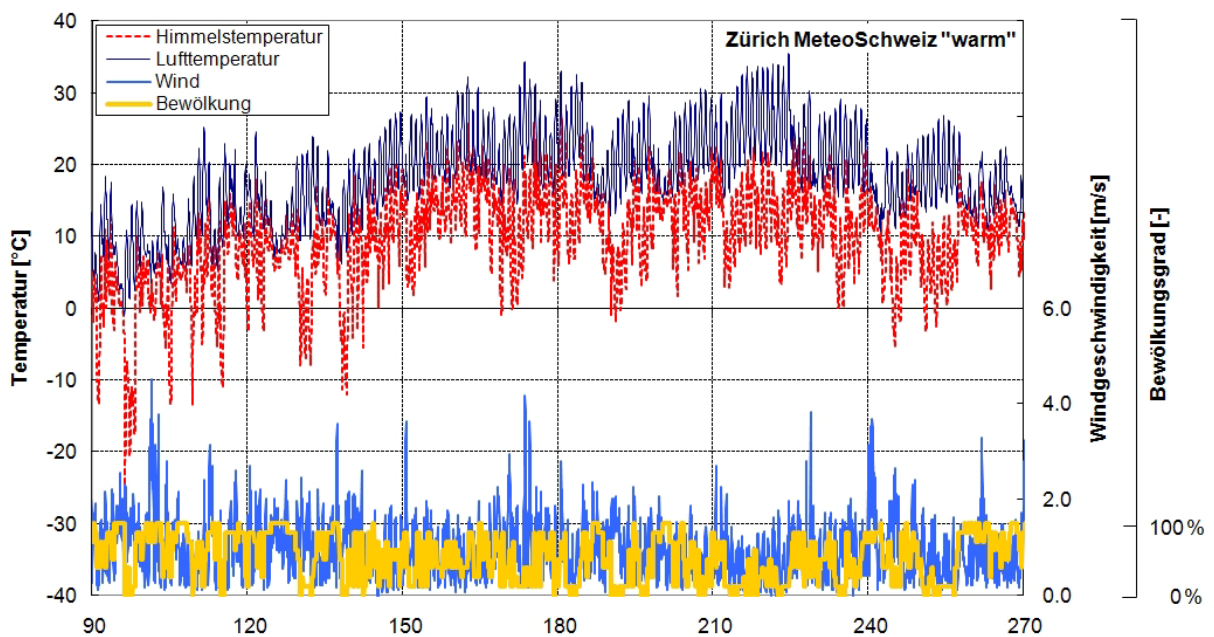
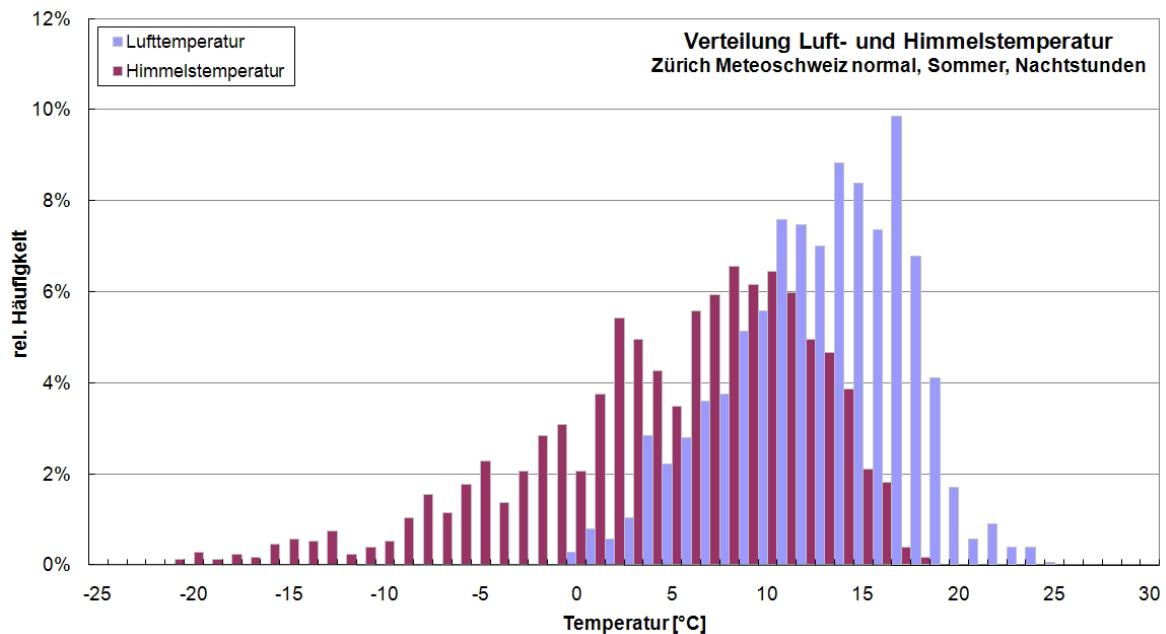


Abb. 13: Klimaverlauf Sommerhalbjahr für die Klimastation Zürich MeteoSchweiz in einem „warmen“ Jahr (SIA 2028) (Stundenmittelwerte)

Entscheidend für die passive Kühlung über Aussenflächen sind nur die nächtlichen Aussenbedingungen. Die Verteilung der Aussenluft- und Himmelstemperaturen während der sommerlichen Nachtstunden zeigt Abb. 14, exemplarisch für das Klima Zürich MeteoSchweiz normal. Als Nachtstunden werden dabei Stunden mit einem Sonnenzenitwinkel grösser als  $90^\circ$  betrachtet, also Stunden ohne solare Einstrahlung.

Mit einem Mittelwert von  $4.4^\circ\text{C}$  liegen die Himmelstemperaturen während der Zeit von Anfang April bis Ende September im Mittel 8 K tiefer als diejenigen der Aussenluft (Mittelwert  $12.4^\circ\text{C}$ ). Aus der Abbildung erkennbar ist auch, dass selbst im Sommer Himmelstemperaturen unter  $0^\circ\text{C}$  mit einem Anteil von 21 % recht häufig erreicht werden.



**Abb. 14:** Verteilung der Aussenluft- und Himmelstemperatur während der sommerlichen Nachtstunden, Klima Zürich-MeteoSchweiz normal DRY (SIA 2028)

Bei beiden Klimastationen sind die Mittelwerte sowohl der nächtlichen Aussenluft- als auch der Himmelstemperatur in einem Sommer mit warmen Bedingungen etwa 2 °C bis 3 °C höher als im normalen Jahr, was das Kühlpotenzial bereits spürbar beeinflusst. Die mittleren Windgeschwindigkeiten (nur sommerliche Nachtstunden, berechnet für Standorthöhe 10 m über Boden und städtisches Gebiet nach SIA 2028 [11]) sind in Zürich mit 0.7 – 0.8 m/s etwas tiefer als in Lugano mit jeweils 1 m/s für beide Klimatypen. Die für den Kühlbetrieb wichtigsten Kennwerte aller vier Klimadatensätze sind in Tab. 9 kurz zusammengefasst.

**Tab. 9:** Kenndaten der betrachteten Klimadatensätze der Stationen Zürich-MeteoSchweiz und Lugano: Mittelwerte über die sommerlichen Nachtstunden.

Klima	Mittelwert $\theta_L$ [°C]	Mittelwert $\theta_H$ [°C]	Mittelwert $v_{Wind}$ [m/s]
Zürich normal	12.4	4.4	0.8
Zürich warm	15.3	7.3	0.7
Lugano normal	15.8	8.0	1.0
Lugano warm	18.2	10.2	1.0

Um nebst gemittelten Werten auch den Bereich der vorkommenden Wettersituationen zu illustrieren, wurden für sämtliche vier Klimata jeweils exemplarisch eine Nachtsituation mit guten und eine mit schlechten Randbedingungen für die Wärmeabgabe über Aussenflächen (Kollektor mit 17.5 m<sup>2</sup>, 50 l/m<sup>2</sup>/h Volumenstrom, konstante Kollektoreintrittstemperatur 20 °C) ermittelt. Alle diese Nächte liegen in einer Warmperiode mit hohen täglichen Aussenluft-Temperaturspitzen oberhalb von 25 °C, es sind also Situationen mit hohen externen Lasten und damit auch hohem Kühlbedarf.

**Tab. 10:** Kühlleistung des Kollektors unter guten resp. schlechten Klimabedingungen am Standort Zürich, Mittelwerte ganze Nacht.

Bedingungen	Klima	$\theta_L$ [°C]	$\theta_H$ [°C]	$v_{Wind}$ [m/s]	Kühlleistung [W/m <sup>2</sup> ]
Gut	Normal	16.2	2.5	0.6	86
Gut	Warm	16.4	1.5	1.1	93
Ungünstig	Normal	21.1	15.1	0.5	18
Ungünstig	Warm	21.2	18.3	0.5	4

In Tab. 10 sind die Mittelwerte über eine ganze Nacht für die Klimastation Zürich zusammengetragen. Unter guten Rahmenbedingungen kann mit Aussenlufttemperaturen von gerundeten 15 °C und mit Himmelstemperaturen um den Nullpunkt gerechnet werden. In einem ungünstigen Fall wird das Kühlpotenzial durch Umgebungstemperaturen von etwa 20 °C stark gemindert.

**Tab. 11: Kühlleistung des Kollektors unter guten resp. schlechten Klimabedingungen am Standort Lugano, Mittelwerte ganze Nacht.**

Bedingungen	Klima	$\theta_L$ [°C]	$\theta_H$ [°C]	$v_{Wind}$ [m/s]	Kühlleistung [W/m <sup>2</sup> ]
Gut	Normal	18.7	5.1	1.0	67
Gut	Warm	19.2	4.2	1.1	67
Ungünstig	Normal	21.4	16.6	0.9	8
Ungünstig	Warm	26.0	18.1	0.9	-21

Tab. 11 zeigt die entsprechenden Werte für den Standort Lugano. Unter guten Bedingungen wurden für die südlicher gelegene Station etwa 3–5 K höhere Durchschnittstemperaturen als in Zürich ermittelt, bei ungünstigsten Bedingungen bleibt kaum mehr Kühlpotenzial, durch Konvektion wird auch nachts über die Aussenfläche Wärme gewonnen, die Abstrahlung ermöglicht aber immer noch einen geringen Kühleffekt.

## 2. Parametervariationen Kühlleistung

Um das Potenzial und die Sensitivität einer Kühlung über Aussenflächen bei schweizerischen Klimabedingungen aufzuzeigen, wird im Folgenden der Einfluss verschiedener Parameter auf die spezifische Kühlleistung eines nicht-abgedeckten Kollektors, dessen Modellierung in Kapitel 1.10.1 beschrieben wurde, durch Simulationen untersucht. Dabei wird die Wärmeabgabeleistung je Quadratmeter Kollektorfläche unter jeweils konstant bleibenden Rahmenbedingungen bestimmt. Tab. 12 fasst die Referenzwerte und die Variation der Parameter für die Bewertung der Kühlleistung zusammen.

Tab. 12: Übersicht Parametervariationen für die Kühlleistung

Referenzbedingungen und Parametervariation für die Kühlleistung		
Grösse	Referenzwert	Variation
Kollektorfläche	17.5 m <sup>2</sup>	-
Wärmedämmung	rückseitig 5 cm mit $\lambda=0.036$ W/m/K	-
Kollektoreintritt	20 °C	18 °C - 22 °C
Aussenlufttemperatur	15 °C	5 °C - 25 °C
Himmelstemperatur	0 °C	-5 °C - 15 °C
Emissionsgrad	0.9	0.1 - 0.9
Windgeschwindigkeit	1 m/s	0 m/s - 4 m/s
Kollektorausrichtung	30°	0° - 90°
Massenstrom	50 kg/m <sup>2</sup> /h	2 kg/m <sup>2</sup> /h - 100 kg/m <sup>2</sup> /h

### 2.1. Emissionsgrad

Wie bereits in Kapitel 1.4.1 erwähnt, ist wegen der üblicherweise grösseren Differenz zwischen Kollektor- und Himmelstemperatur hauptsächlich die Wärmeabgabe über Strahlung für eine gute Kühlleistung massgeblich. Diese ist aber auch stark vom Emissionsgrad  $\varepsilon$  und damit von der Oberflächenbeschaffenheit des Kollektors abhängig.

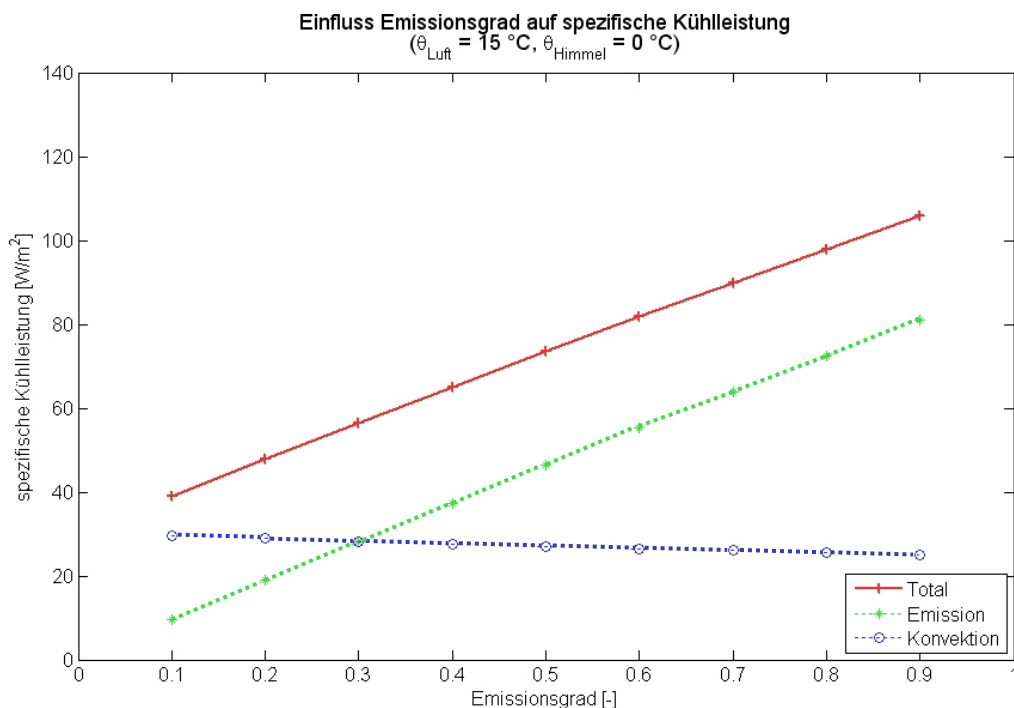
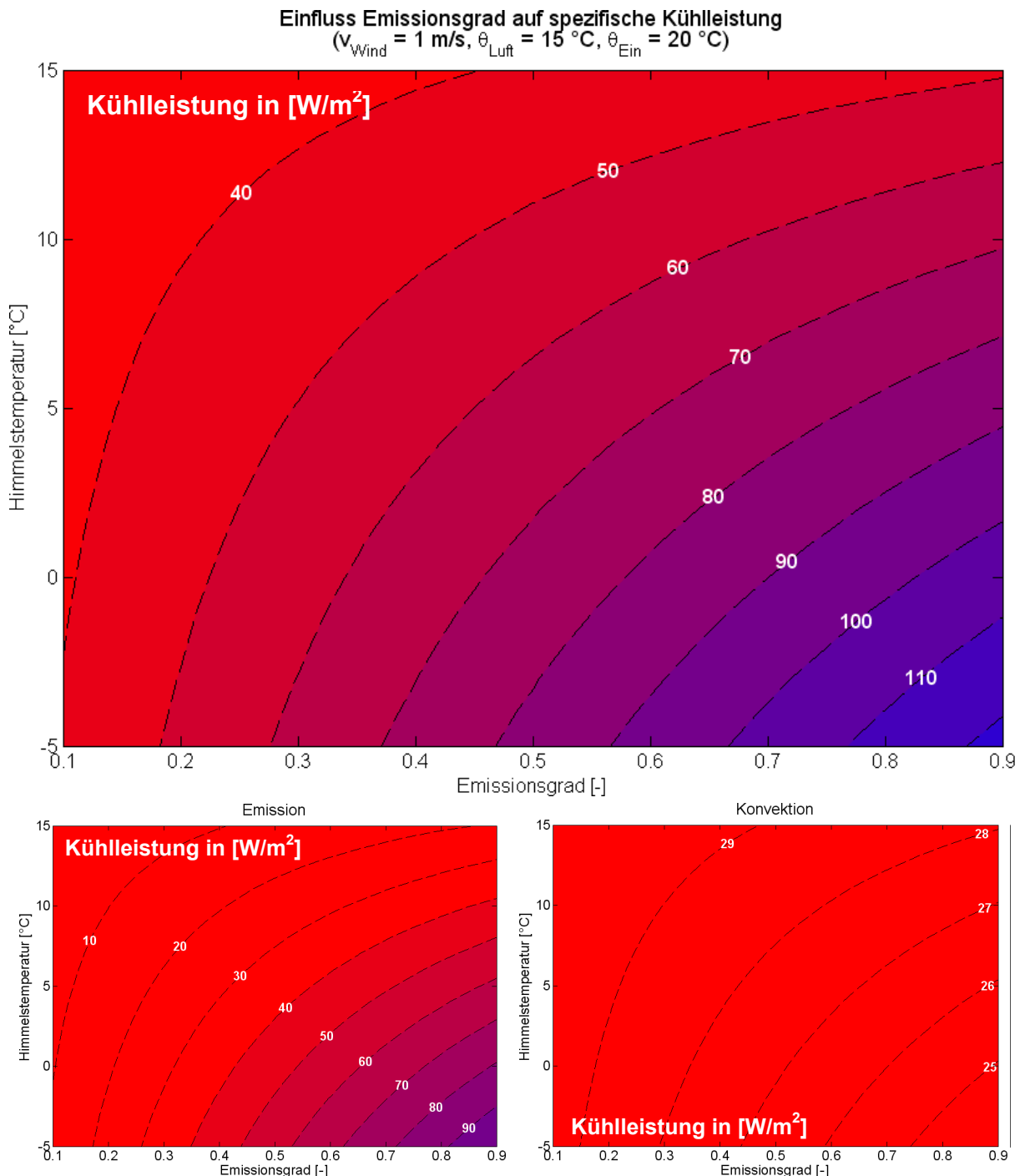


Abb. 15: Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung vom Emissionsgrad  $\varepsilon$  unter guten Aussenbedingungen mit Wind 1 m/s und 50 l/m<sup>2</sup>/h Durchfluss bei  $\theta_{\text{Ein}}=20$  °C.

In Abb. 15 ist diese Abhängigkeit dargestellt, sie zeigt die gesamte spezifische Kühlleistung je Quadratmeter Kollektorfläche für verschiedene Emissionsgrade  $\varepsilon$ . Ebenfalls dargestellt sind die Anteile, welche durch Strahlung und Konvektion abgegeben werden. Die Abgabeleistung über Strahlung ist ungefähr linear vom Emissionsgrad abhängig und erreicht in den Simulationen für günstige Oberflächeneigenschaften ( $\varepsilon=0.9$ ) Werte von ca.  $80 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ . Die Wärmeabgabe über Konvektion ist im Wesentlichen unabhängig vom Emissionsgrad, sie dominiert die Wärmeabgabe bei sehr tiefen Emissionsgraden und dadurch nur eingeschränkt möglicher Strahlungskühlung. Mit zunehmendem Emissionsgrad  $\varepsilon$  und dadurch steigender Abgabeleistung über Emission sinkt aber auch die mittlere Oberflächentemperatur, wodurch das Temperaturgefälle zur Aussenluft abnimmt und ein leicht rückläufiger Konvektionsanteil resultiert.



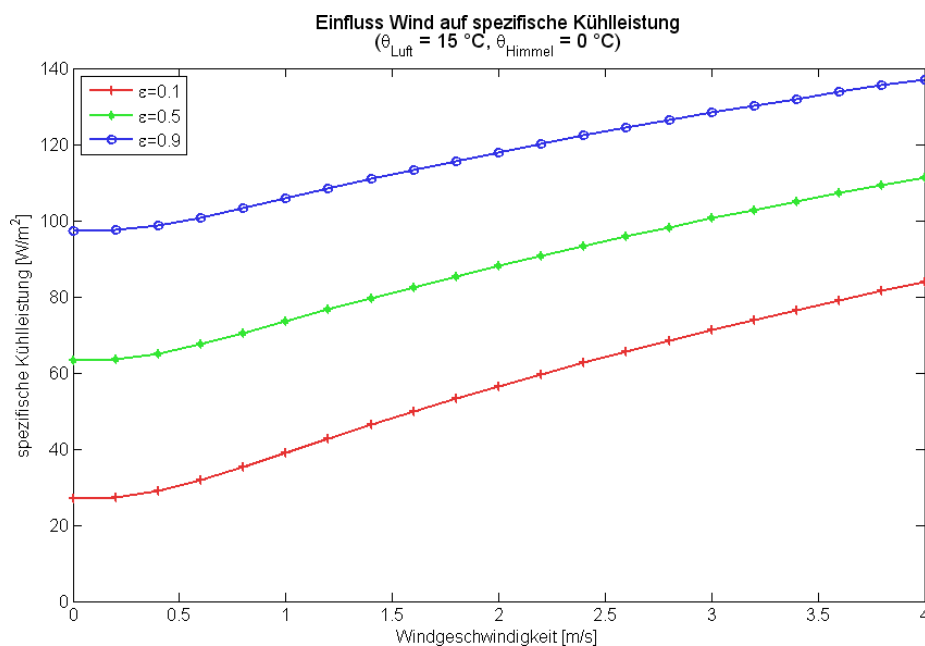
**Abb. 16:** Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung von Emissionsgrad und Himmelstemperatur. Oben: Gesamte Kühlleistung. Unten: Anteil Emission (links) und Konvektion (rechts) mit  $50 \text{ l/m}^2/\text{h}$  Durchfluss.

Nebst der Oberflächenbeschaffenheit – dem Emissionsgrad – ist das verfügbare Temperaturpotenzial  $T_A - T_H$  die zweite Grösse, welche den radiativen Wärmeübergang beeinflusst. Unter der Annahme einer näherungsweise konstanten Oberflächentemperatur  $T_A$  ist also insbesondere die Temperatur des Himmels  $T_H$  entscheidend für die Abgabeleistung. Abb. 16 zeigt die Abhängigkeit der Kühlleistung vom Emissionsgrad und der Himmelstemperatur, aufgeteilt in die Anteile Emission und Konvektion (Abb. 16 unten). Bei sehr tiefen Emissionsgraden wird der Wärmeübergang durch Konvektion dominiert, die Abgabeleistung ist daher kaum von der Himmelstemperatur abhängig und erreicht Werte von ca.  $40 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ . Der konvektive Anteil daran beträgt mit rund  $30 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$  mehr als drei Viertel. Bei höheren Emissionsgraden  $\varepsilon$  wird die Abgabeleistung zunehmend von der Emission bestimmt und dadurch von der Himmelstemperatur abhängig. Alleine der radiative Anteil erreicht bei hohem  $\varepsilon$  und sehr tiefen Himmelstemperaturen Werte über  $90 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ . Wiederum ist dabei ein leichter Rückgang der Abgabeleistung über Konvektion wegen tieferer Kollektortemperaturen zu erkennen. Die Überlagerung von konvektiver und radiativer Wärmeabgabe ergibt in den Simulationen unter günstigen Bedingungen Kühlleistungen von ca.  $100 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ .

## 2.2. Wind

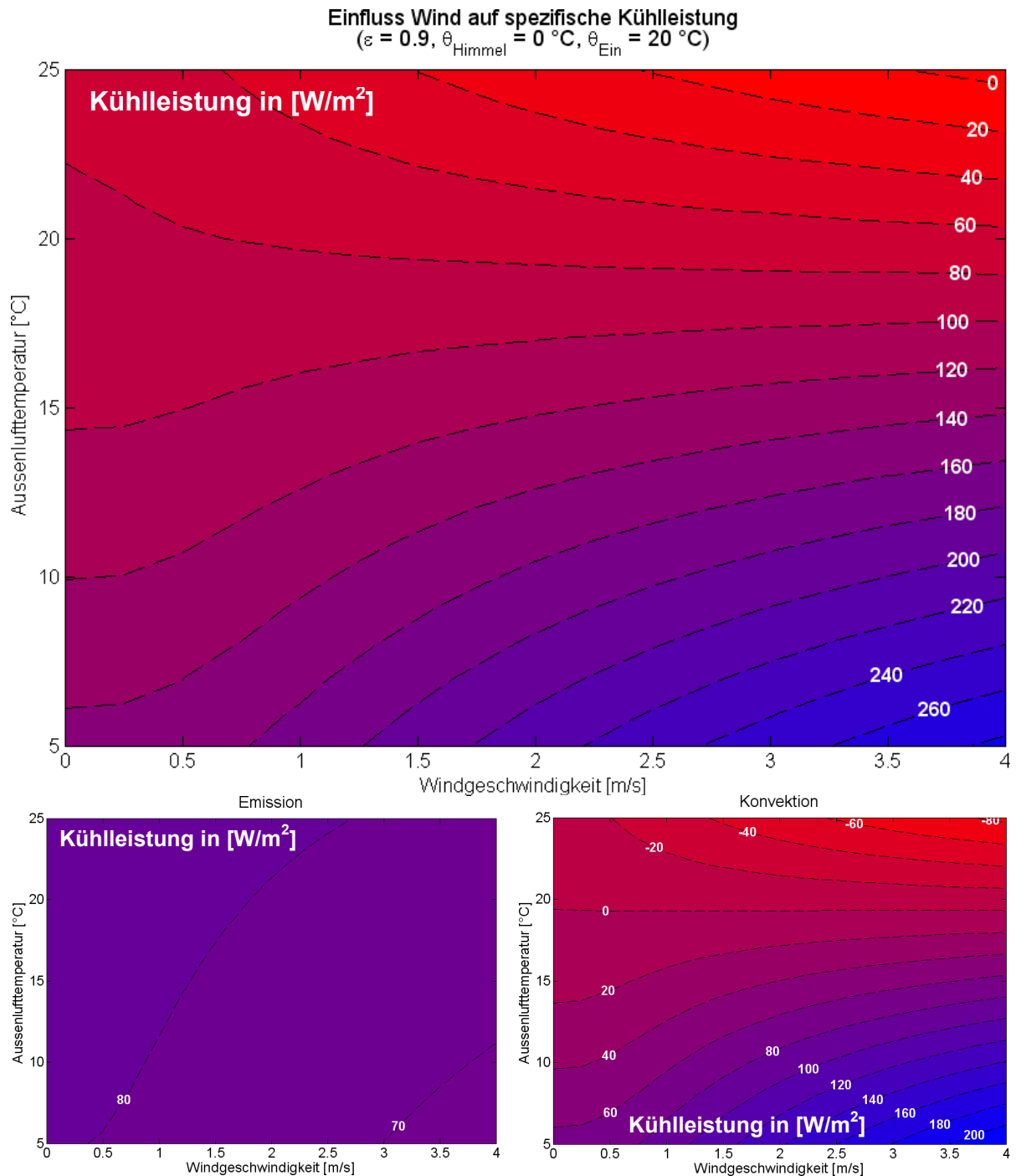
Bei tiefen Aussenlufttemperaturen kann ein massgeblicher Anteil der Kühlleistung durch Konvektion erreicht werden, Wind unterstützt diesen Effekt zusätzlich. In Abb. 17 ist der Windeinfluss bei verschiedenen Emissionsgraden dargestellt. Die konvektive Wärmeabgabe steigt mit zunehmendem Wind erst langsam an, da im Bereich bis  $0.5 \text{ m/s}$  die natürliche Konvektion noch einen grösseren Anteil am Wärmeübergangskoeffizienten  $h_c$  hat, während mit steigender Windgeschwindigkeit zunehmend die erzwungene Konvektion dominiert. Bei höheren Windgeschwindigkeiten wird auch die Kühlleistung am Kollektor grösser, der Einfluss ansteigender Windgeschwindigkeit wird dadurch von sinkenden Betriebstemperaturen des Kollektors konkurrenziert. Trotzdem bleibt der Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Kühlleistung annähernd linear.

Windgeschwindigkeiten um  $1 \text{ m/s}$  sind typisch für die betrachteten Klimata. Bei hohen Windgeschwindigkeiten kann die Kühlleistung zwar stark steigen, allerdings werden Stundenmittelwerte von mehr als  $2 \text{ m/s}$  nur in  $20 \%$  der Nachtstunden registriert.



**Abb. 17:** Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung von den Windverhältnissen bei  $50 \text{ l/m}^2/\text{h}$  Durchfluss und  $\theta_{\text{ein}}=20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Abb. 18 zeigt die Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit, Aussenlufttemperaturen und Kühlleistung der Oberfläche. Bei gleichen Werten für Himmelstemperatur und Emissionsgrad bleibt der radiative Anteil annähernd konstant bei  $80 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$ . (Abb. 18 unten links).

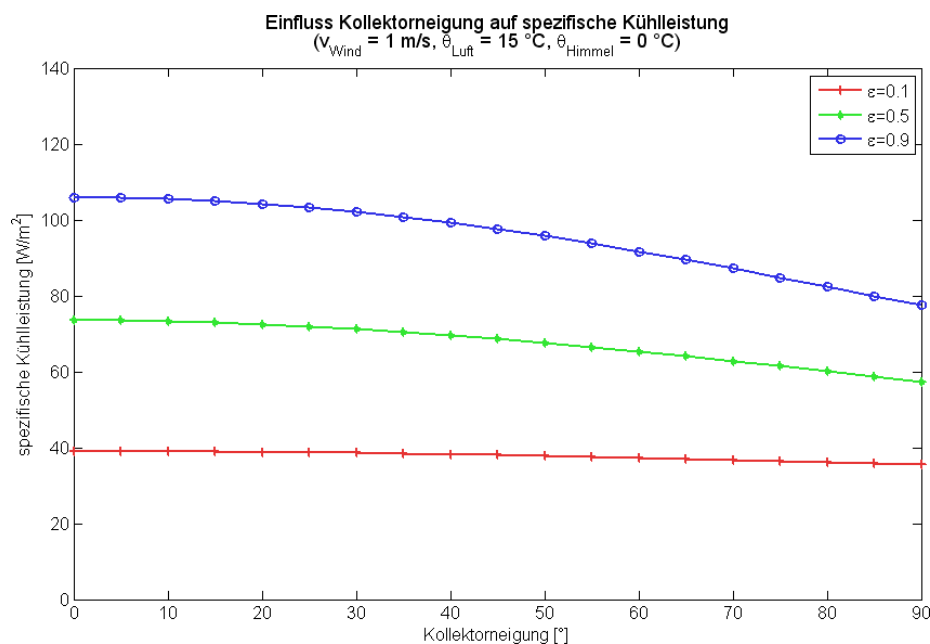


**Abb. 18:** *Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung von den Windverhältnissen und Aussenlufttemperaturen. Oben: gesamte Kühlleistung. Unten: Anteil Emission (links) und Konvektion (rechts) mit  $50 \text{ l/m}^2/\text{h}$  Durchfluss*

Oberhalb von etwa  $19 \text{ }^\circ\text{C}$  Aussenlufttemperatur kehrt sich der Wärmestrom durch Konvektion aber um (Abb. 18 unten rechts), der Kollektor gewinnt dann Energie über Konvektion. Mit höheren Windgeschwindigkeiten und Aussenlufttemperaturen nehmen die konvektiven Gewinne zu, bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $4 \text{ m/s}$  Wind betragen sie bereits  $80 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$ . Dadurch wird die Kühlleistung der Oberfläche stark gemindert. Dass trotzdem noch gekühlt werden kann, liegt am hohen radiativen Anteil der Wärmeabgabe, welche die Wärmegewinne durch Konvektion zu kompensieren vermag.

## 2.3. Neigung der Fläche

Für beste Wärmeabgabe ist eine horizontale Ausrichtung der Kollektoroberfläche ideal, da der Kollektor in dieser Ausrichtung vollständig zum kälteren Nachthimmel hin orientiert ist. Mit zunehmender Neigung wird die Oberfläche stärker strahlenden horizontnahen Himmels- teilen sowie der Umgebung – mit Temperaturen gleich der Aussenlufttemperatur ange- nommen – ausgesetzt, wodurch die Wärmeabgabeleistung reduziert wird. Diese Reduktion ist umso grösser, je höher der Anteil der Wärmeabgabe über Strahlung ist, d.h. je tiefer die Himmelstemperatur und je höher der Emissionsgrad der Oberfläche ist, zu sehen in Abb. 19: Bei hohen Emissionsgraden von  $\varepsilon = 0.9$  nimmt die Kühlleistung bei senkrechter Ausrichtung um etwa 30 % gegenüber einer ungeneigten Kollektorebene ab. Das Kühlpotenzial wird durch die Neigung also nicht wesentlich vermindert, was Spielraum für eine kombinierte Nutzung zur Wärmeabgabe-/Wärmegewinnung lässt. Bei tiefem Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0.1$  ist die Wärmeabgabe über Emission sehr stark eingeschränkt, wodurch die Winkelabhängig- keit quasi verschwindet.

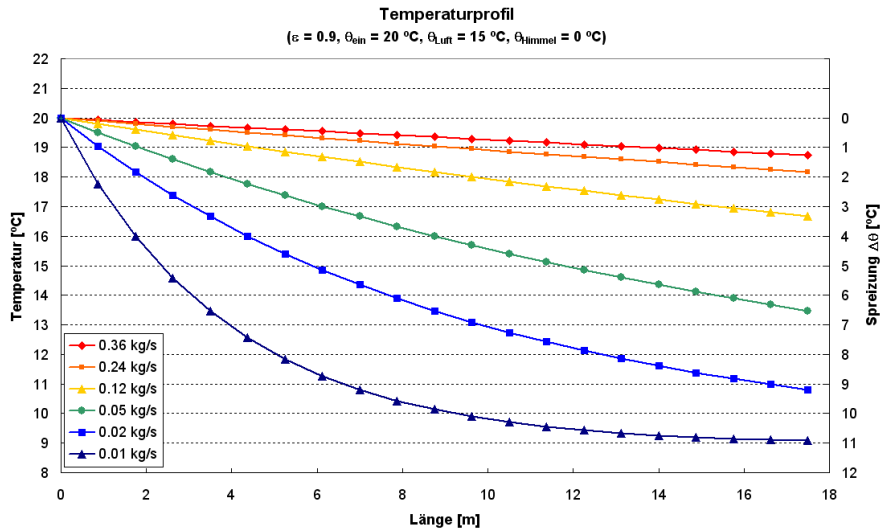


**Abb. 19:** Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung von der Kollektorneigung und vom Emissionsgrad  $\varepsilon$ , niedrige Himmelstemperatur,  $50 \text{ l/m}^2/\text{h}$  Durchfluss bei  $\theta_{\text{ein}} = 20 \text{ °C}$ .

## 2.4. Massenstrom und Eintrittstemperatur

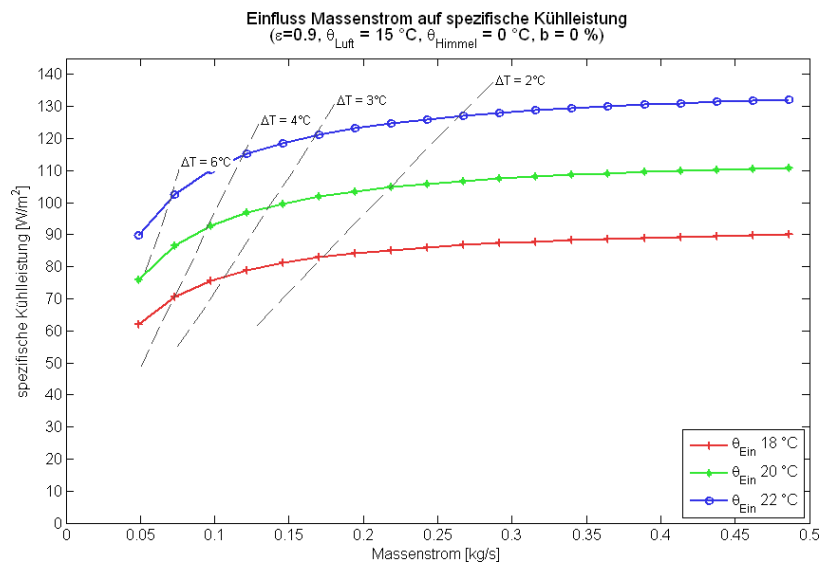
Mit höher werdendem Durchfluss im Kollektor reduziert sich die Verweilzeit des Wärmeträgers am kühlenden Aussenklima, wodurch sich dieser weniger stark abkühlen kann, zu sehen an den Simulationsresultaten des Temperaturprofils entlang dem Kollektor bei unterschiedlichen Massenströmen in Abb. 20. Bei hohem Durchfluss sinkt mit der Fluidtemperatur auch die mittlere Oberflächentemperatur am Kollektor nur wenig gegenüber der Fluidtemperatur am Eintritt ab. Die Effizienz des Kollektors bleibt dadurch hoch, bei hohen Massenströmen werden deshalb auch die höchsten Abgabeleistungen erreicht.

Die Temperaturspreizung über dem Kollektor nimmt hingegen mit zunehmendem Massenstrom ab, die Kollektoraustrittstemperatur und damit die minimal mögliche Vorlauf- temperatur des Kühlsystems bleiben relativ hoch, wodurch die Wärmeübergabe im Gebäude eingeschränkt sein kann. In gewissen Grenzen lässt sich die Temperaturspreizung über dem Kollektor aber mit dem Durchfluss einstellen.

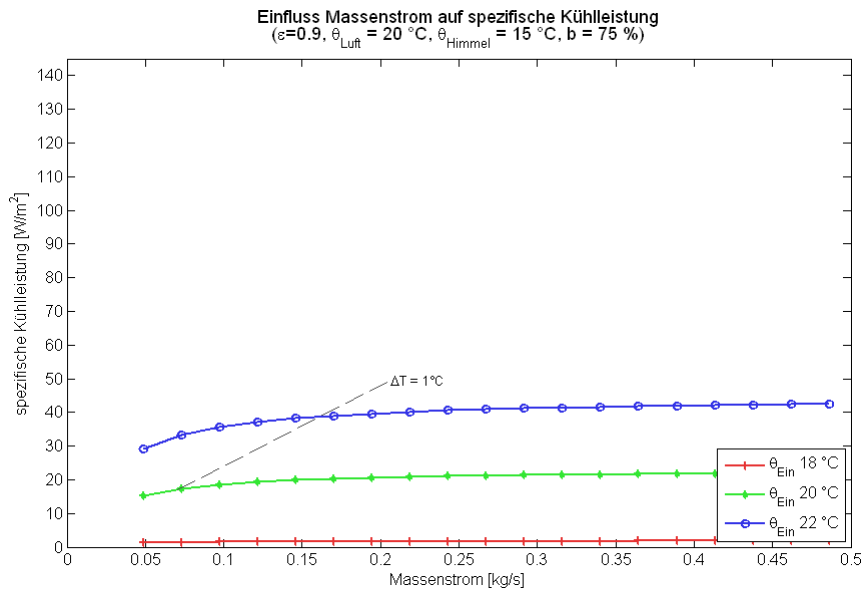


**Abb. 20:** Temperaturprofil entlang dem Kollektor bei unterschiedlichen Massenströmen. Durch einen angepassten Massenstrom kann die Temperaturspreizung  $\Delta\theta$  über dem Kollektor beeinflusst werden.

In Abb. 21 und Abb. 22 ist die Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung vom Massenstrom bei unterschiedlichen Kollektoreintrittstemperaturen und unterschiedlicher Himmelstemperatur dargestellt. Ebenfalls markiert ist die jeweils erreichbare Temperaturspreizung zwischen Kollektorein- und Kollektorausritt. Es zeigt sich ein Sättigungsverhalten der Abgabeleistung bei zunehmendem Massenstrom. Bei ungünstigen Aussenbedingungen – hohe Aussenluft und Himmelstemperaturen, siehe Abb. 21 – reduziert sich die Abgabeleistung abhängig von der Kollektoreintrittstemperatur auf rund ein Drittel bis ein Zehntel, auch nimmt die Abhängigkeit vom Massenstrom ab. Um eine hohe Temperaturspreizung zu erhalten, kann der Kollektordurchfluss gesenkt werden, unter diesen Begebenheiten wäre eine wetterabhängige Massenstromregelung, welche eine minimale Temperaturspreizung bei möglichst hoher Abgabeleistung einhält, möglich: In „kalten“ Nächten wäre ein hoher Massenstrom möglich, während er in „warmen“ abgesenkt werden müsste.



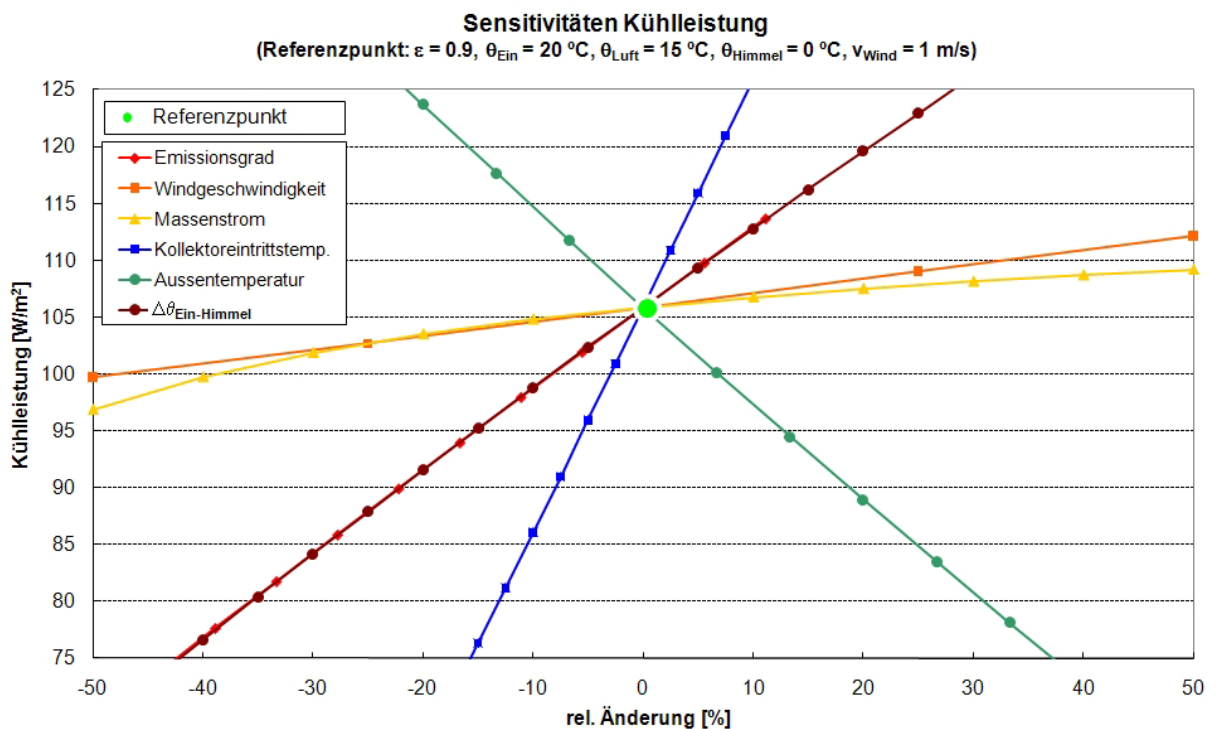
**Abb. 21:** Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung vom Massenstrom, dargestellt für verschiedene Temperaturen am Kollektoreintritt, günstige Kühlbedingungen bei klarem Himmel



**Abb. 22:** *Abhängigkeit der spezifischen Kühlleistung vom Massenstrom, dargestellt für verschiedene Temperaturen am Kollektoreintritt, ungünstige Kühlbedingungen mit hohem Bewölkungsgrad*

## 2.5. Zusammenfassung Parametervariationen Kühlleistung

Die vorgängig beschriebenen Parametervariationen und deren Einfluss auf die erreichbare Kühlleistung sind in der nachfolgenden Abb. 23 nochmals zusammenfassend dargestellt. Die Kurven geben die Änderung der Kühlleistung bei einer relativen Änderung des betrachteten Parameters an. Wenn beispielsweise der Massenstrom vom Referenzwert ( $50\text{ kg/m}^2/\text{h}$ ) ausgehend um 50 % erhöht wird, so steigt die Kühlleistung am Kollektor um  $3\text{ W/m}^2$ . Erkennbar den grössten Einfluss für diesen Referenzpunkt, der typische sommerliche Bedingungen für das Schweizer Mittelland darstellt, haben die Aussentemperatur, die Himmelstemperatur, die Kollektoreintrittstemperatur und der Emissionsgrad der Kollektoroberfläche.



**Abb. 23:** *Übersicht Parametervariationen mit Kühlleistung von  $106\text{ W/m}^2$  unter Referenzbedingungen*

Aus Darstellungsgründen wurde der Einfluss der Himmelstemperatur über die Temperaturdifferenz zwischen Kollektoreintritt und Himmel berechnet. Da die Kühlleistung sowohl proportional zum Emissionsgrad als auch zur Temperaturdifferenz zwischen Kollektoreintritt und Himmel ist, ergeben sich gleiche Änderungen der Kühlleistung bei Variation des Emissionsgrades und der Himmelstemperatur und die Kurven liegen annähernd übereinander.

Trotz der in Abb. 18 dargestellten hohen Leistungen bei niedrigen Aussenlufttemperaturen hat eine Änderung der Windgeschwindigkeit im Bereich 0.5-1.5 m/s hier nur geringen Einfluss auf die Kühlleistung, da die Variation um  $\pm 50\%$  durch den Referenzpunkt von 1 m/s nur  $\pm 0.5$  m/s beträgt und damit gering ausfällt. Wie schon gesehen sind die Daten des Referenzpunktes mit einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s aber für die Sommermonate ein typischer Wert, siehe Kap. 1.11, Abb. 12 und Abb. 13. In den Sommerhalbjahren werden nach den Schweizer Wetterdaten für Zürich mittlere Windgeschwindigkeiten bis 4 m/s erreicht, die auch für Abb. 18 zugrunde gelegt worden sind. Insbesondere bei einem warmen Jahr im Mittelland "Zürich warm" liegen die Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeiten aber häufig niedriger als 2 m/s (siehe Abb. 13). Insofern hat die Windgeschwindigkeit während langer Zeitperioden im Sommer nur geringen Einfluss auf die abführbare Kühlleistung.

Da der Massenstrom mit  $50 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  in einem Bereich liegt, in dem die Temperaturspreizung über den Kollektor bereits relativ niedrig ist, hat die Änderung des Massenstroms um  $\pm 50\%$  keine grossen Veränderungen der Kühlleistung zur Folge, da auch bei Halbierung die Temperaturspreizung nach Abb. 20 moderat ist. Bei weiterer Reduktion nimmt die mittlere Kollektortemperatur hingegen zunehmend ab, so dass auch die Kühlleistung immer stärker reduziert wird. Die Tendenz ist bereits in Abb. 23 erkennbar, da die Reduktion des Massenstroms eine grössere Änderung der Kühlleistung bewirkt als die Erhöhung des Massenstroms.

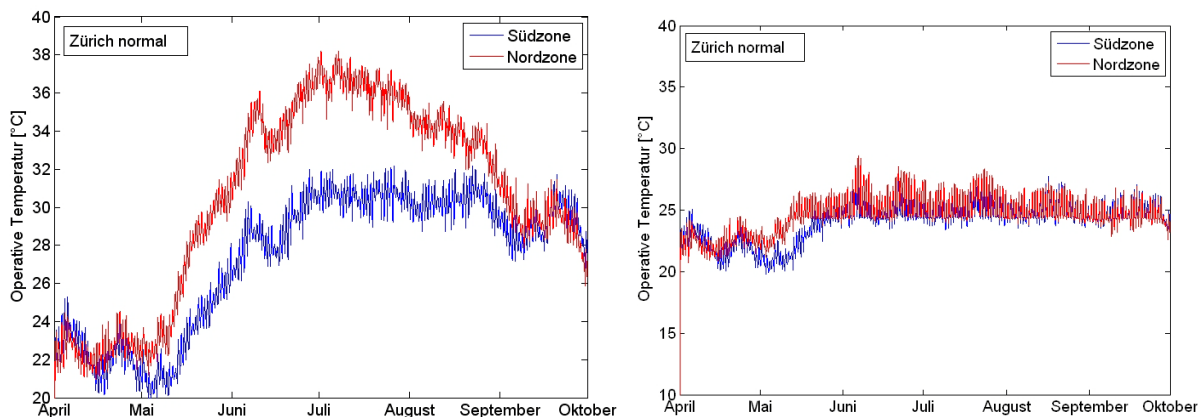
### 3. Parametervariationen Kühlenergie

In Kapitel 2 wurde das Kühlpotenzial für den modellierten Kollektor anhand der erreichbaren Kühlleistung unter verschiedenen, aber jeweils konstant gehaltenen Parametern diskutiert. Bereits im Verlauf einer Nacht können sich die Umgebungsbedingungen und damit die Kühlleistung aber relativ rasch ändern, in diesem Kapitel soll daher das Verhalten des Gesamtsystems Wärmeabgabe-Wärmelast, also das Zusammenspiel zwischen Aussenfläche, Gebäude und dem Klimaverlauf über eine komplette Sommerperiode untersucht werden. Wird das Gebäude und dessen Nutzung ebenfalls in die Betrachtungen mit einbezogen, so können auch die Parameter der Wärmeübertragung im Gebäude sowie die anfallenden Kühllasten verändert werden. Den folgenden Betrachtungen liegen stets die in den Kap. 1.10.2 und 1.10.3 beschriebenen Nutzungen und Gebäuden zugrunde.

#### 3.1. Lasten und passive Massnahmen

Zu Beginn der Auswertungen soll der Kühlenergiebedarf für die Zonen der Nutzung Einzelbüro kurz anhand von Vergleichsfällen unter den betrachteten Wetterdaten veranschaulicht werden.

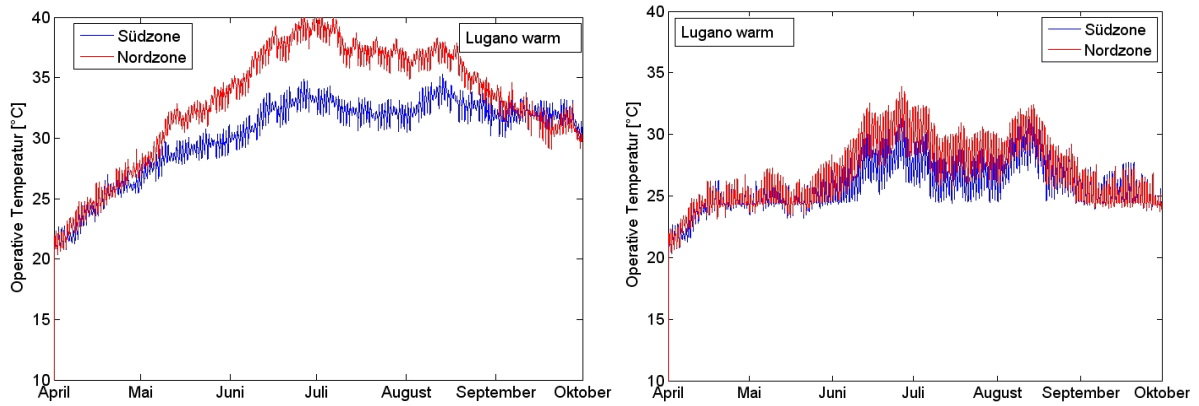
Abb. 24 links zeigt die Raumtemperaturen in den Zonen ohne Heizung oder Kühlung und Luftwechsel einzig während der Betriebszeit für die Wetterdaten Zürich Meteoschweiz normal und die Nutzung Einzelbüro. In Abb. 24 rechts sind die Temperatur mit zusätzlichem vierfachem Nachtluftwechsel gezeigt.



**Abb. 24:** Raumtemperaturen in den Zonen ohne Heizung/Kühlung mit Luftwechsel während der Betriebszeit (links) und bis zu vierfachem Nachtluftwechsel (rechts) für den Wetterdatensatz Zürich Meteoschweiz normal

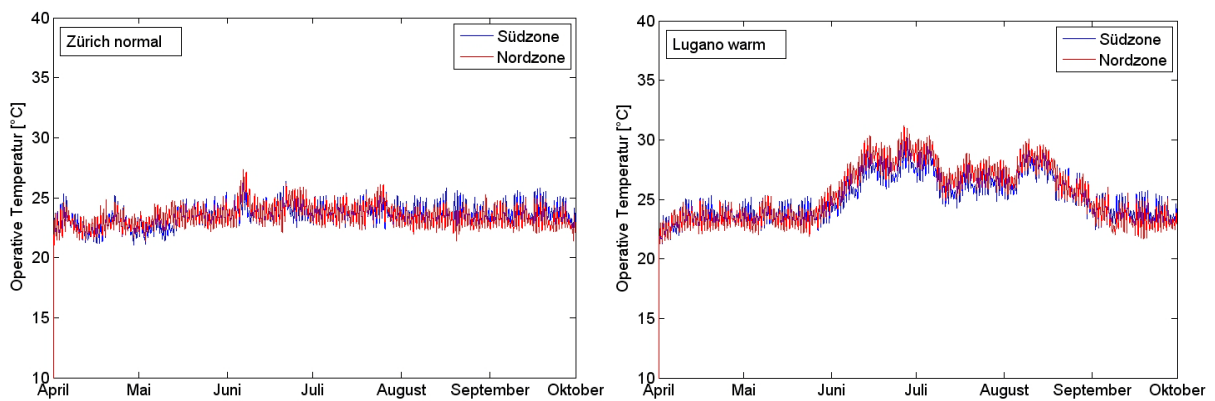
Bei normalem Sommer im Mittelland schwingen sich die Temperaturen ohne Heizung und Kühlung in den Sommermonaten bis maximal 38 °C in der Nordzone und ca. 30 °C in der Südzone auf. Da die Nordzone unverschattet (g-Wert 0.62), die Südzone durch den Sonnenschutz stark verschattet ist (Gesamt g-Wert Verglasung und Sonnenschutz 0.1), stellen sich hier in der Nordzone die höheren Temperaturen ein. Mit einem zusätzlichen vierfachen Nachtluftwechsel lassen sich die Spitzenwerte der Raumtemperaturen auf 30 °C begrenzen, wobei die Südzone in der Nähe des Bandes für die operative Temperatur gehalten werden kann.

Abb. 25 zeigt den Vergleich für Lugano warm. In diesem Fall erreichen die operativen Temperaturen ohne Heizung und Kühlung Spitzenwerte von ca. 40 °C. Aufgrund der höheren nächtlichen Aussenlufttemperaturen lassen sich die Temperaturen bei vierfachem Nachtluftwechsel nicht auf den Bereich der operativen Temperaturen nach SIA 382/1 reduzieren.



**Abb. 25:** Temperaturen in den Zonen ohne Kühlung mit Luftwechsel während der Betriebszeit (links) und bis zu vierfachem Nachtluftwechsel (rechts) für den Wetterdatensatz Lugano warm

Abb. 26 zeigt den Temperaturverlauf für Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) ohne Nachtluftwechsel, dafür aber mit rein passiver Kühlung über Aussenflächen. "Zürich normal" kann dabei fast vollständig im Temperaturband nach SIA 382/1 gehalten werden, in "Lugano warm" treten Hitzeperioden auf, so dass eine aktive Zusatzkühlung benötigt wird.



**Abb. 26:** Operative Temperatur mit passiver Kühlung über Aussenflächen und Luftwechsel in der Betriebszeit (ohne Nachtlüftung) für Wetterdaten Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts)

Im Folgenden wird daher der Zusatzkühlenergiebedarf und die operative Temperatur nach SIA 382/1 zunächst für unterschiedliche Nutzungen und im Anschluss als Variation für die Parameter der Aussenflächen für die Nutzung Einzelbüro ausgewertet, um anhand der Dekungsanteile die passive Kühlung über Aussenflächen bewerten zu können.

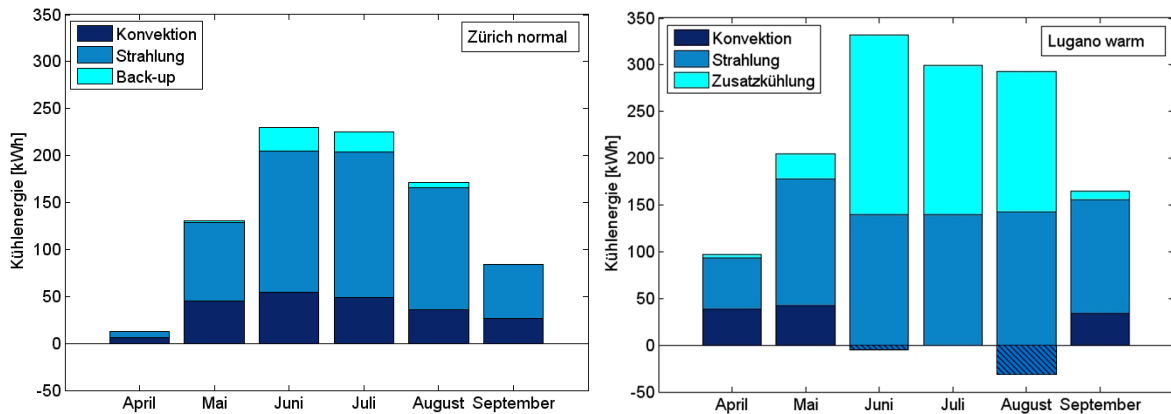
### 3.2. Nutzungen

In diesem Kapitel wird die Leistungsfähigkeit der passiven Kühlung über Aussenfläche im Bezug auf unterschiedliche Nutzungen bewertet. Der grösste Kühlbedarf tritt heutzutage in Büro- und Verwaltungsgebäuden auf. Diese sind aber zunehmend mit für Kühlung über Aussenflächen günstigen Flächenübergabesystemen mit Wärmeübertragung bei geringen Temperaturdifferenzen ausgestattet, vor allem mit TABS, aber auch mit Kühldecken. Im Folgenden werden repräsentativ die Ergebnisse für jeweils zwei Zonen in Nord- und Südausrichtung der Nutzung Einzelbüro und Grossraumbüro (vgl Kap. 1.10.3) dargestellt.

Andererseits ist an Marktentwicklungen zu erkennen, dass auch im Wohnbau aufgrund energieeffizienter Baustandards und gesteigener Komfortansprüche der sommerliche Wärmeschutz und eine Komfortkühlung an Bedeutung gewinnt. Daher ist für die Untersuchungen auch die Nutzung Einfamilienhaus betrachtet worden. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf ein Flächenverhältnis von  $2 \text{ m}^2_{\text{Zonenfläche}}/\text{m}^2_{\text{Kollektorfläche}}$ , also auf zweigeschossige Gebäude, bei denen die gesamte Dachfläche aktiviert ist.

### 3.2.1. Einzelbüro

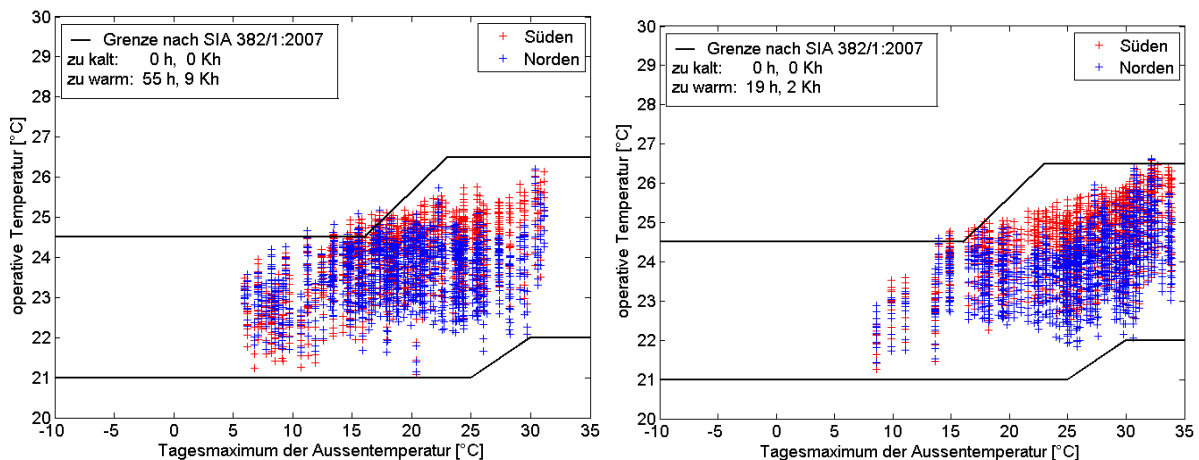
Abb. 27 zeigt die monatliche Kühlenergie für die Nutzung Einzelbüro. Für einen normalen Sommer im Mittelland (Abb. 27 links) kann grösstenteils rein passiv über die Aussenflächen gekühlt werden, es ergeben sich nur geringe Zusatzkühlenergieanteile von insgesamt 6%, die hauptsächlich in den Monaten Juni und Juli anfallen. Durch die nächtliche Abkühlung besteht in allen Monaten sowohl Potenzial für eine Kühlung über Abstrahlung als auch über Konvektion, wobei in den Sommermonaten Juni bis August ca. 70%-80% der Wärme über die Abstrahlung abgeführt werden.



**Abb. 27:** Aufteilung der Kühlenergie und des Zusatzkühlanteils für die Nutzung Einzelbüro für den Wetterdatensatz Zürich MeteoSchweiz normal (links) und Lugano warm (rechts)

Dies ändert sich für einen extremen Sommer im Tessin, der anhand des Wetterdatensatzes "Lugano warm" in Abb. 27 rechts dargestellt ist. Man erkennt den wesentlich höheren Bedarf an Zusatzkühlenergie von 42%, der in den Sommermonaten Mai bis September anfällt. Während in der Übergangszeit noch Potenzial für Wärmeabgabe über Konvektion besteht, resultieren durch die wärmeren Nachttemperaturen in den Monaten Juni und August kumuliert konvektive Gewinne, welche die Kühlung über Strahlung vermindern. In Abb. 27 rechts sind diese Gewinne daher als negative Kühlenergie schraffiert dargestellt.

Abb. 28 zeigt die operative Temperatur in dem nord- und südorientierten Einzelbüro in den Grenzen nach SIA 382/1. In beiden Klimata liegen die Temperaturen gut im Bereich nach SIA 382/1. Die Darstellung verdeutlicht auch gut die höheren Aussenlufttemperaturen in "Lugano warm", welche sich auch in höheren Raumtemperaturen manifestieren.



**Abb. 28:** Operative Temperatur während der Nutzungsstunden im Bereich nach SIA 382/1 für Zürich MeteoSchweiz normal (links) und Lugano warm (rechts) für die Nutzung Einzelbüro

Abb. 29 schliesslich zeigt die kumulierte Häufigkeit der nächtlichen Kühlleistungen für Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) während der Betriebszeiten des passiven Kühlsystems von 20 Uhr abends bis 5 Uhr morgens. Man erkennt, dass in einem normalen Jahr im Mittelland in 78% der Nächte Kühlleistungen über  $50 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$  im Sommerhalbjahr erreicht werden. Spitzenwerten liegen um die  $100 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ , die noch in ca. 14% der Nächte überschritten werden. Mittelwerte für die Nutzung Einzelbüro liegen im Mittelland bei knapp  $70 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ .

Im Extremsommer "Lugano warm" ändert sich das Bild deutlich. Hier steigt die kumulierte Leistung steiler an und Leistungen über  $50 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$  werden nur noch in ca. 26% der Betriebsstunden überschritten, während Spitzenwerte um  $100 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$  mit 3% des Anteils kaum noch erreicht werden. Der Mittelwert unter den extremen Sommerbedingungen im Klima Lugano warm sinkt auf knapp  $40 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ .

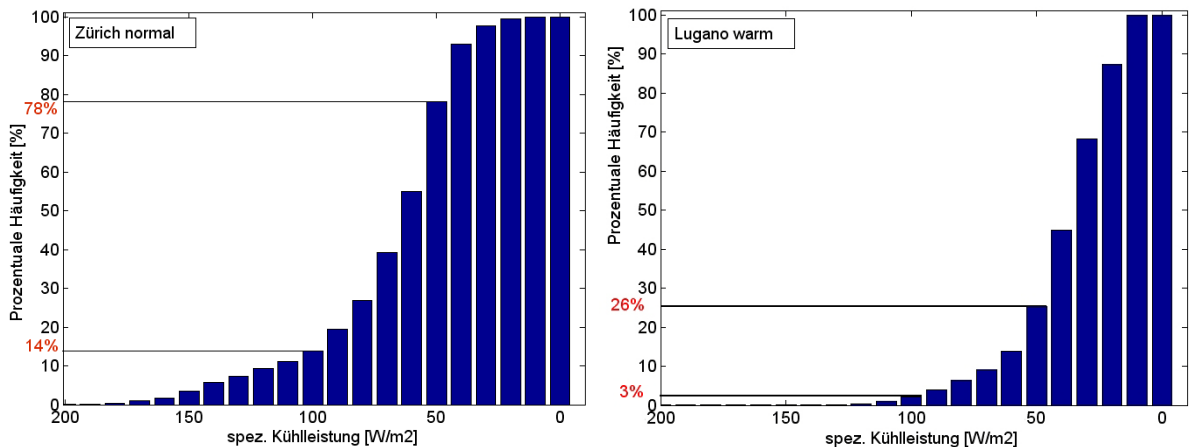


Abb. 29: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Kühlleistung des Kollektors in Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) für die Nutzung Einzelbüro

### 3.2.2. Grossraumbüro

Im Grossraumbüro treten aufgrund der höheren Belegungsdichte auch höhere interne Lasten auf (siehe die Übersicht in Tab. 13 nach SIA Merkblatt 2024 [12]), so dass der Zusatzkühlanteil für diese Nutzung auch im normalen Sommer im Mittelland ansteigt. Durch die höheren Lasten erhöhen sich auch die Temperaturamplituden in Vergleich zum Einzelbüro, die bei gleicher baulicher Ausstattung während eines Tages auftreten können. Aufgrund der höheren Lasten müssen die TABS auf tiefere Temperaturen konditioniert werden, um die Temperaturen im Bereich nach SIA 382/1 zu halten, wodurch die Fläche bei tieferen mittleren Temperaturen betrieben wird und damit die Kühlleistung des Kollektors gegenüber der Situation „Einzelbüro“ sinkt.

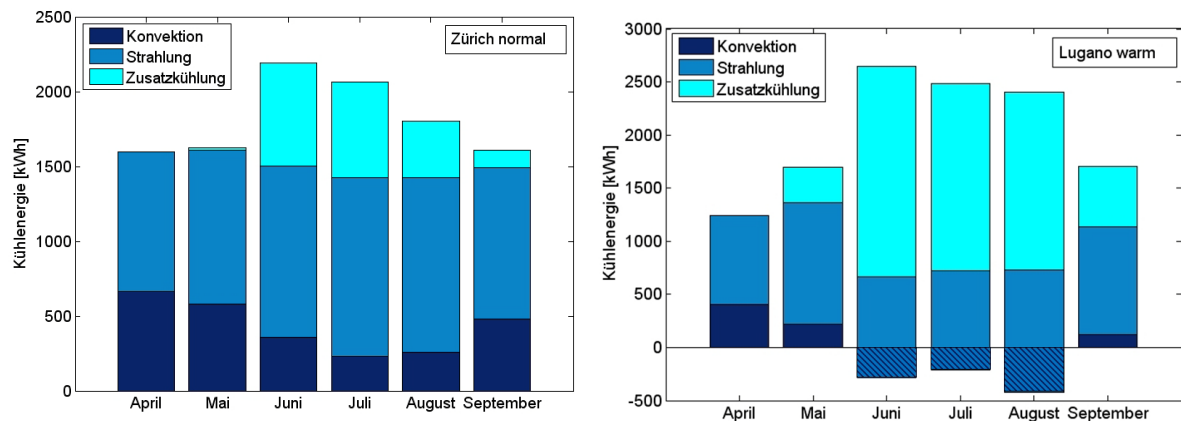
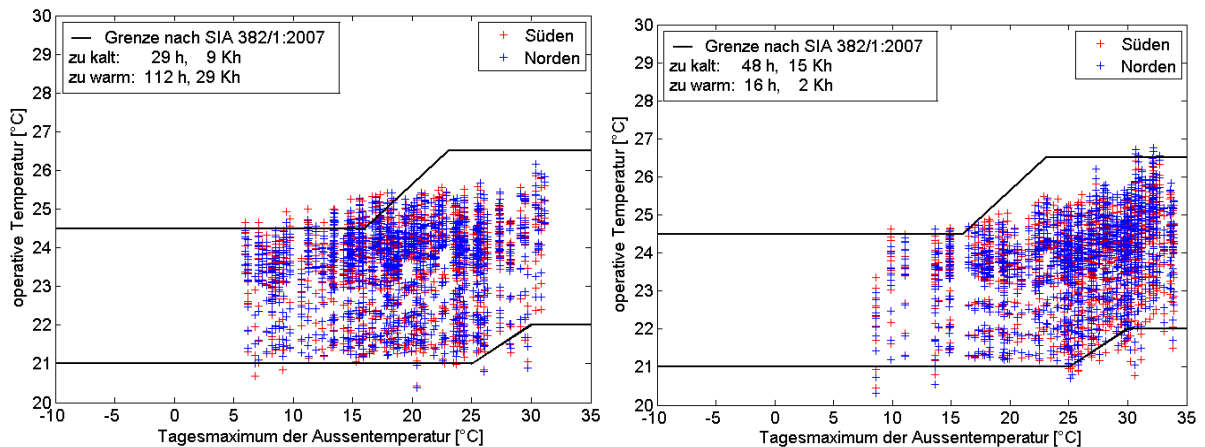


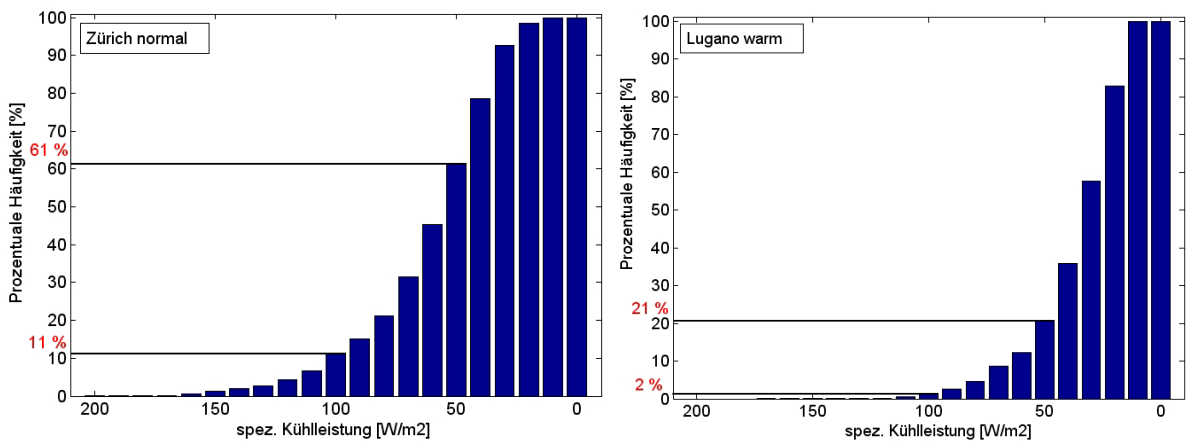
Abb. 30: Aufteilung der Kühlenergie und des Zusatzkühlanteils für die Nutzung Grossraumbüro für den Wetterdatensatz Zürich Meteoschweiz normal (links) und Lugano warm (rechts)

Abb. 30 zeigt die Kühlenergie für die Nutzung Grossraumbüro. In einem normalen Sommer im Mittelland steigt der Zusatzkühlanteil von 6% der Nutzung Einzelbüro auf 16% bei der Nutzung Grossraumbüro. Der Zusatzkühlbedarf fällt dabei hauptsächlich in den Sommermonaten Juni, Juli und August an. Es besteht aber die ganze Zeit hindurch Potenzial für Kühlung über Strahlung und Konvektion. Im Extremsommer Lugano warm, der in Abb. 47 rechts dargestellt ist, steigt der Zusatzkühlenergiebedarf von 42% bei Nutzung Einzelbüro auf 55% bei der Nutzung Grossraumbüro. Wie im Einzelbüro treten hier in den Sommermonaten Juni, Juli und August durch die warmen Aussentemperaturen in der Summe konvektive Gewinne des Kollektors auf, die sich im Vergleich zur Nutzung im Einzelbüro noch erhöhen, da als Folge der tieferen Temperaturen in den TABS die aktivierte Aussenfläche ebenfalls bei tieferen Temperaturen betrieben werden muss.



**Abb. 31: Operative Temperatur während der Nutzungsstunden im Bereich nach SIA 382/1 für Zürich Meteoschweiz normal (links) und Lugano warm (rechts) für die Nutzung Grossraumbüro**

In Abb. 31 sind die operativen Raumtemperaturen für die Nutzung Grossraumbüro dargestellt. Auch hier wird der Bereich nach SIA 382/1 bei beiden Klimasituationen gut eingehalten, aber die Abbildung verdeutlicht die höheren Temperaturamplituden im Grossraumbüro, die den gesamten Bereich nach SIA 382/1 einnehmen.



**Abb. 32: Häufigkeiten der Kühlleistung des Kollektors für Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) der Nutzung Grossraumbüro.**

Abb. 32 zeigt die Summenhäufigkeit der nächtlichen Kühlleistungen am Kollektor für die Nutzung Grossraumbüro. Wie im Einzelbüro findet der passive Kühlbetrieb über die Aussenflächen in den Nachtstunden zwischen 20 Uhr abends und 5 Uhr morgens statt. Erwartungsgemäss geht dabei die Kühlleistung bei gleichen Flächenverhältnissen durch die höhere Kühllast in den Zonen zurück, so dass in Zürich normal noch in 11% der Nachtstunden von Anfang April bis Ende September eine Kühlleistung grösser als 100 W/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub> und in 61% der Nachtstunden eine Kühlleistung grösser 50 W/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub> erreicht wird. Der Mittelwert der Kühlleistung liegt für die Nutzung Grossraumbüro bei 57 W/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub>

Im Extremklima Lugano warm reduzieren sich diese Häufigkeiten entsprechend aufgrund der wärmeren Aussenbedingungen. So werden Kühlleistungen über  $100 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  nur in 2% der Nachtstunden erreicht, Kühlleistungen über  $50 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  aber immerhin noch in 21% der Nachtstunden, so dass auch in diesem Extremklima mit ausreichend grosser Fläche noch hohe Deckungsanteile der passiven Kühlung erzielt werden können. Mittelwerte der nächtlichen Kühlleistung liegen bei  $33 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$ .

### 3.2.3. Einfamilienhaus

Für die Nutzung Wohnen erfolgt die Wärmeabfuhr aus dem Gebäude im Kühlbetrieb mit der vorhandenen Fussbodenheizung, die für den Heizbetrieb dimensioniert wurde. Im Wohngebäude sind die Lasten geringer als in den Bürozonen, so dass höhere Deckungsanteile des passiven Kühlbetriebs zu erwarten sind. Bei der vorgegebenen hohen Verschattung eines Gesamt-g-Wertes von 0.16 und der moderaten Verglasung im Wohngebäude (siehe Anhang 4), kann beim Wetterdatensatz "Zürich normal" ein Kühlbedarf durch konsequente Verschattung und Lüftung vermieden werden. Daher wurde für Zürich normal der Fall betrachtet, dass die Verschattung nicht konsequent betrieben wird, sondern nur auf einen Gesamt-g-Wert eines innenliegenden Sonnenschutzes von 0.4 verschattet wird.

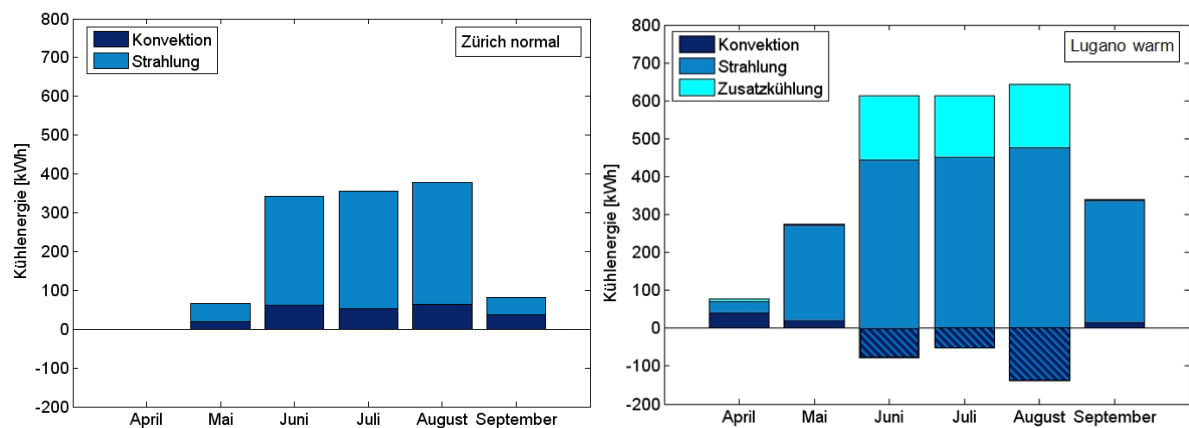


Abb. 33: Aufteilung der Kühlenergie und des Zusatzkühlanteils für die Nutzung Wohngebäude für den Wetterdatensatz Zürich Meteoschweiz normal (links) und Lugano warm (rechts)

Abb. 33 zeigt die Kühlenergie für "Zürich normal" (links) mit dieser reduzierten Verschattung eines Gesamt-g-Wertes von 0.4 und "Lugano warm" (rechts) mit der hoher Verschattung eines Gesamt-g-Wertes von 0.16. Aufgrund der noch niedrigen Aussentemperaturen wird im April in "Zürich normal" noch keine Kühlenergie benötigt.

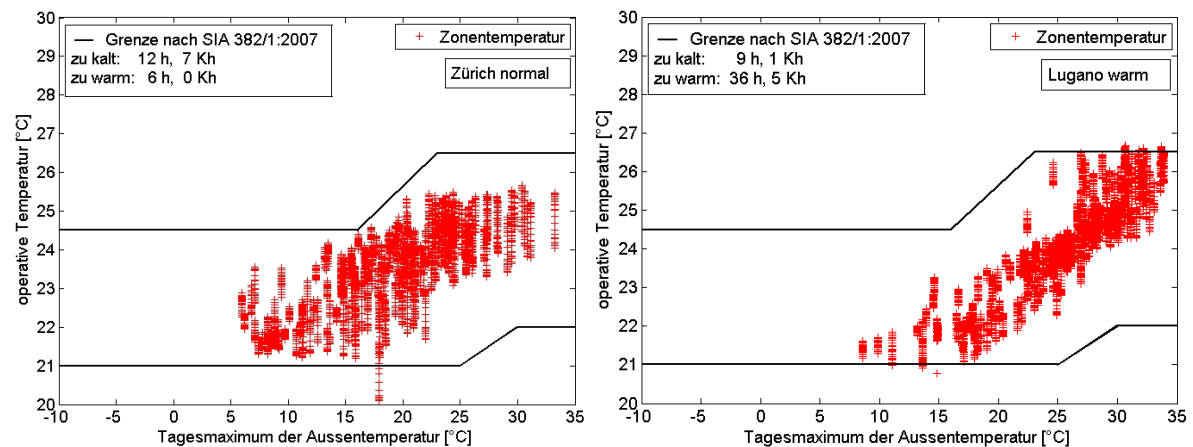
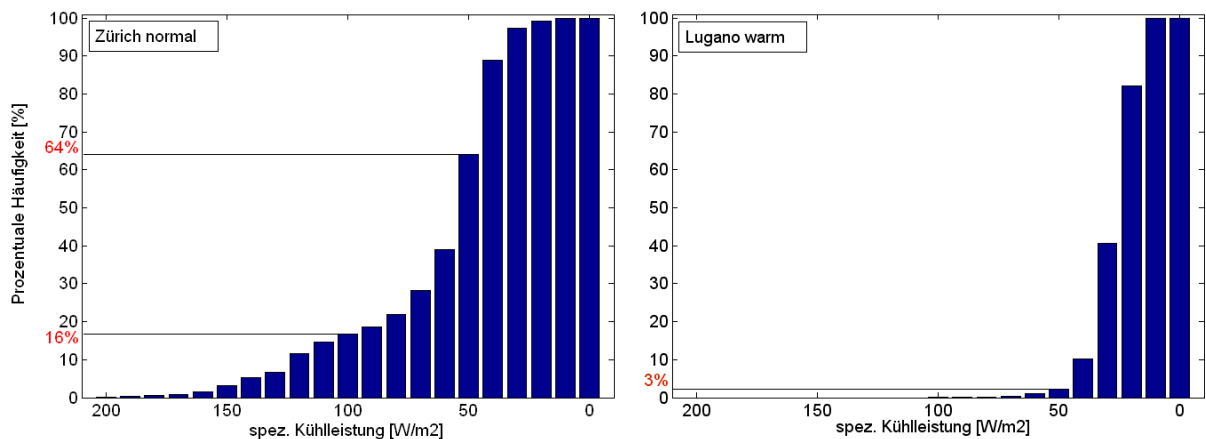


Abb. 34: Operative Temperatur während der Nutzungsstunden im Bereich nach SIA 382/1 für Zürich Meteoschweiz normal (links) und Lugano warm (rechts) für die Nutzung Wohngebäude

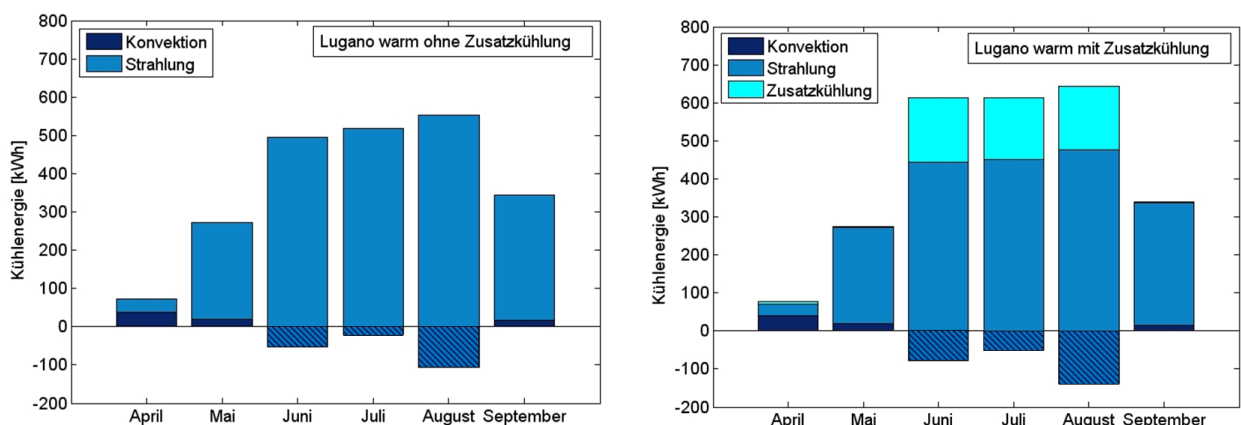
Auch bei der reduzierten Verschattung kann beim Wetterdatensatz "Zürich normal" aufgrund des geringen Verglasungsanteils im Vergleich zur Büronutzung der gesamte Kühlenergiebedarf der Sommerperiode zur Einhaltung des Temperaturbereichs nach SIA 382/1 (siehe Abb. 34 links) rein passiv über die Aussenfläche gedeckt werden, es wird keine Zusatzkühlenergie benötigt. Während des gesamten Sommers besteht Potenzial für konvektive Wärmeabgabe, wobei rund 20% über Konvektion abgeführt werden. Bei "Lugano warm" hingegen beruht die passive Kühlung im Wesentlichen auf der Abstrahlung, in den Sommermonaten Juni - August treten wie bei den anderen Nutzungen konvektive Gewinne auf. Die benötigte Zusatzkühlenergie, um den Temperaturbereich nach SIA 382/1 einzuhalten (siehe Abb. 34 rechts), fällt ebenfalls in den Monaten Juni bis August an und beträgt 23% der Gesamtkühlenergie.



**Abb. 35:** Häufigkeiten der Kühlleistung des Kollektors für Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) der Nutzung Wohngebäude

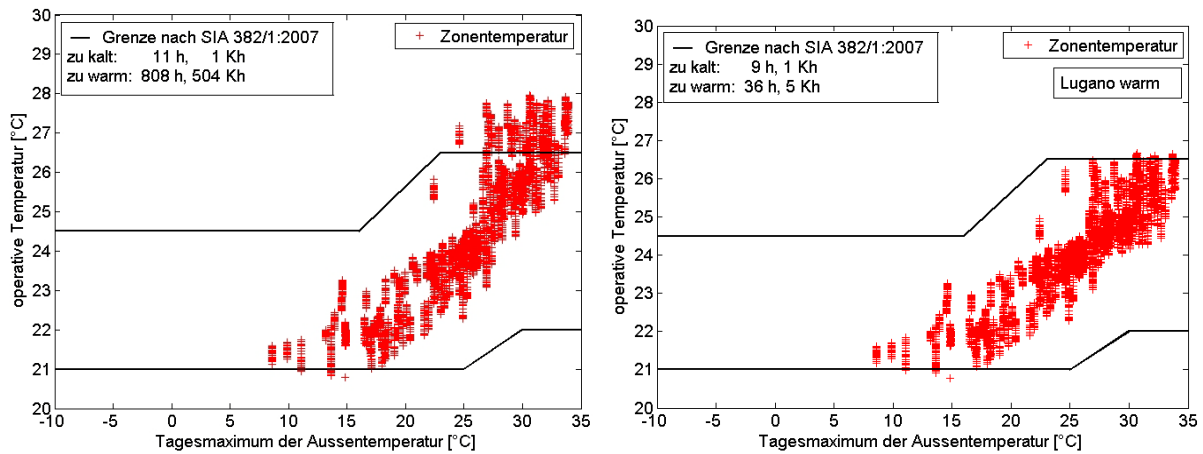
Abb. 35 zeigt die Häufigkeit der Kühlleistung für die Nutzung Wohngebäude. In "Zürich normal" (links) werden ähnlich hohe Kühlleistungen wie bei der Büronutzung erreicht werden, der Mittelwert liegt bei  $62 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$ . In "Lugano warm" (rechts) hingegen fällt der Hauptkühlbedarf im Sommer an, so dass sich die Kühlleistungen im Vergleich zur Büronutzung reduzieren. Die hohen Kühlleistungen, die im April und Mai erreicht werden, fallen durch die fehlende Kühllast weitgehend weg (siehe auch Abb. 38 rechts), so dass nur noch eine mittlere Kühlleistung von  $23 \text{ W/m}^2_{\text{koll.}}$  erreicht wird.

Zusätzlich wurde für den Extremwetterdatensatz "Lugano warm" betrachtet, welche Raumluftzustände ohne eine Zusatzkühlung erreicht werden können. In Abb. 36 sind zum Vergleich die Energieanteile für ein Einfamilienhaus ohne und mit Zusatzkühlenergie dargestellt.



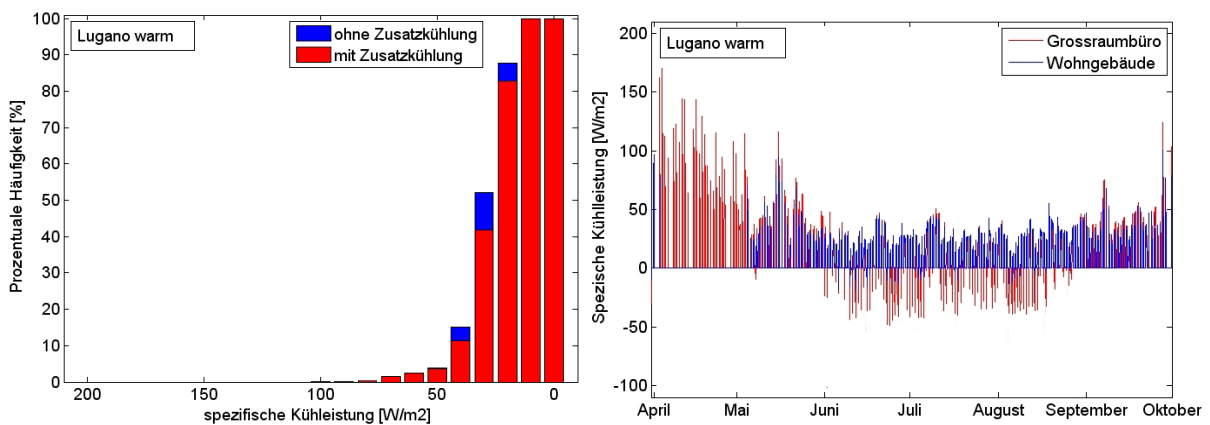
**Abb. 36:** Aufteilung der Kühlenergie für die Nutzung Einfamilienhaus für den Fall ohne Zusatzkühlenergie (links) und mit Zusatzkühlenergie (rechts) für "Lugano warm"

Abb. 37 zeigt die operative Temperatur ohne (links) und mit (rechts) Zusatzkühlung. Mit der Zusatzkühlung liegen die Temperaturen im nach SIA 382/1 definierten Temperaturbereich.



**Abb. 37:** Operative Temperaturen ohne (links) und mit Zusatzkühlenergie (rechts) für die Nutzung Wohngebäude für den Wetterdatensatz Lugano warm

Mit rein passiver Kühlung über Aussenflächen können die operativen Temperaturen auf 28°C limitiert werden, ohne zusätzlich Kühlenergie einsetzen zu müssen. Der Temperaturbereich nach SIA 382/1 wird während 808 h überschritten, wobei die Überschreitung fast ausschliesslich bei Tagesmaxima der Aussentemperatur über 25 °C liegen und mit höheren Aussentemperaturen zunehmen. Aufsummiert ergeben sich über die Sommerperiode Überhitzungskelvinstunden von 504 Kh bezogen auf den Bereich nach SIA 382/1. Wenn für Wohngebäude also die höheren Temperaturbedingungen von 28 °C nach SIA Merkblatt 2024 an Sommertagen (maximale Aussentemperatur > 25 °C) und Hitzetagen (maximale Aussentemperatur > 30 °C) toleriert werden, können Wohngebäude auch im Extremklima "Lugano warm" rein passiv über Aussenflächen gekühlt werden.

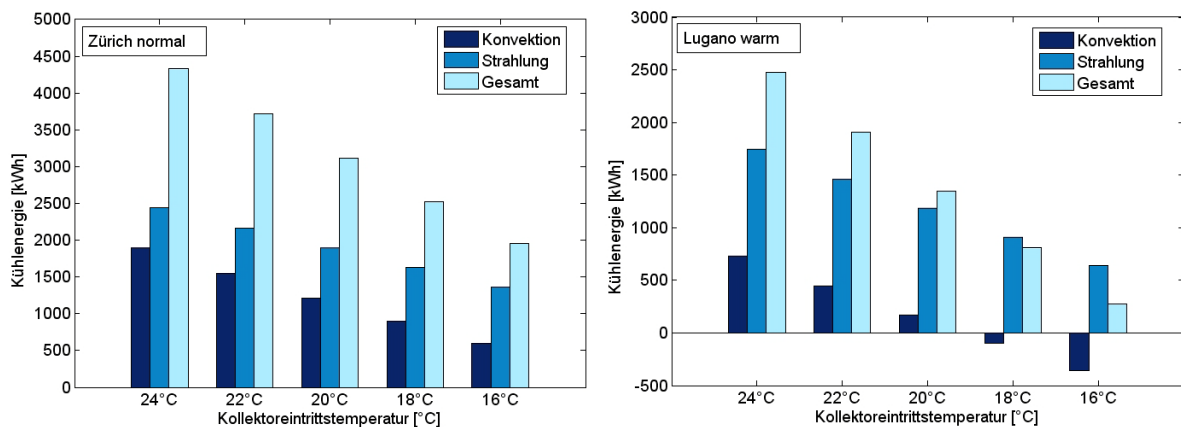


**Abb. 38:** Summenhäufigkeiten der spez. Kühlleistung für Lugano warm (links) und Vergleich der spez. Kühlleistung der Nutzung Einfamilienhaus und Grossraumbüro (rechts)

Abb. 38 zeigt die Summenhäufigkeit der spezifischen Kühlleistung des passiven Kühlbetriebs im Fall mit und ohne Zusatzkühlenergie. Im Fall ohne Zusatzkühlenergie ist die Kühlleistung etwas höher, da die Zonentemperaturen höher liegen (siehe Abb. 37) und daher der Kollektor auch bei etwas wärmeren Temperaturen betrieben wird. Auffällig ist die im Vergleich zur Büronutzung niedrigere Kühlleistung. Die Ursache dafür ist in Abb. 38 rechts dargestellt, in der die spezifischen Kühlleistungen im Wohngebäude und Grossraumbüro über das Sommerhalbjahr verglichen werden. Im Bürogebäude besteht das ganze Sommerhalbjahr Kühlbedarf, während im Wohngebäude bis Mitte Mai quasi noch kein Kühlbedarf besteht. Die hohen spezifischen Kühlleistungen werden im Extremsommer Lugano warm vor allem in der Übergangszeit erzielt, wenn die nächtlichen Wetterbedingungen noch moderat sind, insbesondere im April. Da im Wohngebäude kein Kühlbedarf besteht, zeigt die Häufigkeitsverteilung hauptsächlich die geringeren Kühlleistungen in den Sommermonaten Juni - August. Daher werden spez. Kühlleistung von  $50 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  nur in 3% der Nachtstunden überschritten.

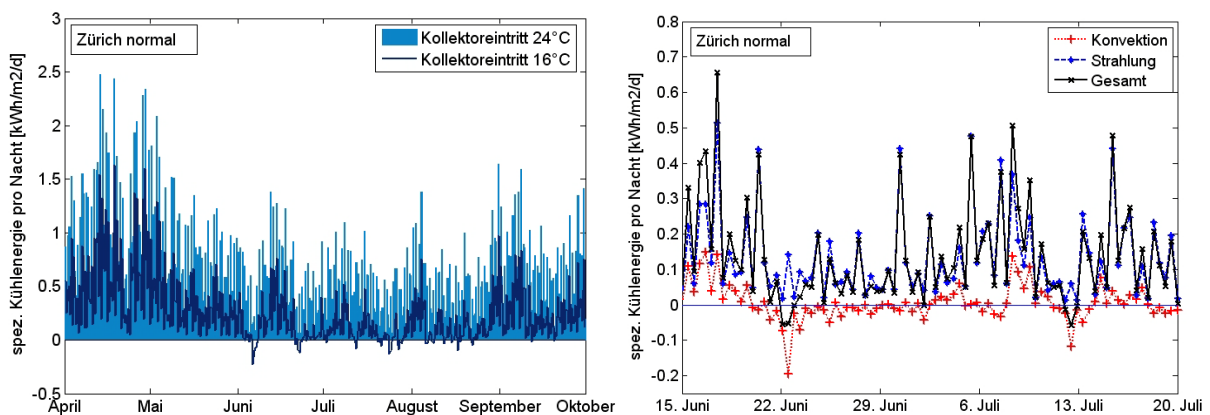
### 3.3. Vorlauftemperatur des Kühlsystems

Wie in Kapitel 2.4 gezeigt, hängt die Leistungsfähigkeit der passiven Kühlung über Aussenflächen wesentlich von der Kollektorbetriebstemperatur ab. Daher sind hohe Vorlauftemperaturen des Kühlsystems und damit hohe Kollektoreintrittstemperaturen anzustreben. Abb. 39 zeigt einen Vergleich der kumulierten Kühlenergie im Sommerhalbjahr in Abhängigkeit der Kollektoreintrittstemperatur. Die kumulierte Kühlenergie nimmt mit sinkender Vorlauftemperatur ab. In einem warmen Sommer im Tessin wirkt sich die Konvektion bei Kollektoreintrittstemperaturen unterhalb 18°C als Wärmegewinn über das Sommerhalbjahr aus, so dass die resultierende Gesamtwärmeabfuhr während der Nachtstunden niedriger als die Wärmeabgabe über Abstrahlung ist. Abb. 40 links zeigt die Kühlenergie pro Nacht für die beiden Kollektoreintrittstemperaturen 24 °C und 16 °C im Verlauf eines normalen Sommerhalbjahres im Mittelland. Auch bei dem gemässigten Klima im Mittelland erkennt man bei Kollektoreintrittstemperaturen von 16 °C eine gegenläufige Konvektion, so dass sich in einzelnen Nächten ein resultierender Wärmegewinn statt einer Wärmeabfuhr ergibt.



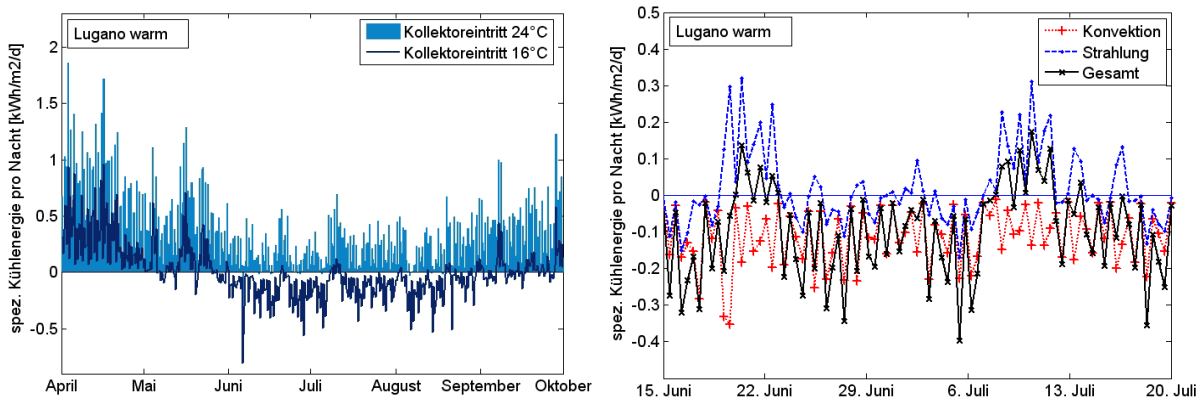
**Abb. 39:** Vergleich der Kühlenergie im Sommerhalbjahr für Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) für unterschiedliche Kollektoreintrittstemperaturen

In Abb. 40 rechts ist ein Zeitraum von 5 Wochen dargestellt, in dem die einzelnen Energieanteile von Konvektion und Strahlung und die Gesamtenergie dargestellt sind.



**Abb. 40:** Kühlenergie pro Nacht für Zürich normal im Sommerhalbjahr für Vorlauftemperaturen 24 °C und 16°C (links) und Ausschnitt der Kühlenergie und der Anteile für 5 Wochen im Juni/Juli bei Vorlauftemperatur 16 °C (rechts)

Die Konvektion liegt fast im gesamten Zeitraum im negativen Bereich, der konvektive Anteil wirkt also fast über den gesamten Zeitraum als Wärmegewinn, der die Gesamtkühlenergie vermindert. Allerdings ist der Strahlungsanteil ebenfalls fast im ganzen Zeitraum grösser als der konvektive Anteil, so dass sich insgesamt eine, wenn auch reduzierte Wärmeabfuhr ergibt.



**Abb. 41:** *Kühlenergie pro Nacht für Lugano warm im Sommerhalbjahr für Vorlauftemperaturen 24°C und 16°C (links) und Ausschnitt der Kühlenergie und der Anteile für 5 Wochen im Juni/Juli bei Vorlauftemperatur 16°C (rechts)*

Abb. 41 zeigt dieselbe Situation für einen Extremsommer "Lugano warm". Hier kann bei Kollektoreintrittstemperaturen von 24 °C fast noch das gesamten Sommerhalbjahr gekühlt werden, während bei einer Kollektoreintrittstemperatur von 16 °C die konvektiven Gewinne die Strahlungsverluste im Hochsommer zwischen Juni und August dominieren und sich auch nachts gesamthaft häufig eine Wärmezufuhr anstatt einer Wärmeabfuhr ergibt. Abb. 41 rechts verdeutlicht anhand der Darstellung des 5-wöchigen Ausschnitts, dass Situationen mit bewölktem Himmel auftreten, an denen sogar auch Wärmestrahlungsgewinne bestehen. In der Übergangszeit der Monate April, Mai und September kann hingegen auch im Extremsommer bei niedrigen Vorlauftemperaturen von 16 °C noch gekühlt werden.

### 3.4. Parametervariation für die Nutzung Einzelbüro

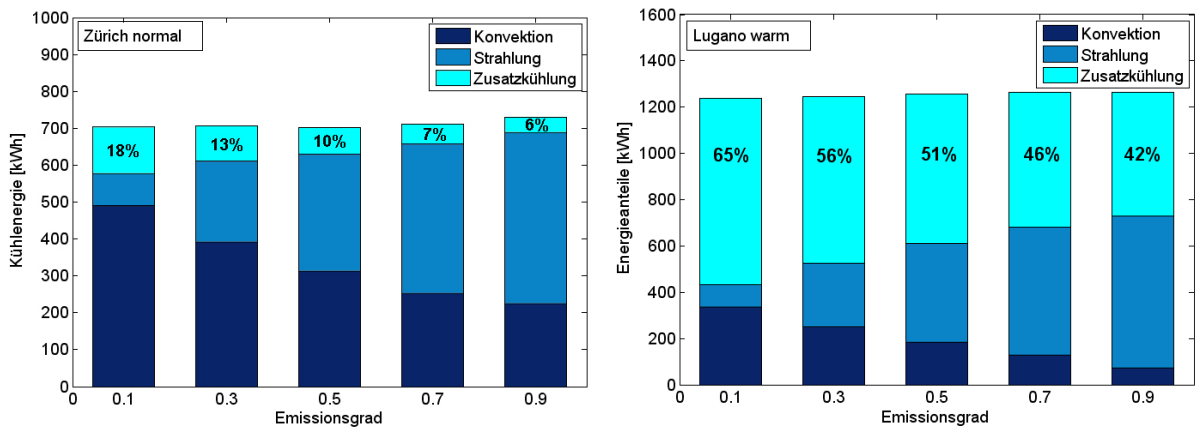
Um die Deckungsanteile der aktivierten Aussenfläche beurteilen zu können, wurden Variationen für die Nutzung Einzelbüro hinsichtlich Eigenschaften und Betriebsparametern durchgeführt. Tab. 13 gibt einen Überblick über die Referenzbedingungen und Variationen hinsichtlich Flächeneigenschaften, Nutzung und hydraulischer Anbindung. Unter Referenzbedingungen beträgt der Zusatzkühlenergieanteil für die Wetterdaten "Zürich normal" 6% und für "Lugano warm" 42%.

**Tab. 13:** *Übersicht Parametervariationen für die Kühlenergie im Sommerhalbjahr*

Referenzbedingungen für Parametervariation mit Nutzung Einzelbüro		
Grösse	Referenzwert	Variation
Simulationszeitraum	1. April (Tag 91) - 30. Sept. (Tag 273)	-
Anbindung	Mit Wärmetauscher	Direkte Anbindung an Kollektor
Wetterdaten (SIA 2028)	Zürich MeteoSchweiz normal	Lugano warm
Flächenverhältnis	2 m <sup>2</sup> <sub>Zone</sub> / m <sup>2</sup> <sub>Koll.</sub>	2..10 m <sup>2</sup> <sub>Zone</sub> / m <sup>2</sup> <sub>Koll.</sub>
Kollektoreintritt	Zonenaustritt	16 °C - 24 °C
Massenstrom	50 kg/m <sup>2</sup> /h	10 kg/m <sup>2</sup> /h - 120 kg/m <sup>2</sup> /h
Kollektorneigung	30°	0° - 90°
Emissionsgrad	0.9	0.1 - 0.9

### 3.5. Emissionsgrad

Wie aus Gl.5 ersichtlich ist, geht der Emissionsgrad linear in den Strahlungsanteil der Wärmeabgabe ein. Wie in Kap. 2.1 gezeigt, steigt bei sinkendem Emissionsgrad die konvektive Kühlleistung, da sich die Betriebstemperaturen erhöhen.



**Abb. 42:** Aufteilung der Kühlenergie und des Zusatzkühlanteils für eine Variation des Emissionsgrad für den Wetterdatensatz "Zürich MeteoSchiweiz" normal (links) und "Lugano warm" (rechts)

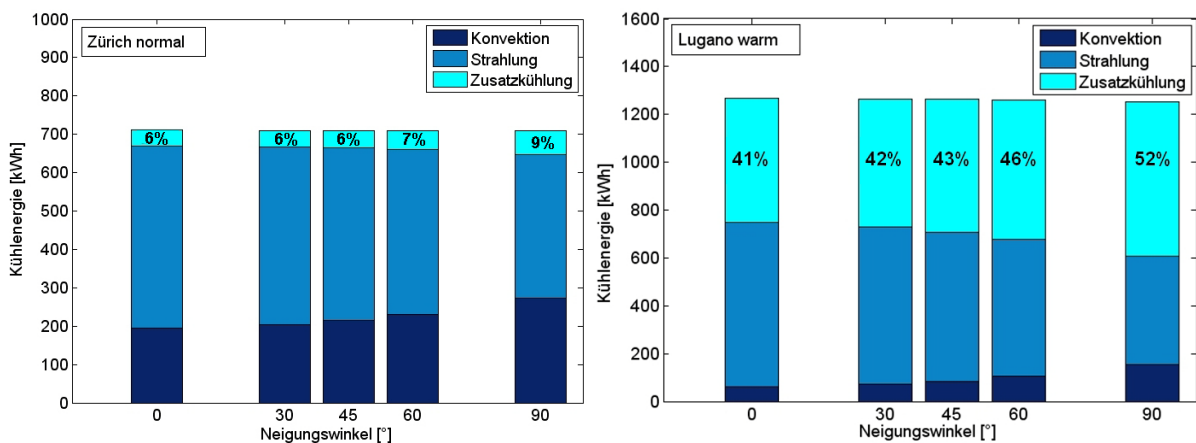
Im Fall der Wetterdaten Zürich normal beispielsweise liegt die mittlere Kollektortemperatur mit Emissionsgrad 0.1 um ca. 2°K höher als beim Emissionsgrad 0.9.

Aufgrund der gesamthaft sinkenden Kühlleistung steigt aber der Anteil der Zusatzkühlenergie mit sinkendem Emissionsgrad, für die Wetterdaten Zürich normal von 6% bei einem Emissionsgrad von 0.9 auf 18% bei einem Emissionsgrad von 0.1. Kleinere Abweichungen von einem günstigen Emissionsgrad von 0.9 wirken sich noch nicht so stark auf die Zusatzkühlenergie aus, aber bei grösseren Abweichungen kann die fehlende Abstrahlung nicht mehr durch ansteigende Konvektion kompensiert werden.

Noch deutlicher zeigt sich dieser Einfluss bei wärmeren Aussentemperaturbedingungen im Extremsommer Lugano warm, bei dem der Konvektionsanteil durch hohe Aussentemperaturen ohnehin gering ist. Hier wirkt sich die Reduktion der Abstrahlung deutlich auf die Zusatzkühlenergie aus, da die Konvektion die verminderte Abstrahlung kaum zu kompensieren vermag.

### 3.6. Neigung der Fläche

Die Auswertung des Einflusses der Flächenneigung erfolgt unter der Annahme, dass der Kollektor nur mit der Himmelstemperatur oder Aussentemperatur im Austausch steht und keine Flächen mit Temperaturen über derjenigen der Aussentluft im Sichtfeld des Kollektors liegen.

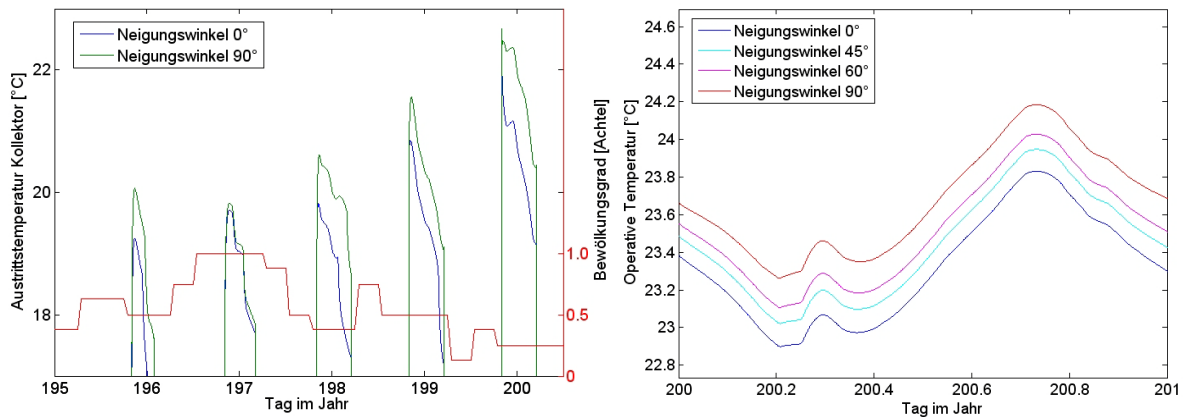


**Abb. 43:** Aufteilung der Kühlenergie und des Zusatzkühlanteils für eine Variation der Kollektorneigung für den Wetterdatensatz Zürich Meteoschiweiz normal (links) und Lugano warm (rechts)

Abb. 25 zeigt die Variation des Neigungswinkels der Fläche von horizontaler auf vertikale Ausrichtung für die Wetterdaten Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) bei der Nutzung Einzelbüro. In beiden Fällen zeigt sich am Abfall des Strahlungsanteils die Verknüpfung über den Kosinus des Neigungswinkels (siehe Kap. 1.10.1), so dass bis 45° in Zürich bei normalem Klima kaum ein Anstieg der Zusatzkühlung festzustellen ist, und auch in Lugano warm der Anteil nur moderat von 41% auf 43% steigt. In Lugano vergrößert sich der Anstieg aber durch die grösseren Temperaturdifferenzen zum Himmel und geringere Konvektion durch warme Aussenlufttemperaturen auf 52% bei senkrechter Flächenausrichtung, während sich der Einfluss in Zürich mit einem Anstieg auf 9% in Grenzen hält, da mehr von der radiativen Kühlleistungsverminderung durch Steigerung der konvektiven Anteils kompensiert wird.

Die Abhängigkeit des Neigungswinkeleinflusses von der Temperaturdifferenz zwischen Himmelstemperatur und Aussenlufttemperatur, die massgeblich vom Bewölkungsgrad beeinflusst wird, ist in Abb. 44 dargestellt.

Bei klarem Himmel stellen sich deutlich tiefere Himmels- als Aussenlufttemperaturen ein und der Strahlungsanteil dominiert. Die Kühlleistung des Kollektors ist also abhängig von der Einstrahlzahl und dadurch von der Kollektorneigung. Bei hohem Bewölkungsgrad, also stark bewölktem Himmel, besteht hingegen nur ein geringer Unterschied zwischen Aussenlufttemperatur und Himmelstemperatur, womit sich der Einfluss der Einstrahlzahl stark reduziert, an bewölkten Tagen ist daher kaum ein Einfluss durch die Kollektorneigung erkennbar.



**Abb. 44:** Kollektoraustrittstemperaturen für die Kollektorneigung 0° und 90° in Abhängigkeit des Bewölkungsgrades (links) und Vergleich der operativen Zonentemperaturen für unterschiedliche Kollektorneigungen an einem Tag mit niedrigem Bewölkungsgrad (rechts)

Abb. 44 links zeigt dies deutlich: Aufgetragen sind die Kollektoraustrittstemperaturen bei einem Neigungswinkel von 0° und von 90° Anfang Juli (Nacht 195 - 200). Erwartungsgemäss besteht in einer Nacht mit vollständig bedeckten Himmel bzw. hohem Bewölkungsgrad von 1 wie der Nacht 197 kaum ein Unterschied in der Kollektoraustrittstemperatur zwischen den beiden Neigungswinkeln. Für die folgenden Tage mit abnehmenden Bewölkungsgraden hingegen steigt die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Orientierungssituationen auf bis zu 1 K bei Bewölkungsgrad 0.25 in der Nacht 200.

Abb. 44 rechts zeigt einen Vergleich der operativen Zonentemperaturen in einer Nacht mit niedrigem Bewölkungsgrad für unterschiedliche Kollektorneigungen. Man erkennt, dass hier die Kollektorneigung einen Einfluss von 0.5 K Differenz ausmacht. Während bis zu einer Änderung von 0° auf 45° nur moderate Differenzen von ca. 0.15 K auftreten, steigt der Einfluss der Ausrichtung mit zunehmendem Neigungswinkel auf ca. 0.5 K.

### 3.7. Massenstrom

Der Massenstrom stellt den einzigen Parameter dar, mit dem die mittlere Kollektortemperatur und damit die Betriebsbedingungen der Aussenfläche beeinflusst werden kann.

In der vorliegenden Konfiguration mit hohen Rücklauftemperaturen aus den TABS der Zonen zeigt eine Variation des Massenstroms nur einen relativ geringen Einfluss auf die Deckungsanteile der passiven Kühlung bzw. den Anteil an benötigter Zusatzkühlenergie.

Abb. 45 links zeigt den Massenstromeinfluss für den Wetterdatensatz Zürich normal. Nur bei Absenkung des Massenstrom auf sehr geringe 10 kg/m<sup>2</sup>/h steigt der Zusatzkühlanteil auf von 6% auf 7%, für die anderen Variation ist die Änderung so gering, dass sie sich erst in der dritten Nachkommastelle äussert.

In Abb. 45 rechts beim Wetterdatensatz Lugano warm ist der Einfluss ebenfalls begrenzt. Bei höherem Massenstrom steigen die Deckungsanteile des passiven Kühlbetriebs, der Zusatzkühlenergieanteil reduziert sich von 44% auf 41%, wenn der Massenstrom von 10 kg/m<sup>2</sup>/h auf 120 kg/m<sup>2</sup>/h angehoben wird. Während der Zusatzkühlanteil zunächst schneller sinkt, da die mittlere Kollektortemperatur bei Zunahme des Massenstromes anfangs stärker ansteigt, fällt er ab einem Massenstrom von 70 kg/m<sup>2</sup>/h nicht mehr, da die Temperaturspreizung über den Kollektor nur noch wenig ändert (siehe auch Abb. 20). Bei hohen Rücklauftemperaturen aus der Zone und Einbindung über Wärmetauscher wie in der hier vorliegenden Konfiguration reduziert also ein hoher Massenstrom die erforderliche Zusatzkühlenergie, allerdings ändert sich ab einem Grenzwert die Zusatzkühlenergie nicht mehr.

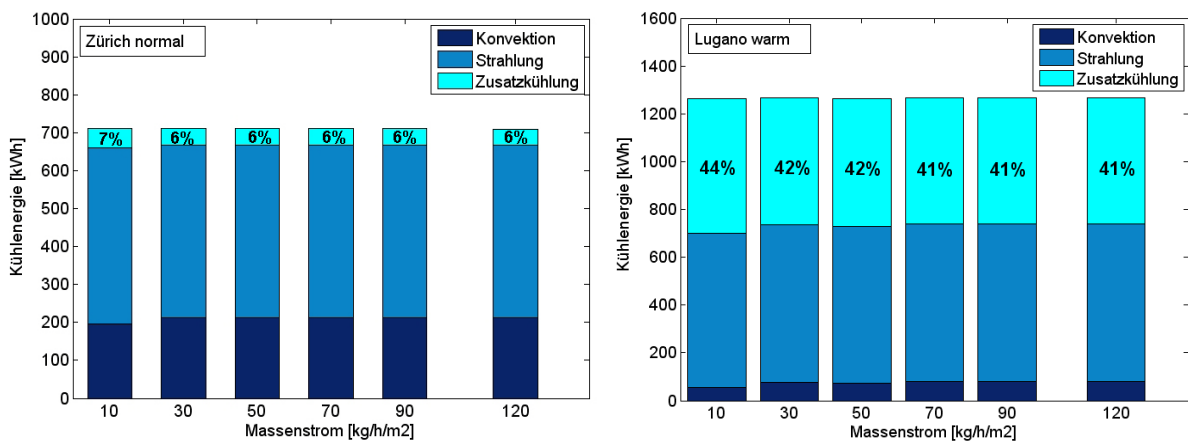
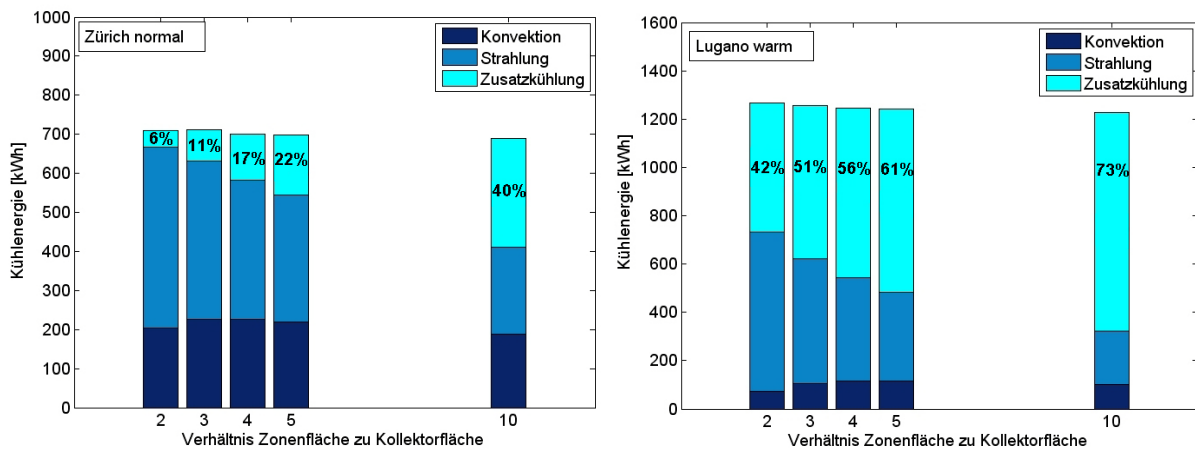


Abb. 45: Aufteilung der Kühlenergie und des Zusatzkühlanteils für eine Variation des Massenstroms für den Wetterdatensatz "ZürichMeteoschweiz normal" (links) und "Lugano warm" (rechts)

### 3.8. Einfluss der Kühllast

Der Einfluss der Kühllast wird über das Flächenverhältnis aus Zonenfläche und Kollektorfläche variiert. Mit erhöhter Kühllast ist eine Erhöhung der Zusatzkühlenergie zu erwarten, da die Kühlleistung des Kollektors immer geringere Anteile der Kühllast decken kann. Damit können mit Variationen des Flächenverhältnisse die Einsatzgrenzen für den Kollektorbetrieb ermittelt werden. Hier ist das Flächenverhältnis über Verkleinerung der Kollektorfläche variiert worden.

Das Flächenverhältnis kann auch als Geschosszahl des Gebäudes interpretiert werden, wenn davon ausgegangen wird, dass die gesamte Dachfläche zur Kühlung genutzt wird. So gibt das Flächenverhältnis Auskunft über die Gebäudetypen, für welche die passive Kühlung über Aussenflächen eine geeignete Systemlösung darstellt bzw. wo die Einsatzgrenzen dieser Systemlösung liegen. Abb. 46 links zeigt den Einfluss einer vergrößerten Kühllast für das Mittelland anhand der Wetterdaten "Zürich normal". Bei Verringerung der Kollektorflächen geht die Wärmeabgabe über Strahlung zurück, der konvektive Anteil bleibt hingegen relativ konstant. Auch bei sinkender Fläche und damit höherer Kühllast pro Kollektorfläche werden bei moderatem Klima noch recht hohe Deckungsanteile des passiven Kühlung über den Kollektor erreicht. Bei einer Erhöhung des Flächenverhältnisses von 2 auf 10 steigt der Zusatzkühlanteil von 6% auf 40%.



**Abb. 46:** Aufteilung der Kühlenergie und des Zusatzkühlanteils für eine Variation des Verhältnisses Zonenfläche/Kollektorfläche für den Wetterdatensatz Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts)

In Abb. 46 rechts ist die Entwicklung für den Extremsommer Lugano warm dargestellt, wo der Zusatzkühlanteil von 42% bei einem Flächenverhältnis von 2 auf 73% bei einem Flächenverhältnis von 10 steigt. Der Deckungsanteil der passiven Kühlung im Extremklima Lugano warm sinkt relativ schnell auf niedrige Werte, da bereits bei doppelter Zonenfläche aufgrund von Hitzeperioden ein geringer Deckungsanteil von ca. 60% erreicht wird.

Hinsichtlich der Einsatzgrenzen lässt sich also ableiten, dass niedrige Gebäude mit einem günstigen Verhältnis aus Zonenflächen zu Dachfläche hohe Deckungsgrade erreichen, und für normale Jahre im Mittelland auch höhere Gebäude noch einen Grossteil des Kühlbedarfs über den Betrieb des passiven Systems abführen können. In extremen Sommern, repräsentiert durch das Klima "Lugano warm", beschränken sich hohe Deckungsanteile des passiven Kühlsystems allerdings auf niedrigere Flächenverhältnisse.

### 3.9. Hydraulische Einbindung der Aussenflächen

In diesem Kapitel wird die hydraulische Einbindung der Aussenfläche ins System betrachtet. Dabei hat eine direkte Einbindung hinsichtlich der Eigenschaften des einsetzbaren Wärmeträgermediums Wasser und des nutzbaren Temperaturniveaus Vorteile. Allerdings kann ein Betrieb unter der Frostgrenze den Einsatz von Frostschutz notwendig machen, was eine Einbindung mit einer Medientrennung über einen Wärmetauscher erfordert. Im Folgenden werden die Deckungsanteile in Abhängigkeit der hydraulischen Einbindung diskutiert.

#### 3.9.1. Indirekte hydraulische Einbindung über Wärmetauscher

Vorteil einer indirekten Anbindung über einen Wärmetauscher ist eine längere Betriebszeit, da mit einem Wasser-Glykol-Gemisch im Solarkreis auch ein Betrieb bei Temperaturen unterhalb der Frostgrenze ermöglicht wird. Insbesondere bei Nutzung der Aussenfläche zur Wärmeaufnahme/-abfuhr kann auch ein Winterbetrieb interessant sein. Allerdings bestehen die folgenden Nachteile einer hydraulischen Einbindung über einen Wärmetauscher:

- Notwendige Grädigkeit zur Wärmeübertragung
- Schlechtere thermodynamische Eigenschaften des Frostschutzgemisches im Kollektorkreis (Wärmekapazität, Viskosität)
- Allfällige höhere Kosten für hydraulische Komponenten (Wärmetauscher, Sekundärpumpe)

Aufgrund der Grädigkeit ist eine Minderung der Deckungsanteile der passiven Kühlung bei einer Einbindung über einen Wärmetauscher zu erwarten. Abb. 47 links zeigt den Einfluss

der Grädigkeit für das Sommerklima "Zürich normal". Im Referenzfall liegt die Grädigkeit hier bei 3.5 K. Durch den ohnehin geringen Zusatzkühlenergiebedarf und durch die kühleren Nachttemperaturen ist der Einfluss der Grädigkeit nicht sehr ausgeprägt. Abb. 47 rechts zeigt den Einfluss der Grädigkeit bei den Extremwetterdaten "Lugano warm". Mit einer mittleren Grädigkeit im Referenzfall von 1.5 K wird der Zusatzkühlenergieanteil von 42% erreicht. Mit wachsender Grädigkeit steigt hier der Zusatzkühlanteil stärker an, so dass bei einer Grädigkeit von 3.5 K bereits ein Anteil von 59% erreicht wird. Bei dieser mittleren Grädigkeit sinkt die Kollektortemperatur soweit ab, dass die konvektiven Gewinne im Extremsommer "Lugano warm" über das Sommerhalbjahr kumuliert die konvektiven Verluste übertreffen, was in Abb. 47 rechts als negative Kühlenergie dargestellt ist. Eine niedrige Grädigkeit bewirkt höhere Eintrittstemperaturen in den Kollektor und damit höhere Kühlleistungen und niedrigere Zusatzkühlenergie.

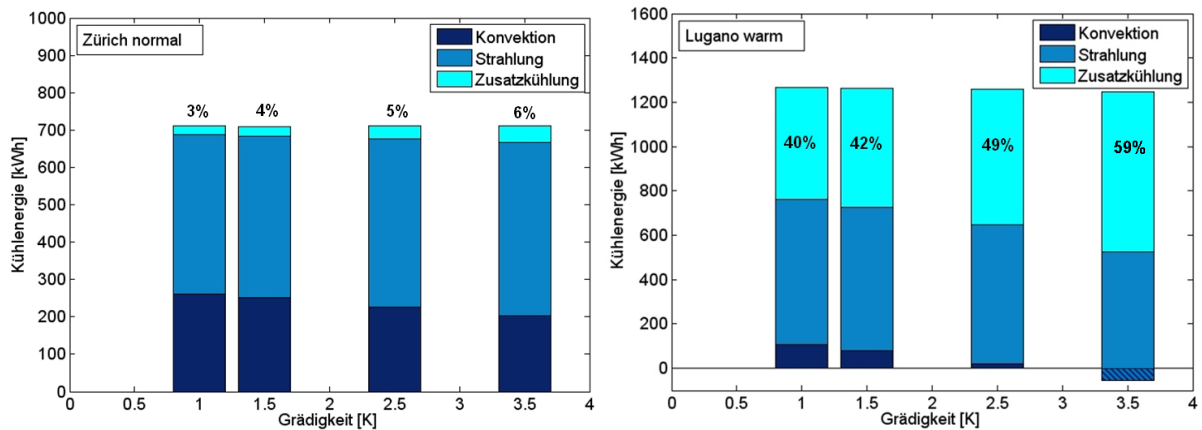


Abb. 47: Einfluss der Grädigkeit auf Zusatzkühlanteile

### 3.9.2. Hydraulische Einbindung ohne Wärmetauscher

Eine Anbindung der Aussenfläche an das Übergabesystem im Innenraum ohne Wärmetauscher vermeidet die Nachteile einer Medientrennung, allerdings ist die Betriebszeit bei Betrieb des Solarkreises mit Wasser auf Zeiten oberhalb der Frostgrenze beschränkt, was einen Einsatz des Systems für Kühlanforderungen im Winter und eine Nutzung für Heizanwendungen einschränkt. In Abb. 48 ist der Vergleich einer direkten Einbindung des Kollektors (links) mit der indirekten Einbindung über Wärmetauscher (rechts) für den Extremsommer "Lugano warm" für die sechs Sommermonate April-September dargestellt. Durch eine direkte Anbindung und damit besser mögliche Ausnutzung des Temperaturniveaus des Kollektoraustritts kann der Anteil an Zusatzkühlenergie von 42% auf 30% reduziert werden.

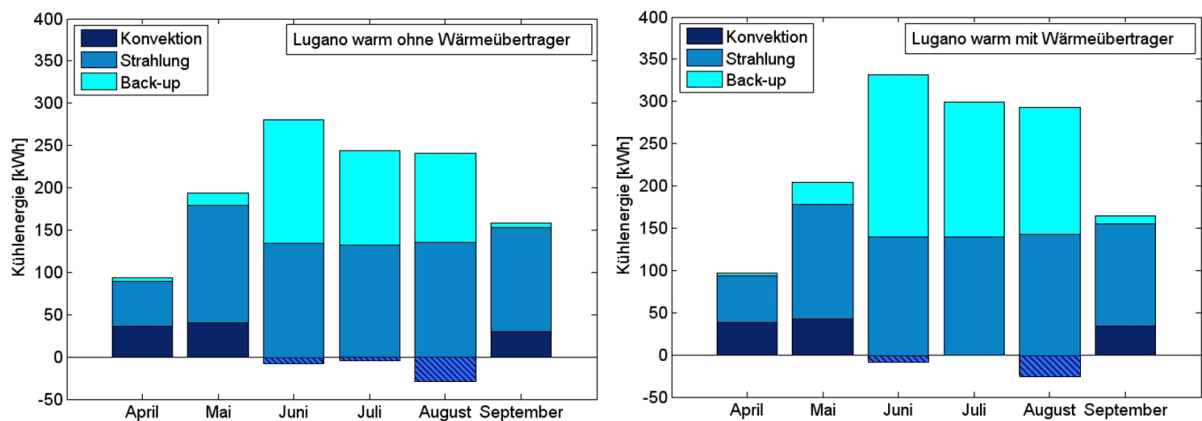


Abb. 48: Vergleich der Energieanteile Lugano warm für eine direkte Einbindung der Aussenfläche (links) und eine Einbindung über Wärmetauscher (rechts)

## 4. Potenzialbewertung

Der Aufwand für die passive Kühlung entsteht einzig durch die Energieaufnahme für den Transport des zirkulierenden Wärmeträgers sowie für deren Steuerung. Die Nutzenergie zur Raumkühlung in Form der abgeführten Wärme ergibt sich aus den Temperaturbedingungen sowie der Dauer der Kopplung. Die Raumtemperatur wird nicht nur von der Kühlung, sondern auch von weiteren Faktoren beeinflusst, wie Verschattung, interne Lasten, Lüftung und Baumasse, so dass der Kühlnutzen nur in einer gesamthafter Betrachtung des Gebäudes quantifiziert werden kann. Es besteht daher kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Kühlnutzen und dem dafür notwendigen Aufwand. Daher erfolgt die Bestimmung des Nutzungsgrades hier durch Auswertung von Deckungsanteilen, die der passive Kühlobetrieb und eine konventionellen Zusatzkühlung erreichen, um die Raumtemperaturen im Bereich der in der SIA 382/1 definierten Temperaturgrenzen zu halten (vgl. Kapitel 1.3.2).

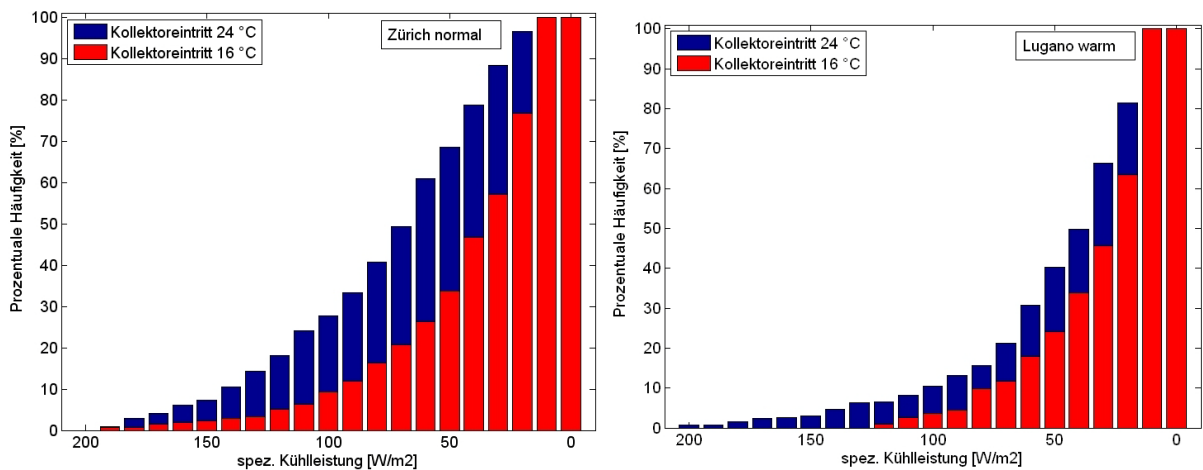
### 4.1. Erreichbare Kühlleistungen

Anders als bei alternativen passiven Kühlverfahren wie etwa einer Kühlung über das Erdreich hängt die erreichbare Kühlleistung stark von den aktuellen Umgebungsbedingungen ab, die zusätzlich noch einen ausgeprägten Tagesgang aufweisen. Es kann daher auch keine garantierte Kühlleistung angegeben werden, da im Extremfall ungünstiger Aussenbedingungen kein Potenzial besteht. Im Folgenden wird trotzdem eine Auswertung der erreichbaren Kühlleistung mit der passiven Kühlleistung über Aussenflächen für die Referenzsysteme und Standorte gegeben, um die zu erwartende Kühlleistung unter Standardwetterbedingungen des Standorts zu verdeutlichen.

Abb. 49 zeigt zusammenfassend die kumulierten Häufigkeiten der nächtlichen Kühlleistung für die Standorte Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts) und Eintrittstemperaturen in den Kollektor von 24 °C (obere Grenze bei Betrieb mit TABS) und 16 °C (Anwendung Kühldecken). Zum Einen wird die Standortabhängigkeit deutlich. Je niedriger und damit günstiger die nächtlichen Aussentemperaturen sind, desto flacher verläuft die Häufigkeit. In Zürich werden bei einer Eintrittstemperatur von 24 °C in ca. 70% der Nächte Kühlleistung über  $50 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  mit einer mittleren Leistung über das Sommerhalbjahr von ca.  $75 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  erreicht. Bei einer Kollektoreintrittstemperatur von 16 °C halbiert sich die Häufigkeit auf ca. 35% und die mittlere Leistung auf ca.  $40 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$ . Bei 24 °C Eintrittstemperatur werden Spitzenwerte über  $100 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  in 30%, bei 16 °C nur noch in 10% der Nachtstunden erreicht.

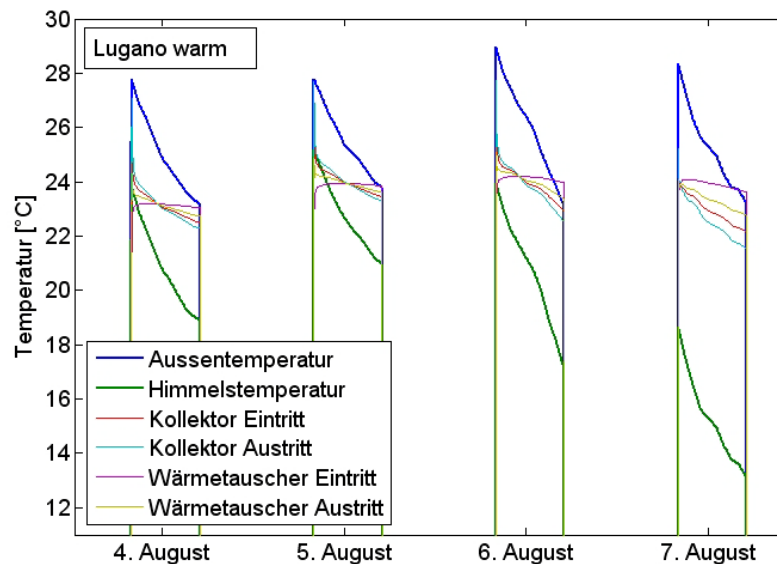
Bei den extremeren Sommerverhältnissen des Wetterdatensatzes "Lugano warm" werden bei konstanter Eintrittstemperatur von 24 °C noch in ca. 40% der Nachtstunden Kühlleistungen von  $50 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  erreicht, da hier Hitzeperioden mit hohen nächtlichen Aussenlufttemperaturen konvektive Gewinne verursachen, die die Kühlleistung vermindern. Bei tiefen Eintrittstemperaturen steigt dieser Einfluss und die Häufigkeit reduziert sich auf 25%. Die mittlere nächtliche Abgabeleistung beträgt bei 24 °C ca.  $45 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$ , bei 16 °C noch ca.  $30 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$ . Spitzenwerte über  $100 \text{ W/m}^2_{\text{koll}}$  werden bei 24 °C noch in 10% der Fälle, bei 16 °C nur noch in 4% der Fälle überschritten.

Zusätzlich zu der Leistungseinschränkung kann unter warmen Klimarandbedingungen auch die Austrittstemperatur aus dem Kollektor beschränkt sein, da hier, insbesondere bei Wind, Konvektionsgewinne bei hohen Aussenlufttemperaturen entstehen können, die der Wärmeabgabe über Strahlung entgegenwirken können. Bei zunehmend sinkender Abkühlung im Kollektor wachsen auch die konvektiven Gewinne, so dass keine weitere Abkühlung mehr erfolgt. Mit fortschreitenden Nachtstunden sinkt allerdings gewöhnlich auch die Aussenlufttemperatur, so dass die Gegenläufigkeiten vor allem in den Abendstunden kritisch sind, wenn aber die Kollektoreintrittstemperaturen ebenfalls noch hoch sind.



**Abb. 49:** *Summenhäufigkeit der spezifischen Kühlleistung im Sommerhalbjahr für Kollektoreintrittstemperaturen 24 °C und 16 °C in Zürich normal (links) und Lugano warm (rechts)*

Beispielhaft sind Temperaturgänge mit konvektiven Gewinnen in Abb. 50 für den Sommer "Lugano warm" dargestellt. Die Aussentemperatur beträgt zu Beginn der Nächte noch ca. 28 °C und fällt während der Nächte auf ca. 24 °C. Die Rücklauftemperaturen aus den Zonen liegen zu Beginn der Nacht zwischen 23 °C und 24 °C. Abhängig von der Himmelstemperatur, die in den ersten drei Nächten nur ca. 4 K unter der Aussentemperatur liegt, steigt zunächst die Austrittstemperatur aus dem Wärmetauscher, da der Kollektor auf wärmeren Temperaturen betrieben wird. Erst mit Absinken der Temperatur gegen Mitternacht sinkt die Himmelstemperatur und die Zonenvorlauftemperatur sinkt unter die Zonenrücklauftemperatur. In der Nacht zum 7. August liegt klarerer Himmel vor, so dass die Himmelstemperatur ca. 10 K unter der Aussentemperatur liegt und damit die ganze Nacht effektiv gekühlt werden kann.

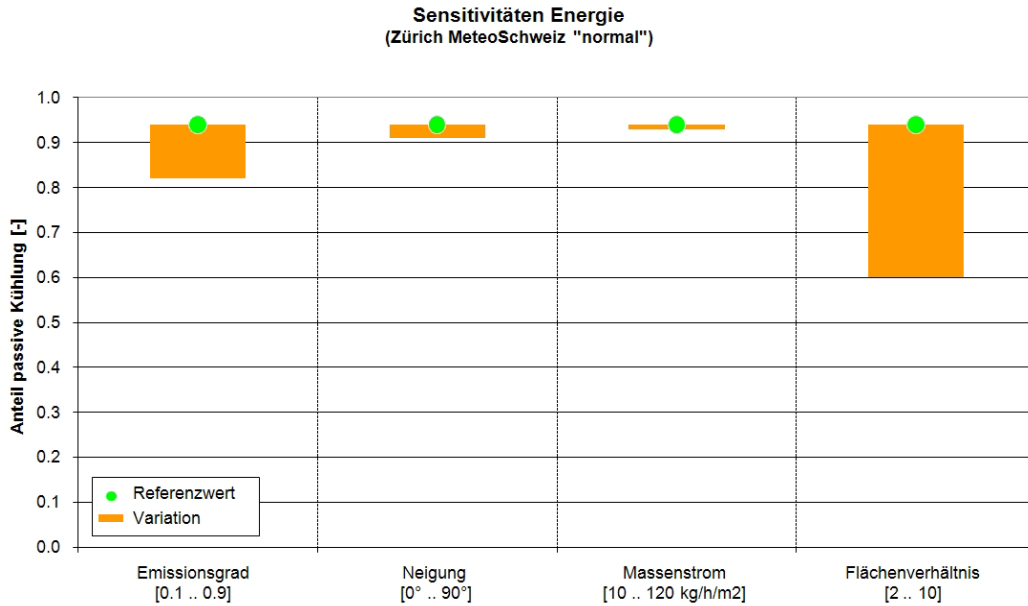


**Abb. 50:** *Temperaturgang am Kollektor mit konvektiven Gewinnen*

## 4.2. Deckungsanteile passive Kühlung

Die über aktivierte Aussenflächen übertragbare Kühlleistung liegt nach den Parametervariationen in Kap. 2 und Kap. 3 für normale Jahre im Schweizer Mittelland im Bereich von 50-100 W/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub>. Während der Nachtstunden von 20 Uhr bis 6 Uhr lassen sich damit ca. 500-1000 Wh/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub> Wärme aus dem Gebäude abführen. Welche Nettogeschossfläche damit gekühlt werden kann, ist massgeblich von den anfallenden Wärmelasten abhängig, bei 190

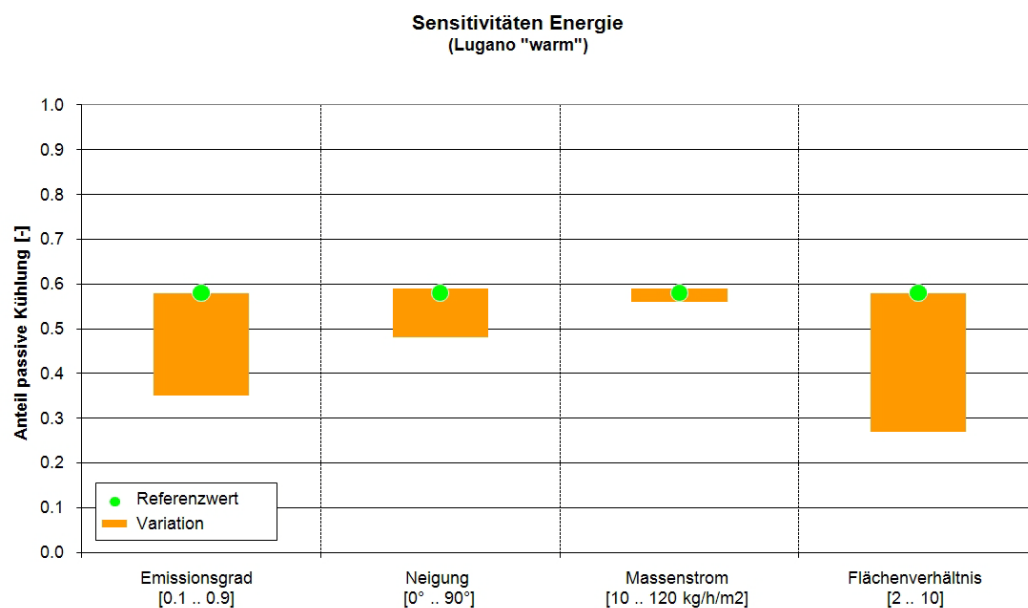
Wh/d im Grossraumbüro ergeben sich Flächenverhältnisse von 3-5 mit moderatem Zusatzkühlenergieanteil, was den Ergebnissen in Kap. 3.8 entspricht. Eine Übersicht der sich für die Nutzung Einzelbüro ergebenden Deckungsanteile der passiven Kühlung und der Sensitivitäten aus den Parametervariationen sind für die Wetterverhältnisse im Mittelland nach "Zürich normal" in Abb. 51 und für den Extremsommer "Lugano warm" in Abb. 52 zusammengestellt.



**Abb. 51:** Deckungsanteil der passiven Kühlung und Sensitivitäten für Zürich MeteoSchweiz normal

Im normalen Jahr im Mittelland (Wetterdaten "ZH normal") werden hohe Deckungsgrad über 90% erreicht. Wie im Kap. 3 dargestellt, sind die wichtigsten Einflussfaktoren der Emissionsgrad und das Flächenverhältnis.

Im Fall des Extremsommers "Lugano warm" sinken die Deckungsgrade auf ca. 60%. Hier gewinnt neben dem Emissionsgrad und dem Flächenverhältnis auch die Flächenneigung wegen der begrenzten Konvektion aufgrund der höheren nächtlichen Aussentemperaturen in den Sommermonaten an Bedeutung.



**Abb. 52:** Deckungsanteile der passiven Kühlung und Sensitivitäten für Lugano warm

### 4.3. Aufwandsberechnung

Der Aufwand für eine passive Kühlung (ohne Berücksichtigung einer Zusatzkühlung) berechnet sich als Integral der Leistungsaufnahme der eingesetzten Komponenten zur Koppung der Wärmesenke mit dem Wärmeübergabesystem zum Raum hin. Bei den betrachteten Systemen setzt sich die gesamte elektrische Leistungsaufnahme aus den Umwälzpumpen im Kreislauf der aktivierten Aussenfläche sowie demjenigen im Wärmeübergabesystem im Gebäudeinneren und der Steuer- und Regeleinrichtungen zusammen.

$$E_K = \int_{t_K} P_{el,K} * dt \quad \text{Gl. 20}$$

$E_K$	elektrischer Energieaufwand im passiven Kühlbetrieb	[kWh]
$P_K$	elektrische Leistungsaufnahme im passiven Kühlbetrieb	[kW]
$t_K$	Laufzeit im passiven Kühlbetrieb	[h]

In den meisten Fällen kann dies zum Produkt aus Laufzeit und Leistungsaufnahme vereinfacht werden, da die Umwälzpumpen im passiven Kühlbetrieb im Normalfall sowohl durchlaufend als auch mit konstantem Massenstrom betrieben werden oder aber bei variablem Massenstrom annähernd eine konstante mittlere Leistungsaufnahme angesetzt werden kann.

$$E_K = P_K * t_K \quad \text{Gl. 21}$$

Zur Bestimmung des Wärmeerzeuger-Nutzungsgrades Raumkühlung muss gemäss den Bilanzgrenzen zur Definition der Effizienz-Kennzahlen aus Abb. 1 lediglich die Umwälzpumpe im Kollektorkreis sowie der Aufwand zur Steuerung und Regelung berücksichtigt werden, denn die Wärmeübergabe im Gebäudeinneren wird nicht mitbilanziert. Weiterhin benötigt die Regelung der Anlage Betriebsenergie, welche auch ausserhalb der effektiven Kühlzeiten als Stand-By-Verlust anfällt. Ausgegangen wird von 10 Watt elektrischem Aufwand, unter der Annahme, dass die Aussenfläche einzig zur Kühlung benutzt wird, aber während der gesamten Sommerperiode, also während 182 Tagen.

Da in dieser Studie im Wesentlichen der Kühlbetrieb betrachtet wird, wird der Stand-By Aufwand während des gesamten Sommerhalbjahrs der passiven Kühlung zugeschlagen, eine kombinierte Nutzung mit Warmwassererzeugung und Heizwärme wird also vernachlässigt.

$$E_{K,WNG} = P_{Rgl} * (t_K + t_{K,SB}) + P_{UWP,Koll} * t_K \quad \text{Gl. 22}$$

$t_{K,SB}$	Laufzeit im Stand – By Zustand	[h]
$P_{Rgl}$	elektrische Leistungsaufnahme für Regelung	[kW]
$P_{UWP,Koll}$	elektrische Leistungsaufnahme Umwälzpumpe Kollektorkreis	[kW]

Um die aktive Zusatzkühlung zu berücksichtigen, wird hier vereinfachend von einem festen Wärmeerzeugernutzungsgrad für die aktive Kälteerzeugung ausgegangen. Der elektrische Aufwand der aktiven Zusatzkühlung berechnet sich damit zu

$$E_{K,WNG} = \frac{Q_{K,Zusatz}}{WNG_{K,Zusatz}} \quad \text{Gl. 23}$$

$Q_{K,Zusatz}$	durch die Zusatzkühlung erzeugte Kälte	[kWh]
$WNG_{K,Zusatz}$	Wärmeerzeugernutzungsgrad der Zusatzkühlung	[-]

Pro kWh elektrischem Aufwand wird mit 5.2 kWh Nutzkälte gerechnet, wobei der Zielwert der Leistungszahl einer konventionellen Kälteerzeugung (Gesamtkälteleistung 10 kW bei 50 %

Teillast) gemäss SIA 382/1 [7] zugrunde gelegt wird. In diesem Wert ist der Energieaufwand für die Rückkühlung bereits enthalten.

Für den gemischten passiven/aktiven Kühlbetrieb werden die Nutzungsgrade nach Energieanteilen gemittelt.

$$WNG_K = \frac{Q_{K,passiv} + Q_{K,Zusatz}}{\frac{Q_{K,passiv}}{WNG_{K,passiv}} + \frac{Q_{K,Zusatz}}{WNG_{K,Zusatz}}} \quad \text{Gl. 24}$$

$WNG_K$	Wärmeerzeugernutzungsgrad im kombinierten passiv/aktiv Kühlbetrieb	[-]
$WNG_{K,passiv}$	Wärmeerzeugernutzungsgrad im passiven Kühlbetrieb	[-]
$Q_{K,passiv}$	Durch die passive Kühlung erzeugte Kälte	[-]

#### 4.3.1. Arbeitszahlen

Die Nutzungsgrade der kombinierten Kühlung im passiven Kühlbetrieb mit aktiver Nachkühlung wird gemäss vorangehendem Kapitel unter der Annahme einer hohen Effizienz der Umwälzpumpen, Steuerelektronik und aktiven Zusatzkühlung berechnet. Die Umwälzpumpe im Kollektorkreis weist dabei eine Leistungsaufnahme von 20 Watt auf. Die Kältemaschine zur Zusatzkühlung weise einen mittleren Wärmeerzeugernutzungsgrad 5.2 auf. Da die aktive Kühlung frühmorgens bei tiefen Aussenlufttemperaturen betrieben wird sind hohe Leistungszahlen möglich. Für die beiden Klimatypen Zürich „normal“ und Lugano „warm“ ergeben sich Wärmeerzeugernutzungsgrade von 28.3 für den Standort Zürich resp. 9.8 für Lugano (Tab. 14). Insgesamt werden sehr hohe Nutzungsgrade erreicht, da im passiven Kühlbetrieb kaum Aufwand entsteht. Für den Standort Lugano mit warmen Klimabedingungen entfällt fast die Hälfte des Kühlbetriebes auf die aktiv betriebene Zusatzkühlung, wodurch der Nutzungsgrad des Gesamtsystems zwar verringert wird, aber immer noch als sehr hoch beschrieben werden kann.

**Tab. 14: Effizienzkennzahlen im passiven Kühlbetrieb mit aktiver Zusatzkühlung für die Klimata Zürich "normal" und Lugano "warm"**

	Zürich "normal"	Lugano "warm"
El .Leistung Umwälzpumpe Kollektor	<b>20 W</b>	<b>20 W</b>
Leistungszahl aktive Kühlung	<b>5.2</b>	<b>5.2</b>
Nutzkälte passiv	<b>668 kWh</b>	<b>731 kWh</b>
Nutzkälte aktiv	<b>43 kWh</b>	<b>535 kWh</b>
$WNG_K$	<b>28.3</b>	<b>9.8</b>

Die Sensitivität der Nutzungsgrade hinsichtlich Effizienz der einzelnen Anlagekomponenten wird im folgenden Kapitel betrachtet.

#### 4.3.2. Sensitivitätsanalyse der Komponenten-Effizienz

Der Einfluss des Betriebsaufwandes auf die Effizienzkennzahlen der passiven Kühlung soll anhand einer Klassifizierung in drei Stufen mit hoher, mittlerer und geringer Effizienz der Kälteerschliessung betrachtet werden. An elektrischem Aufwand werden die Regelung sowie die Umwälzpumpen im Kollektorkreis berücksichtigt. Die Wärmeübergabe zwischen diesen beiden Kreisen erfolgt durch einen Plattenwärmetauscher, die Umwälzpumpe ist nur während der effektiven Kühlstunden im Passivmodus in Betrieb. Der Regelungsaufwand wurde

in den obigen Betrachtungen jeweils vernachlässigt, er ist unabhängig von der Anlagengrösse und fällt bei grösseren Objekten daher kaum ins Gewicht. Da dieser Aufwand aber während der ganzen Sommerperiode (24 h an 182 Tage) anfällt, kann sein Anteil am insgesamt geringen Energiebedarf je nach Situation bei kleineren Gebäuden doch merklich sein.

**Tab. 15: Variation und Sensitivität des elektrischen Aufwands und Effizienz im passiven Kühlbetrieb mit aktiver Zusatzkühlung für die Klimata Zürich "normal" / Lugano "warm"**

<b>Effizienz</b>	<b>sehr hoch</b>	<b>mittel</b>	<b>gering</b>
El. Leistung Umwälz-pumpe Kollektor	20 W	40 W	60 W
Leistungszahl aktive Kühlung	5.2	4.1	3.3
<b>Laufzeit (ZH normal / LUG warm)</b>			
	843 / 1314 h		
Nutzkälte passiv	668 / 731 kWh		
Nutzkälte aktiv	43 / 535 kWh		
Nutzkälte total	711 / 1266 kWh/a		
<b>el. Energiebezug</b>			
Passivkühlung	17 / 26 kWh/a	34 / 53 kWh/a	51 / 79 kWh/a
der Zusatzkühlung	8 / 103 kWh/a	10 / 130 kWh/a	13 / 162 kWh/a
<b>WNG<sub>K,passiv</sub></b>			
	<b>39.6 / 27.8</b>	<b>19.8 / 13.9</b>	<b>13.2 / 9.3</b>
<b>WNG<sub>K, kombi</sub></b>			
	<b>28.3 / 9.8</b>	<b>16.1 / 6.9</b>	<b>11.2 / 5.3</b>

#### 4.4. Folgerungen für die Auslegung

Im Folgenden sind Hinweise für die Systemgestaltung für hohe Deckungsanteile zusammengestellt, die aus den Parametervariationen mit Berücksichtigung der Leistungsbegrenzung durch die Aussenbedingungen und des ausgeprägten Tagesgangs sowie die Einflussgrössen auf den Wärmeübergang.

##### Allgemeine Auslegungskriterien

- Wichtigster Parameter der Flächeneigenschaft ist der Emissionsgrad, insbesondere bei warmen Aussenbedingungen mit beschränkter Konvektion, wichtigster Betriebsparameter für den Betrieb ist die mittlere Kollektortemperatur.
- Die Auslegung sollte als bivalentes System erfolgen oder verschiedene passive Verfahren kombinieren, da die Verfügbarkeit des passiven Systems Aussenfläche nicht garantiert werden kann. Wenn Überschreitungen der operativen Temperaturen toleriert werden können, kann die Aussenfläche auch als einziges System für den Kühlbetrieb eingesetzt werden.
- Obwohl aufgrund der Abhängigkeit von den aktuellen Aussentemperaturen keine garantierte Kühlleistung angegeben werden kann, werden im Schweizer Mittelland bei Kollektoreintrittstemperaturen von 24 °C über 70% des Sommerhalbjahres Kühlleistungen von 50 W/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub> überschritten. Bei Kollektoreintrittstemperaturen von 16 °C reduziert sich der Wert auf 35%.
- Hocheffiziente Pumpen und geringe Stand-by Energie für Regelung erhöhen massgeblich die Arbeitszahlen, da unabhängig von der veränderlichen Kühlleistung an der Aussenfläche die gleiche hydraulische Leistung aufgewendet werden muss.

#### Auslegungskriterien hinsichtlich Flächeneigenschaften:

- Der Emissionsgrad sollte möglichst hoch gewählt werden. Bei moderatem Klima machen sich kleine Änderungen eines hohen Emissionsgrads (z.B.  $\varepsilon = 0.9$  auf  $\varepsilon = 0.7$ ) nicht so stark bemerkbar wie in warmen Klima, in dem die konvektive Wärmeabgabe durch höherer Aussenlufttemperatur begrenzt ist.
- Die optimale Ausrichtung der Fläche für den Kühlbetrieb ist horizontal, aber bis  $45^\circ$  hat die Neigung nur einen geringen Einfluss, wenn keine warmen Flächen im Sichtfeld des Kollektors liegen. Unter warmen Aussenbedingungen hat die Flächenneigung einen grösseren Einfluss als bei kühleren Aussenbedingungen, da die Konvektion begrenzt wird und die Kühlleistung wesentlich durch die Abstrahlung bestimmt ist. Vorteilhaft ist also eine Dachintegration der aktivierten Aussenfläche.
- Ein Windschutz zur Begrenzung von konvektiven Gewinnen kann abhängig von der Betriebstemperatur sinnvoll sein, bei anzustrebenden hohen Betriebstemperaturen aber nur als variabler Windschutz und für Standorte mit warmen Aussentemperaturen entsprechen dem Wetterdatensatz Lugano warm.

#### Auslegungskriterien hinsichtlich günstiger Betriebsparameter:

- Der Kollektor sollte bei möglichst hohen Betriebstemperaturen betrieben werden, um die Wärmeabgabe zu maximieren. Daher sollte die Systemkonfiguration an diese möglichst hohen Betriebstemperaturen ausgerichtet werden.
- Entscheidend für die Deckungsanteile ist daher die Temperaturanforderung des Übergabesystems im Gebäude. Eine Auslegung des Übergabesystems auf hohe Vorlauftemperaturen erhöht die Verfügbarkeit des Systems, die erreichbare Kühlleistung und die Betriebszeiten.
- Wärmetauscher reduzieren durch die Grädigkeit das nutzbare Temperaturpotenzial in der Zone und sorgen für einen Betrieb des Kollektors auf niedrigerem Temperaturniveau, was die erreichbare Kühlleistung reduziert. Daher sollte Wärmetauscher möglichst gross, d.h. auf eine niedrige Grädigkeit ausgelegt werden.
- Bei Wasserspeichern sollten Lade- und Entladestrategien so angepasst werden, dass möglichst hohe Betriebstemperaturen ermöglicht werden. Günstig könnten sich Schichtenladungseinrichtungen auswirken, damit dem Kollektor möglichst warmes Speicherwasser zugeführt werden kann.
- Kleine Wasserspeicher, die zur Anpassung der Massenströme in Kollektorkreis und Verteilkreis fungieren, sollten möglichst gleichzeitig be- und entladen werden, um das Speichervolumen möglichst warm zu halten.

## **4.5. Anwendungen und Synergien zu Wärmenutzung**

Aus Kostengründen ist der passive Kühlbetrieb über Aussenflächen insbesondere dann interessant, wenn sich Synergien zu einer Heizanwendung ergeben. In diesem Kapitel werden daher zunächst noch einmal die Anwendungsmöglichkeiten im Kühlbetrieb rekapituliert, und im Folgenden mögliche Synergien für den Heizbetrieb diskutiert, die aber nicht im Rahmen dieser Studie untersucht worden sind.

### **4.5.1. Anwendungen des passiven Kühlverfahrens**

Wie die vorhergehenden Untersuchung ergeben hat, bietet die passive Kühlung über Aussenflächen unter Schweizerischen Klimabedingungen durchaus Potenziale für einen energieeffizienten Kühlbetrieb. Besondere für Anwendungen mit hohen Vorlauftemperaturen werden hohe Kühlleistungen und eine gute Verfügbarkeit der Anlage erreicht. Dies korreliert gut mit der wachsenden Verbreitung von Flächenheiz- und Kühlsystemen, insbesondere von TABS in Büro- und Verwaltungsgebäuden. Obwohl in dieser Potenzialstudie nur der sommerliche Kühlbetrieb für Büro- und Wohnnutzung betrachtet wurde, kann auch ein Betrieb des Systems im Winter sinnvoll sein, um ganzjährige Kühllasten, beispielsweise aus Rechenräumen oder einer gewerblicher Anwendung wie Maschinenkühlung abzuführen.

Hier ergeben sich für die allfälligen Kühltemperaturen noch günstigere Temperaturniveaus, und die Aussenbedingungen lassen für diese Fälle noch weitere Steigerungen der Kühlleistung erwarten.

Aussenflächen lassen sich aber auch so erstellen, dass sie sowohl zur Wärmeabgabe nachts als auch zur Wärmegewinnung tagsüber genutzt werden können. Der Fokus sollte dabei auf die Kühlfunktion gelegt werden, auf Wärmegewinne optimierte Systeme mit hoher Wärmedämmung gegenüber dem Aussenklima eignen sich nicht für eine passive Kühlung.

#### **4.5.2. Warmwasserbetrieb**

Die grössten Synergien ergeben sich bei Warmwasser-Wärmebedarf im Sommerbetrieb, da sich die Aussenflächen tagsüber auch zur Wärmeerzeugung (Vorwärmung) nutzen lassen und gegen Abend schnell abkühlen (siehe Abb. 7) und so für einen Kühlbetrieb zur Verfügung stehen. Auch ergeben sich durch geringe Neigungen, wie sie für die sommerliche Wärmegewinnung optimal sind, gegenüber horizontaler Ausrichtung keine massgeblichen Einschränkungen für den Kühlbetrieb, wie in Kap. 3.6 gezeigt wurde. Von der Nutzung der Gebäude liegt allerdings der Hauptkühlbedarf zurzeit in Nutzgebäuden wie Büro- und Verwaltungsgebäuden, die wenig Warmwasserbedarf haben. Allenfalls könnte hier eine Versorgung von Nachbargebäuden bei gemischter Siedlungsnutzung aus Wohnen und Gewerbe interessant sein. Das feststellbare zunehmende Interesse von energieeffizienter Komfortkühlung in Wohnbauten lässt aber zukünftig hier Synergien vermuten.

#### **4.5.3. Heizbetrieb**

In Bezug auf eine Integration eines winterlichen Heizbetriebs bestehen allerdings teils gegenläufige Effekte hinsichtlich optimalem Neigungswinkel, Selektivität und Wärmedämmung. Um das geringe Strahlungsangebot im Winter angemessen nutzen zu können, wären Aussenflächen mit wärmerückhaltenden Eigenschaften sinnvoll, beispielsweise selektive Beschichtungen oder Frontabdeckungen. Beides sind unerwünschte Eigenschaften für den Kühlbetrieb.

Bei Betrieb des Kollektors unter der Frostgrenze muss zwangsläufig auf ein frostsicheres Wasser-Glykol-Gemisch zurückgegriffen werden, was eine Einbindung über einen Wärmetauscher notwendig macht, die den Deckungsgrad des Kühlbetriebs aufgrund des Temperaturabfalls vermindert, siehe Kap. 3.9.

Eine weitere Möglichkeit einer Heizanwendung ist die Nutzung des Kollektors als Wärmequelle für Wärmepumpen. Für diesen Temperaturbereich könnten auch unabgedeckte Kollektoren eingesetzt werden, die den Vorteil aufweisen, der ausser der Solarstrahlung auch direkt der Aussenluft Energie entziehen zu könne, wie es in Wohnbauten derzeit in Pilotprojekten untersucht wird (z.B. [28]).

Bei dieser Anwendung wäre allerdings zu beachten, wie gut der Wärmeentzug aus der Umgebungsluft im Vergleich zu einem Luftkühler liegt und welche Temperaturniveaus erreicht werden. Hier ist auch die Einsatzgrenze der Wärmepumpe zu beachten. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob der Kollektor als einzige Wärmequelle ausreicht, oder ob Zusatzwärmeerzeuger oder zusätzlicher Wärmequellen notwendig sind. In der Übergangszeit sind dann auch Synergien mit einer direkt solaren Nutzung ohne Wärmepumpe denkbar.

### **4.6. Systemkosten**

Als Ergänzung zur bereits bestehenden Gebäudehülle sind Lösungen mit Schwimmbadabsorbern aus Kunststoff sicher eine der kostengünstigsten Lösungen bei bestehenden Bauten. Die gesamthaft anfallenden Systemkosten sind stark von den Gegebenheiten vor Ort sowie der konkreten Systemeinbindung abhängig, an dieser Stelle werden daher lediglich Kosten für die Kollektoren betrachtet.

Die Firma Soltop (Solana Absorber) gibt in ihrer Preisliste 2010 Kollektorpreise von 215 CHF/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub> für kleinere Anlagen bis 20 m<sup>2</sup> und 150 CHF/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub> für Kollektorflächen ab

125 m<sup>2</sup> an. Für Montagematerial (ohne Dachbefestigungen) fallen weitere rund 20 CHF/m<sup>2</sup><sub>koll.</sub> an. Friap gibt für ihre Sola-Absorber mit vergleichbaren Eigenschaften bei kleineren Kollektorflächen von 20 m<sup>2</sup> Kosten von 190 CHF/m<sup>2</sup> an, zuzüglich 45 CHF/m<sup>2</sup> für Montagematerial und 80 CHF/m<sup>2</sup> für Montagearbeiten. Zusammen würden so CHF 315/m<sup>2</sup> für die fertig montierte Kollektorfläche anfallen.

Als Richtkosten für Metalldächer wird für die „Solardach AS“ Kollektoren von Energie Solaire ein Stückpreis von CHF 720 genannt, was einem Quadratmeterpreis von rund CHF 360 entspricht. Für den Einsatz zur Kühlung könnte aber auf die selektive Beschichtung verzichtet werden, zudem kann auf eine konventionelle Dacheindeckung komplett verzichtet werden, was die Gesamtkosten weiter senkt. Für neu zu erstellende Gebäude kämen solche Lösungen also durchaus in Frage und würden auch optisch höheren Ansprüchen genügen.

#### 4.7. Vergleich mit anderen passiven Kühlverfahren

Die Umwelt bietet verschiedene natürliche Wärmesenken mit Potenzial zum passiven Kühlen, nebst der Aussenluft beispielsweise auch das Erdreich oder Grundwasser.

Sämtliche Verfahren haben jedoch ihre Vorteile und Einschränkungen. Tab. 16 gibt einen Überblick über passive Kühlmöglichkeiten in schweizerischem Klima.

**Tab. 16: Übersicht passive Kühlverfahren**

Typ	Wärmesenke	Vorteil	Einschränkungen	Richtwert Kühlleistung*
Natürliche Nachtlüftung	Aussenluft	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kein Transportaufwand</li> <li>▪ Geringe Kosten</li> <li>▪ Keine Wärmeübergabefläche im Innenraum notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe bauliche Anforderung an günstige Luftführung</li> <li>▪ Begrenzte Wärmeübertragung an Luft</li> <li>▪ Stark wetterabhängiges Potenzial (begrenzt durch Aussenlufttemperaturen &amp; Windsituation)</li> <li>▪ Sicherheit, Lärm, Luftqualität</li> <li>▪ Nur nachts verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 5 W/m<sup>2</sup></li> </ul>
Mechanische Nachtlüftung	Aussenluft	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geringe Kosten (falls Lüftung ohnehin vorhanden)</li> <li>▪ Keine Wärmeübergabefläche im Innenraum notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hoher Transportaufwand</li> <li>▪ Wetterabhängiges Potenzial (begrenzt durch Aussenlufttemperaturen)</li> <li>▪ Begrenzte Wärmeübertragung an Luft</li> <li>▪ Nur nachts verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 20 W/m<sup>2</sup></li> </ul>
Luft-Erdregister	Erdreich	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Verfügbarkeit, auch tagsüber</li> <li>▪ Nutzbar für Wärmeanwendung</li> <li>▪ Abkühlung unter Aussenlufttemperatur</li> <li>▪ Standortunabhängig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrenzte Wärmeübertragung an Luft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 20–40 W je Meter Rohrlänge [19]</li> </ul>
Erdwärmesonden	Erdreich	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Verfügbarkeit, auch tagsüber</li> <li>▪ Tiefe Temperaturen</li> <li>▪ Nutzbar für Wärmeanwendung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Erschliessungskosten</li> <li>▪ Nicht überall verfügbar</li> <li>▪ Restriktion durch Verhältnis Wärmeeinspeisung und -entzug</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 30 W je Meter Sondenlänge [19]</li> </ul>

\* stark von der konkreten Situation abhängig

Tab. 16: Übersicht passive Kühlverfahren (fortgesetzt)

Typ	Wärmesenke	Vorteil	Einschränkungen	Richtwert Kühlleistung*
Grundwasser	Grundwasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Verfügbarkeit, auch tagsüber</li> <li>▪ Tiefe Temperaturen</li> <li>▪ Nutzbar für Wärmeanwendung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Erschliessungskosten</li> <li>▪ Nicht überall verfügbar</li> <li>▪ Korrosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maximal 12 kW je l/s Brunnenleistung</li> </ul>
Kühlturm, trocken	Aussenluft	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standortunabhängig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrenzt auf Aussenlufttemperaturen</li> <li>▪ Begrenzte Wärmeübertragung an Luft</li> <li>▪ Transportaufwand</li> </ul>	-
Kühlturm, nass	Aussenluft	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standortunabhängig</li> <li>▪ Nutzung tagsüber</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wasserbedarf</li> <li>▪ Schwadenbildung</li> </ul>	-
Adiabate Kühlung	Aussenluft	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standortunabhängig</li> <li>▪ Abkühlung unter Aussenlufttemperatur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wasserbedarf</li> <li>▪ Beschränkt durch Feuchte der Aussenluft</li> <li>▪ Nur mit mechanischer Lüftung</li> </ul>	-
Aussenfläche	Aussenluft, Himmel	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standortunabhängig</li> <li>▪ Abkühlung unter Aussenlufttemperatur</li> <li>▪ Nutzbar für Wärmeanwendung, auch Synergie mit PV möglich</li> <li>▪ Geringer Transportaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stark wetterabhängiges Potenzial (Temperaturen, Bewölkung, Wind)</li> <li>▪ Relativ hoher Flächenbedarf</li> <li>▪ Für Kühlung nur nachts nutzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 50 - 100 W/m<sup>2</sup></li> </ul>

\* stark von der konkreten Situation abhängig

Passive Kühlung über Aussenflächen bietet die Vorteile, dass– im Gegensatz beispielsweise zu reinen Nachtlüftungen – Temperaturen unterhalb der Aussenlufttemperatur erreicht werden können. Die Aussenfläche lässt sich für einen kombinierten Heiz-/Kühlbetrieb nutzen, anders als bei erdgekoppelten Lösungen bestehen aber keine Restriktionen betreffend Verhältnis zwischen abgeführter und bezogener Wärmemenge (saisonale Energiebilanz des Erdreichs und daraus resultierendes Temperaturniveau). Nachteilig wirkt sich die starke Abhängigkeit von den meteorologischen Randbedingungen aus, diese können sich unter Umständen rasch ändern. Auch ist der Flächenbedarf nicht unerheblich, wenngleich er sich auf die ganze Aussenfläche verteilen lässt, da auch eine vertikale Orientierung nicht a priori ungeeignet ist (ausser bei hoher Gegenstrahlung, beispielsweise durch benachbarte Gebäude).

Lösungen zur passiven Kühlung über Aussenflächen können mit geringem Energiebedarf und entsprechend hohen Nutzungsgraden realisiert werden. Systeme aus herkömmlichen und gut verfügbaren Komponenten lassen sich überdies mit geringem baulichem Zusatzaufwand realisieren.

Vergleicht man die Kosten für die aktivierten Aussenflächen nach Kap. 4.6 mit den Kosten einer Erdwärmesonde (EWS), so entsprechen die Kosten von 1 m<sup>2</sup> Kollektor denen von 2-6 m Erdwärmesonde. Dabei ist eine allfällige Einsparung hinsichtlich der Dacheindeckung noch nicht berücksichtigt. Wenn die ermittelten Leistungsdaten für das Mittelland aus Kap. 3.2.1 für die Nutzung Einzelbüro zugrunde gelegt werden, so besteht im Mittel eine Kühlleistung von ca. 40-75 W/m<sup>2</sup><sub>Koll.</sub>, während mit einer Erdwärmesonde von 15-30 W/m<sup>2</sup><sub>EWS</sub> ausgegangen werden kann [9].

Somit ergeben sich in diesem Fall für 1 kW Kühlleistung die in Tab. 17 dargestellten Investitionskosten.

**Tab. 17: Abschätzung der Investitionskosten für Systeme zur passiven Kühlung**

	<b>Erdwärmesonde</b>	<b>Kunststoffabsorber</b>	<b>Selektives* Metaldach</b>
<b>Spezifische Kosten</b>	60-90 CHF/m <sub>EWS</sub> .	170-315 CHF/m <sup>2</sup> <sub>Koll.</sub>	360 CHF/m <sup>2</sup> <sub>Koll.</sub>
<b>Spezifische Kühlleistung</b>	15-30 W/m <sub>EWS</sub>	40-75 W/m <sup>2</sup> <sub>Koll.</sub>	40-75 W/m <sup>2</sup> <sub>Koll.</sub>
<b>Bereich Investitionskosten</b>	2000-6000 CHF	2500-7900 CHF	5000-9000 CHF

*\*Selektivität im Kühlfall nicht sinnvoll, allfällige Kosteneinsparung bei nicht selektivem Metaldach möglich*

Die Kosten für die Kollektoren liegen damit bezogen auf die Kühlleistung im Bereich der Investitionskosten der Erdwärmesonde, wobei bei den Metaldachkollektoren allfällige Einsparungen hinsichtlich Dacheindeckung und Weglassen der selektiven Beschichtung noch nicht berücksichtigt sind. Eine Kollektorlösung kann nach dieser Abschätzung also ähnlich wirtschaftlich sein wie eine Erdwärmesonde.

Die Erdwärmesonde hat einerseits den Vorteil einer höheren Verfügbarkeit, da die Umgebungsquelle auch tagsüber zur Verfügung steht, aber andererseits bestehen Einschränkungen hinsichtlich der Geologie (Möglichkeit für Bohrungen) und der Energiebilanz. Für ein Kühlpotenzial im Sommer muss das Erdreich im Winter entladen werden, die Kühllast des Gebäudes sollte dabei in Bürogebäuden optimalerweise 50%-90% der Heizlast betragen [18], was für ein Niedrigenergie-Bürogebäude kritisch sein kann.

Für einen abschliessenden Vergleich ist aber auch der Zusatznutzen für eine Wärmenutzung im Sommer und Winter zu betrachten, was den Rahmen dieser Potenzialstudie sprengt.

## 5. Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Potenzialstudie wurde der Kühlbetrieb über aussenliegende aktivierte Gebäudekomponenten für die Schweizer Wetterrandbedingungen untersucht. Die Ergebnisse bestätigen, dass für normale Jahre im Schweizer Mittelland für die Nutzung Einzelbüro sowie guten Flächeneigenschaften und Betriebsbedingungen hohe Deckungsanteile über 90% und selbst unter Extremsommerbedingungen im Tessin noch Deckungsanteile von knapp 60% erreicht werden, wenn der Bereich für die operativen Temperaturen nach SIA 382/1 zugrunde gelegt wird.

Im Schweizer Mittelland werden in über 75% der Nachtstunden Kühlleistungen von über 50 W/m<sup>2</sup> Kollektor überschritten. Die aktivierten Aussenflächen eignen sich damit als Alternative zu eingeführten passiven Kühlverfahren, wobei sie spezifische Vorteile und Einschränkungen aufweisen.

Vorteile liegen in der hohen erreichbaren flächenspezifische Kühlleistung und dem hohen erreichbaren Deckungsanteil sowie der Integrationsmöglichkeit zur multifunktionalen Nutzung. Die typischen Einschränkungen sind die starke Wetterabhängigkeit des Kühlpotenzials sowie der Tagesgang der solaren Einstrahlung, die einen periodischen Betrieb während der Nachtstunden bedingen und damit die Systemkonfiguration beeinflussen, so dass allfällige Speicher und Zusatzkälteerzeuger notwendig werden. Des Weiteren reagiert die Kühlleistung sensitiv auf die Vorlauftemperaturanforderungen des Übergabesystems, was bei der Systemgestaltung beachtet werden sollte.

Mit modernen "Klasse-A"-Effizienzpumpen lassen sich damit die für passive Kühlung typischen hohen Arbeitszahlen im Bereich von 10-40 erreichen, was den elektrischen Aufwand für die Kühlfunktion stark einschränkt.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird die Anwendung im Kühlbetrieb besonders interessant, wenn sich Synergien zu Wärmenutzung über die gleiche Fläche ergeben. Wenn die Aussenflächen dann noch Funktionen der Fassade im Sinne einer Gebäudeintegration übernehmen (Fassade als Wärmetauscher, Wärmequelle und Wärmesenke), kann der Kühlbetrieb sowohl energetisch als auch wirtschaftlich günstig bereitgestellt werden. Auf Grundlage der durchgeführten Marktrecherche bieten sich hier verschiedene marktverfügbare Komponenten für eine gebäudeintegrierte Kühlfunktion an, von denen eine kombinierte Nutzung einer als Dachhaut integrierten PV/T Anlagen zur Elektrizitätserzeugung, thermischen Nutzung und Wärmeabfuhr die grössten Synergien aufweist.

Mit den Erkenntnissen des Schlussberichts soll Kontakt zu interessierten Industrieunternehmen aus der Solar- oder Baubranche aufgenommen werden, um die Umsetzung und Felderprobung im Rahmen eines Folgeprojekts zu bearbeiten.

## 6. Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Absorptionsgrad	[-]
b	Bewölkungsgrad	[-]
$\beta$	Neigungswinkel	[°]
d	Durchmesser	[m]
E	elektrische Energie	[kWh]
$\varepsilon$	Emissionsgrad	[-]
F	Rippenwirkungsgrad	[-]
F'	Kollektorwirkungsgradfaktor	[-]
h	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> /K]
H	Höhe der Wolkenbasis	[m]
$\Delta H_v$	Verdampfungsenthalpie	[J/kg]
$\varphi$	Einstrahlzahl	[-]
l	Länge	[m]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/m/K]
$\dot{m}$	Massenstrom/Verdunstungsrate	[kg/s]
$\nu$	kinematische Viskosität	[m/s]
$\Delta p$	Druckdifferenz	[Pa]
Q	Wärme (Kälte)	[kWh]
$\dot{Q}$	thermische Leistung	[W]
$\dot{q}$	flächenspezifische Leistung	[W/m <sup>2</sup> ]
Re	Reynoldszahl	[-]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
T	Thermodynamische Temperatur	[K]
$\theta$	Celsius Temperatur	[°C]
t	Laufzeit	[s]
v	Wind-/Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
w	Abstand	[m]
$\zeta$	Widerstandsbeiwert	[-]

### Konstanten

$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$
----------	----------------------------	---

### Abkürzungen und Indizes

A	Absorber
C	Konvektiv
con	Kontakt
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
DG	Deckungsgrad
e	Aussen
EWS	Erdwärmesonde
F	Fluid

gen	Erzeuger
H	Himmel
i	Innen
JAZ-WP	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe
K	Kälte / Kühlbetrieb
Koll	Kollektor
L	Aussenluft
L-EWT	Luft-Erd-Wärmetauscher
LUG	Lugano
r	Radiativ
Rgl	Regelung
SB	Stand-By
SNG	Systemnutzungsgrad
t	total
TP	Taupunkt
UWP	Umwälzpumpe
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad
WRG	Wärmerückgewinnung
WW	Warmwasser
ZH	Zürich

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] **Reglement zur Nutzung der Qualitätsmarke Minergie® (2009)**, Verein Minergie®, Bern; <http://www.minergie.ch>
- [2] **VDI-Wärmeatlas**, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 2002
- [3] Schramek, E.R. et al.: **Taschenbuch für Heizung+Klimatechnik**, 75. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2011
- [4] Duffie, J.A., Beckman, W.A.: **Solar Engineering of thermal processes**, Third Edition, John Wiley & Sons, 2006
- [5] Perers, B. **An improved dynamic solar collector model including condensation and asymmetric incidence angle modifiers**, Proceedings Eurosun 2010
- [6] SIA 180:1999 **Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 1999
- [7] SIA 382/1:2007: **Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA; Zürich; 2007
- [8] **Energie und Ästhetik**, ATMOVA System Produktbroschüre, Swissmetal Design Solutions AG, Dornach
- [9] Afjei, Th., Dott, R., Huber, A.: **Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen**, Schlussbericht Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm REN, Bern, 2007
- [10] MuKE:2008 **Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich**; Konferenz Kantonalen Energiedirektoren - EnDK; Chur, 2008
- [11] SIA2028:2008 **Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 2008
- [12] SIA2024:2006 **Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik**. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 2006
- [13] Büttner, D., Harhausen, G.: **Unverglaste Metalldach-Kollektoren im geschlossenen Kühlkreislauf zur passiven Kühlung durch Konvektion und Strahlung**, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Würzburg, 2007
- [14] Büttner, D. et. al, **Kühlkreislauf mit passiver Kälteerzeugung durch Strahlungskühlung**, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Würzburg, 2003
- [15] Yannas, S., Erell, E., Molina, J.L.: **Roof Cooling Techniques: A Design Handbook**, Earthscan, London, 2006
- [16] Rockendorf, G. et. al.: **Solare Schwimmbadheizung**, IST EnergiePlan GmbH, Kandern, 2001
- [17] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S.: **Fundamentals of heat and mass transfer**, Sixth Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2007
- [18] Pahud, D., Belliardi, M, Capoto, P.: **Geocooling potenzial of borehole heat exchangers in low energy office buildings**, 16. Statusseminar, 2./3. September 2010, ETH Zürich
- [19] Zimmermann, M. (Hrsg): **Handbuch der passiven Kühlung**, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [20] **Matlab/Simulink - Produktinformation**, The MathWorks GmbH, Bern, 2005, <http://www.mathworks.ch>
- [21] **CARNOT Blockset**, Version 2.2; 2009
- [22] **CARNOT Blockset Version 1.0 User's Guide**: Solar-Institute Jülich, Scientific Computers GmbH, Aachen, 1999
- [23] Erell, E., Etzion Y.: **Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors**, Building and Environment 35, S. 297-305, Elsevier, 2000
- [24] Beuken, D. L.: **Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen**, Dissertation, Freiburg, 1936
- [25] VDI 6020; **Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation - Gebäudesimulation**, VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf, 2001
- [26] Judkoff, R., Neymark, J.: **BESTEST**, National Renewable Energy Laboratory, 1995

- [27] Feist, W.: **Thermische Gebäudesimulation**, C.F. Müller, Heidelberg 1994
- [28] Thissen, B.: **Kopplung von unverglasten selektiven Solarkollektoren mit einer Wärmepumpe und einem Latentspeicher**, Tagungsband 2. Symposium Aktiv-Solarhaus, S. 194 - 201, 22./23. Sept. 2010, Luzern
- [29] Martin, M., Berdahl, P.: **Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States**, Solar Energy, Vol. 33, S. 321-336, 1984.
- [30] Rohner, E.: **Energie aus dem Erdreich**, Vortrag im Rahmen des Energieaperos Beider Basel, ZLF des Universitätsspital Basel, 25. Januar 2006.
- [31] Koschenz, M., Lehmann, B.: **Thermoaktive Bauteilsystem TABS**, EMPA, 2000
- [32] Loutzenhiser, P., Manz, H., Maxwell, G.: **Empirical Validations of Shading/ Daylighting / Load Interactions in Building Energy Simulation Tools**, Bericht IEA SHC Task 34/ ECBCS Annex 43, Projekt C, EMPA and Iowa State University, August 2007
- [33] Ackermann, M., Zweifel, G.: **RADTEST**, Radiant Heating and Cooling test cases, report of IEA SHC Task 22, Subtask C, HTA Luzern, April 2003

# Anhang

## Anhang 1: Simulationsplattform

Die Toolbox CARNOT [21] ist eine spezifische, massgeschneiderte Lösung für den Bereich Heizungs- und Klimatechnik. Sie enthält frei konfigurier- und erweiterbare Komponentenmodelle zur Simulation von konventionellen und solaren Heizungssystemen. Das CARNOT – Gebäudemodell dient dazu, den dynamischen Lastverlauf als Schnittstelle zu den CARNOT – Modellen von Heizungsanlagen zu simulieren. Im Bereich Gebäudesimulation existieren sowohl Modelle der Gebäudekomponenten (Wand, Fenster, Dach etc.) existieren als auch vorgefertigte Zweizonen-Hausmodelle. Komplexere Modelle lassen sich durch Verknüpfung von Zonenmodell, aber auch aus einzelnen Komponenten wie Raumknoten und Gebäudebauteilen erstellen. Die Modelldarstellung ist aufgrund des Blockschaltbildcharakters intuitiv, kann jedoch bei grösseren Gebäudestrukturen recht aufwändig werden. Das Raummodell ist nach BESTEST [26] und VDI 6020 [25], das Fenster- und Verschattungsmodell nach IEA SHC Task 34 [31] und die Flächenheiz- und Kühlsystem mit dem RADTEST [33] validiert worden.

## Anhang 2: Raummodell

Die Wände werden als eindimensionale, speichernde Wärmeleiter über Beuken – Modelle [24] modelliert. Der Wärmeaustausch im Raum wird über das Zweisternmodell nach Feist [27] abgebildet, wonach der Wärmeaustausch im Raum in einen konvektiven und einen Strahlungsknoten aufgeteilt wird, um die konvektiven und Strahlungswärmeströme getrennt auszuwerten. Damit kann eine Empfindungstemperatur als Gewichtung der Strahlungs- und konvektiven Knotentemperatur berechnet werden. Im Raumknoten werden neben der Bilanzierung der ein- und austretenden Wärmeströme auch der Luftaustausch und damit Feuchte- sowie CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft bilanziert. Als Eingangsgrössen dienen die Wärmeströme durch die Raumbeheizung, durch solare Einstrahlung, durch technische Geräte oder Personen sowie die Wärmeströme von den umgebenden Wänden. Hinzu kommen Massenströme von Luft, Feuchte oder CO<sub>2</sub>. Ausgangsgrössen des Raumknotens sind neben der Raumlufttemperatur und der Empfindungstemperatur die Temperatur des Strahlungsknotens sowie die Feuchte, der CO<sub>2</sub>-Gehalt und abgeleitete Grössen. Die Knotentemperaturen werden auf die Bauteile zurückgekoppelt, um so die aktuellen Wärmeströme berechnen zu können. Die Wände entsprechen Koppelbausteinen, welche die Raumknoten verbinden.

## Anhang 3: Modellierung Wärmeübergabesysteme

Das im Gebäudemodell von CARNOT enthaltene eindimensionale Modell für Wände, Böden und Decken bildet die Wärmeleitung und -speicherung mit einer sogenannten aktiven Schicht in einer definierten Tiefe im Bauteil ab, in die eine Wärmeleistung eingekoppelt werden kann. Die Berücksichtigung einer Bauteilaktivierung (TABS oder Fussbodenheizung) mit der Ankopplung an gebäudetechnische Anlagen erfordert darüber hinaus die Bestimmung der eingekoppelten Leistung in der aktiven Bauteilschicht und dem Wärme transportierenden Medium, in diesem Fall das Wasser in den Rohren der Bauteilaktivierung. Hierzu wurde von Koschütz und Lehmann [31] ein dynamisches Modell für den Wärmeübergang in thermisch aktiven Bauteilsystemen entwickelt, das unter Beachtung der Modellgrenzen auch für Fussbodenheizungssysteme eingesetzt werden kann.

## Anhang 4: Charakterisierung der Referenzgebäude

Der Nutzung „Einzel-, Gruppenbüro“ liegt ein Gebäude mit relativ hohem Verglasungsanteil und mechanischer Lüftung zugrunde. Es ist in Skelettbauweise mit Beton-Zwischendecken und einer Leichtbau-Fassadenhülle modelliert, die Aussenwand erfüllt mit einem U-Wert von  $0.21 \text{ W/m}^2/\text{K}$  in etwa die gesetzlichen Anforderungen [10]. Mit 58 % der Fassadenfläche ist der Glasanteil relativ hoch, der g-Wert der Verglasung von  $g=0.62$  kann durch einen strahlungsgesteuerten (je Fassade) Sonnenschutz auf  $g=0.11$  verringert werden, Nordfenster bleiben aber immer unverschattet. Das Modell basiert auf zwei Referenzräumen dieses Gebäudes à je  $17.5 \text{ m}^2$  Nettfläche ( $3.5 \times 5.0 \text{ m}^2$ ) mit unterschiedlicher Himmelsausrichtung: Der eine Raum ist mit seiner Aussenfassade gegen Süden, der andere gegen Norden ausgerichtet, was sich insbesondere auf die anfallenden äusseren Lasten durch Sonneneinstrahlung auswirkt. Die Räume wurden deshalb zwei unterschiedlichen Zonen zugeordnet. Nebst ihrer Hauptfassade grenzt jeder der beiden Räume allseitig gegen weitere, identische Innenräume an. Die Wärmeübergabe erfolgt über Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) mit 20 cm Verlegeabstand. Die 30 cm dicke Betondecke mit den TABS ist gegen die Räume hin nicht weiter abgedeckt (z.B. durch Teppiche oder abgehängte Decken), was eine gute Wärmeübertragung erlaubt.

Das Bürogebäude für die Nutzung „Grossraumbüro“ ist identisch wie dasjenige für „Einzel-, Gruppenbüro“ aufgebaut, es unterscheidet sich lediglich in der mit  $144 \text{ m}^2$  grösseren Grundfläche und dem daraus folgenden kleineren Glas-/Nutzflächen Verhältnis.

Die wichtigsten Eckdaten der Bürogebäude sind in den untenstehenden Tab. 18 bis Tab. 20 zusammengefasst, einen visuellen Eindruck gibt Abb. 53 rechts. In der Auswertung werden beide Zonen separat bewertet.

**Tab. 18: U-Werte opaker Bauteile der Bürogebäude für Nutzung „Einzel-,Gruppenbüro“ und „Grossraumbüro“.**

	Aussenwand	Innenwände	Zwischendecken
U-Wert [ $\text{W/m}^2/\text{K}$ ]	0.21	1.91	2.34

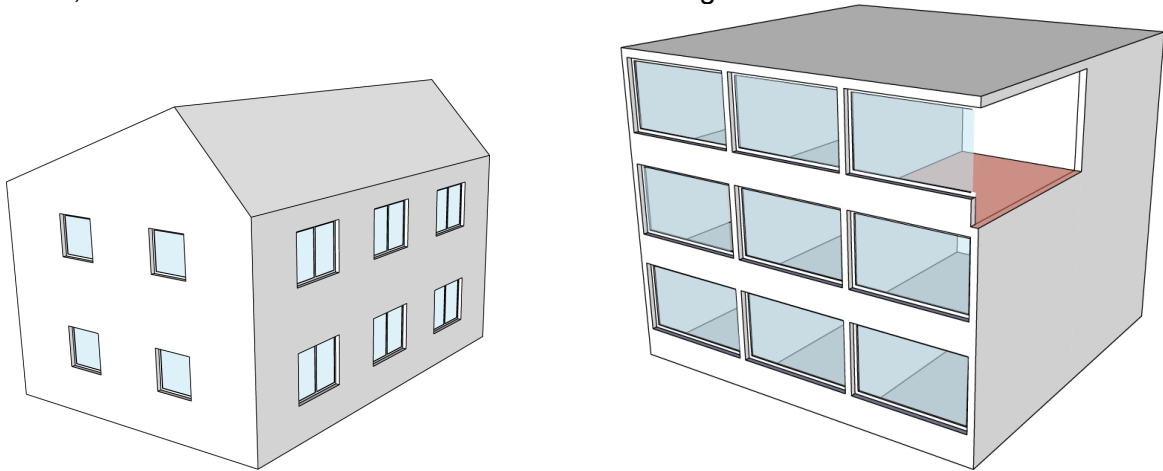
**Tab. 19: Übersicht Fenster der Bürogebäude für Nutzung „Einzel-,Gruppenbüro“ und „Grossraumbüro“ (Wert in Klammern für „Grossraumbüro“ falls abweichend).**

	Nord	Süd
Glasanteil Fassade [%]	58	58
Verhältnis Glasfläche / Nutzfläche [-]	0.35 (0.15)	0.35 (0.15)
g-Wert [-]	0.62	0.62
U-Wert Fenster [ $\text{W/m}^2/\text{K}$ ]	1.2	1.2
Verschattung ein	Keine Verschattung	Aussenlufttemperatur $> 20 \text{ }^\circ\text{C}$ und Strahlung auf Fassade $> 150 \text{ W/m}^2$
g-Wert mit Verschattung [-]	Keine Verschattung	0.11

**Tab. 20: Übersicht Lüftung der Bürogebäude für Nutzung „Einzel-,Gruppenbüro“ und „Grossraumbüro“.**

Mechanische Lüftung	Ja
Luftwechsel [ $\text{h}^{-1}$ ]	1.3 (+ 0.1 Infiltration)
Betriebszeit	Montag-Freitag, 5 <sup>00</sup> - 18 <sup>00</sup>
Nachtlüftung	Keine
Sommer By-Pass WRG	ab $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Aussenlufttemperatur (24h-Mittel)

Der Nutzung „Wohnen“ liegt ein Einfamilienhaus mit 140 m<sup>2</sup> Nettowohnfläche und grösstenteils südorientierten Fensterflächen zugrunde, das in der IEA SHC Task 44/HPP Annex 38 als Referenzgebäude genutzt wird. Die Gebäudehülle entspricht den zurzeit aktuellen gesetzlichen Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz. Der wärmegegedämmte Backsteinbau ist mit einem asymmetrischen Satteldach versehen und wird mittels Fensterlüftung belüftet, die Luftwechselrate wird als konstant 0.4 h<sup>-1</sup> angenommen.



**Abb. 53:** Die Referenzgebäude für die Nutzungen Wohnen (links) resp. Einzel-,Gruppenbüro (rechts). Vom Bürogebäude wurde jeweils ein Referenzraum simuliert. Diese sind süd- resp. nordorientiert und grenzen an jeweils identische Räume.

Die gegenüber dem Bürogebäude vergleichsweise kleine Fensterfläche wird ab 300 W/m<sup>2</sup> Horizontalstrahlung verschattet. Im Gegensatz zum Bürogebäude erfolgt die Wärmeübergabe für das Einfamilienhaus über eine Fussbodenheizung. Der Verlegeabstand beträgt hier 10 cm in einem 6 cm dicken Zementestrich ohne weitere Bedeckung gegen den Raum. Die Daten zum Wohnbau fassen Tab. 21 bis Tab. 23 zusammen.

**Tab. 21:** U-Werte opaker Bauteile. Wohngebäude

	Aussenwand	Boden (auf Erdreich)	Dach
U-Wert [W/m <sup>2</sup> /K]	0.22	0.21	0.20

**Tab. 22:** Übersicht Fenster Wohngebäude

	Nord	Ost	Süd	West
Glasanteil Fassade [%]	4.2	6.8	16.7	6.8
Verhältnis Glasfläche / Nutzfläche [-]	0.14			
g-Wert [-]	0.62	0.62	0.62	0.62
U-Wert Fenster [W/m <sup>2</sup> /K]	1.5	1.5	1.5	1.5
Verschattung ein	Horizontalstrahlung > 300 W/m <sup>2</sup> Raumtemperatur > 23.8 °C Aussenlufttemperatur (24h-Mittel) > 12 °C			
g-Werte mit Verschattung [-]	0.16	0.16	0.16	0.16

**Tab. 23:** Übersicht Lüftung Wohngebäude

Mechanische Lüftung	Nein
Luftwechsel [h <sup>-1</sup> ]	0.4
Betriebszeit	Montag – Sonntag, 0 <sup>00</sup> - 24 <sup>00</sup>
Nachtlüftung	Keine erhöhte Nachtlüftung
Sommer By-Pass WRG	-

## Anhang 5: Druckverlust im Kollektorkreis

Der gesamte Druckverlust des Kollektorkreises setzt sich zusammen als

$$\Delta p = \Delta p_{\text{Absorber}} + \Delta p_{\text{Verteilung}} + \Delta p_{\text{Wärmetauscher}} \quad \text{Gl.25}$$

Nebst Datenblattangaben ist auch eine Abschätzung mittels physikalischer Gesetzmässigkeiten möglich, wichtigste Kenngrösse ist dazu die Reynoldszahl  $Re$ , welche im Wesentlichen von der Fliessgeschwindigkeit des Fluids abhängt. Für Rohrströmungen gilt

$$Re = \frac{v \cdot d_i}{\nu} \quad \text{Gl.26}$$

$Re$	Reynoldszahl	$[-]$
$d_i$	Rohr – Innendurchmesser	$[m]$
$v$	Fliessgeschwindigkeit	$[m / s]$
$\nu$	kinematische Viskosität	$[m^2 / s]$

Im Bereich der kritischen Reynoldszahl  $Re_{\text{krit}} \approx 2300$  ändert sich der Strömungszustand zwischen laminar und turbulent, was Einfluss auf die Druckverluste hat. Für  $Re < 2300$  ist die Strömung laminar, darüber turbulent. Der Druckabfall in einem einzelnen Rohr berechnet sich daraus zu

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot \rho \cdot \frac{l}{d_i^5} \cdot \dot{V}^2 \quad \text{Gl.27}$$

$\rho$	Fluiddichte	$[kg / m^3]$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$[m^3 / s]$
$l$	Rohrlänge	$[m]$

mit

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re} & \text{falls } Re > 2300 \\ \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} & \text{falls } 2300 < Re < 10^5 \end{cases} \quad \text{Gl.28}$$

Zur Abschätzung des Druckverlustes in einer beispielhaften Anlage wird von  $100 \text{ m}^2$  Kollektorfläche in einem geschlossenen System ausgegangen. Das Kollektorfeld besteht aus je 20 m langen Bahnen des in Kapitel 1.10.1 beschriebenen nicht-abgedeckten Kollektors. Da sämtliche Absorberrohre parallel verschaltet sind, kann der Druckverlust des Feldes näherungsweise als derjenige eines einzelnen solchen Röhrchens abgeschätzt werden. Bei der zugrunde gelegten Geometrie werden 400 dieser Röhrchen verwendet, die gesamte Querschnittsfläche ist dadurch einem Rohr mit 15 cm Innendurchmesser äquivalent, was bei einem flächenspezifischen Durchfluss von  $50 \text{ l/m}^2/\text{h}$  zu einer sehr geringen Fliessgeschwindigkeit von  $0,08 \text{ m/s}$  führt. Entsprechend befindet sich die Strömung im laminaren Bereich, für Wasser als Fluid berechnet sich daraus mit Gl.27 ein theoretischer Druckverlust von gerundeten 10 mbar. Nicht berücksichtigt in dieser Rechnung sind zusätzliche Verlust durch die Verteilung des Fluidstromes auf die einzelnen Röhrchen im Verteil- resp. Sammelrohr am Anfang und Ende der Absorberbahn.

Zum Vergleich sind in [16] Messdaten zum beschriebenen Schwimmbadabsorbern verfügbar. Gemessen wurde jeweils der Druckabfall über einer Bahn mit 3 m resp. 12 m Länge, woraus ein Anteil des Druckverlustes aus dem Verteiler-/Sammler und den Absorberrohren extrahiert wurde. Es lässt sich bei den genannten Randbedingungen ein Druckabfall von etwa 5 mbar bestimmen, auch dem Datenblatt des Herstellers ist bei 20 m Bahnlänge ein

Druckverlust in derselben Größenordnung zu entnehmen (Abb. 54 links). Trotz Berücksichtigung von Verteiler- und Sammlerverlusten liegen die gemessenen Werte also sogar noch unter dem theoretisch berechneten Wert von 10 mbar.

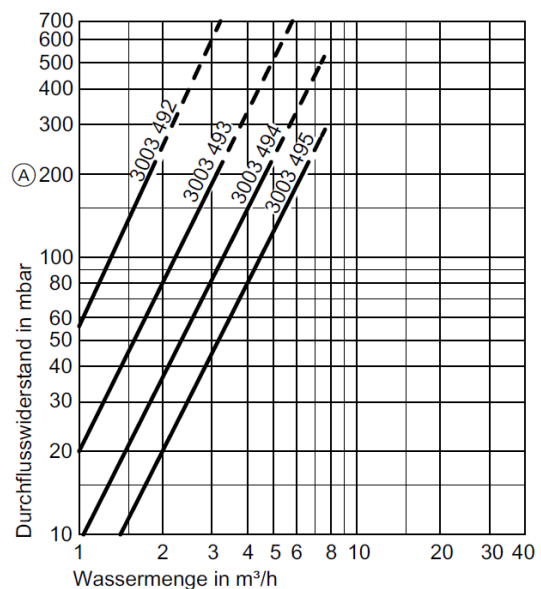
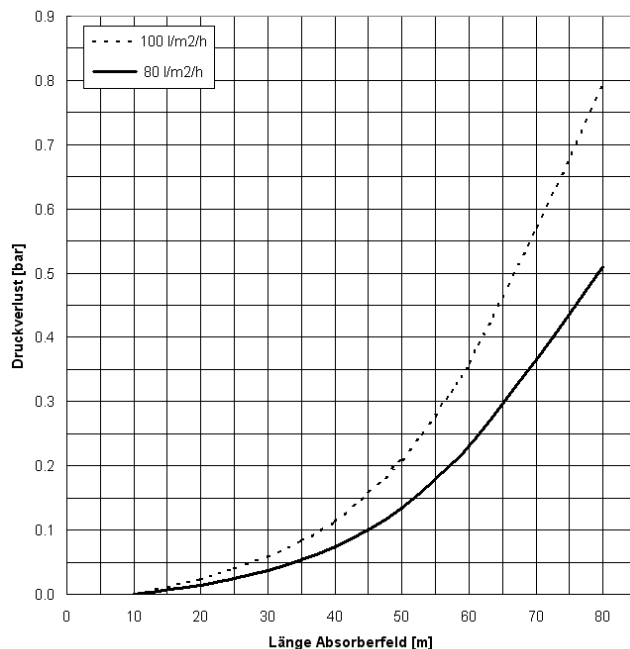
Für die Druckverluste in den Zuleitungen wird im Weiteren von einer Leitung der Nennweite DN 50 ausgegangen (Innendurchmesser 53 mm). Bei angenommenen 40 m Gesamtlänge ergibt sich mittels Gl.27 ein Druckverlust von 35 mbar, noch ohne Berücksichtigung von Krümmungen und Armaturen. Die Druckverluste an solchen Elementen lassen sich anhand ihren charakteristischen Widerstandsbeiwerten  $\zeta$  mit Gleichung Gl.29 bestimmen.

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Gl.29

$\zeta$	Widerstandsbeiwert	[-]
$v$	Fließgeschwindigkeit	[m / s]
$\rho$	Dichte des Fluids	[kg / m <sup>3</sup> ]

Die angenommenen zehn 90° Bogenstücke und eine Rückschlagklappe verursachen weitere 10 mbar Druckverlust; zusammen also rund 45 mbar für die Verteilung.



Ⓐ Empfohlener maximaler Durchflusswiderstand

**Abb. 54:** Druckverlustkurve Aqsol Schwimmbadabsorber (links, Grundlage: Planungsdaten Conergy) und Druckverlustkurve Viessmann Vitotrans 100 (rechts, Quelle: Datenblatt)

In Frage kommen dafür Speicher zur hydraulischen Entkopplung, falls beide Kreisläufe mit demselben Wärmeträgermedium befüllt werden können, andernfalls Plattenwärmetauscher. Die Abb. 54 rechts zeigt exemplarisch den Druckverlust eines Vitotrans 100 Plattenwärmetauschers der Fa. Viessmann. Bei einem Volumenstrom von 5 m<sup>3</sup>/h resultiert günstigstenfalls ein Druckverlust von etwa 125 mbar. Zusammen wird aus diesen Angaben ein Gesamtdruckverlust im Kollektorkreis von 200 mbar angenommen.