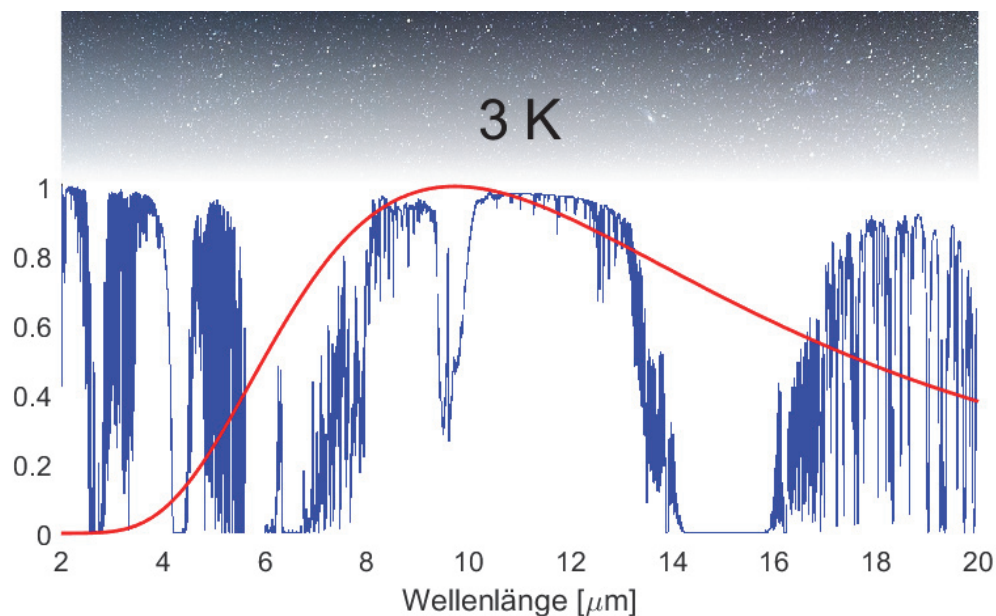




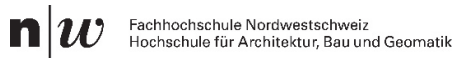
Schlussbericht vom 11.09.2019

CoolShift - Nächtliche Gebäudekühlung durch natürliche Konvektion und Strahlung

Eine Machbarkeitsstudie



Normalisiertes Transmissionsspektrum der Atmosphäre (blau) im Vergleich zum normalisierten Spektrum eines schwarzen Körpers bei 298 K (rot) über einer Infrarotaufnahme eines PV-Generatorfeldes [10].



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Datum: 11.09.2019

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau
Hofackerstrasse 30, CH-3142 Muttenz
<https://www.fhnw.ch/de/die-fhnw/hochschulen/architektur-bau-geomatik/institute/iebau>

Autor/in:

Manuel Koch, FHNW, manuel.koch@fhnw.ch
Ralf Dott, FHNW, ralf.dott@fhnw.ch
Ralph Eismann, FHNW, ralph.eismann@fhnw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Rolf Moser, moser@enerconom.ch
Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501926-01

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



Zusammenfassung

CoolShift ist ein Verfahren zur Gebäudekühlung, bei dem die Kühllast am Tag gespeichert wird, beispielsweise in der thermoaktiven Bauteilmasse (TABS), und während der Nacht an die Umgebung abgegeben wird. Zur Wärmeabgabe dienen photovoltaisch-thermische Kollektoren (PVT). Der Wärmetransport geschieht durch natürliche Konvektion an die Umgebungsluft und durch Strahlungsaustausch mit dem kalten Nachthimmel. In den meisten Nächten reicht passive Kühlung aus. Bei Bedarf erhöht eine Niederhubwärmepumpe die Abgabetemperatur und damit die Leistungsdichte der PVT-Kollektoren. Ein Ziel dieser Studie war der Nachweis der Machbarkeit durch Simulation. Dazu wurde ein Raum eines realen, nach Minergie-P erstellten Bürogebäudes unter Verwendung der Carnot-Toolbox in Matlab Simulink modelliert und in mehreren Varianten über eine Kühltage simuliert. Im Vergleich zu einer Kühltage, bestehend aus Kühltage, Kältemaschine und Rückkühler, ist der Bedarf elektrischer Energie bei CoolShift rund 3-mal geringer. Die Investitionskosten der untersuchten CoolShift Varianten sind einerseits etwas höher als die eines äquivalenten Vergleichssystems. Andererseits können die PVT-Kollektoren nicht nur als Stromlieferant und Wärmeübertrager zur Kühlung und Kühlung genutzt werden, sondern auch zur direkten Heizung in der Übergangszeit und als leistungsfähige Quelle für Wärmepumpen.

Résumé

CoolShift est un système de refroidissement de bâtiment dans lequel la charge de refroidissement est stockée pendant la journée, par exemple dans la masse des composants thermoactifs (TABS), et libérée dans l'environnement pendant la nuit. Les capteurs thermiques photovoltaïques (PVT) sont utilisés pour la dissipation de la chaleur. L'échange de chaleur s'effectue par convection naturelle avec l'air ambiant et par rayonnement avec le ciel nocturne froid. Dans la plupart des cas, le refroidissement passif est suffisant. Si nécessaire, une pompe à chaleur de faible puissance augmente la température de sortie et donc la densité surfacique de puissance des capteurs solaires. L'un des objectifs de cette étude était de prouver par simulation sa faisabilité. Une pièce, d'un immeuble de bureau existant et répondant au standard Minergie-P, a été modélisée sous Matlab Simulink avec les outils Carnot et plusieurs variantes ont été simulées sur une saison de refroidissement. La consommation électrique du système Coolshift étudié est environ 3 fois moins élevée qu'un système de refroidissement composé de voiles climatiques, d'une machine frigorifique et d'aéroréfrigérateurs. Le coût d'investissement du système Coolshift étudié est un peu plus élevé qu'un système de refroidissement équivalent classique. Ce qui peut être compensé par le fait que les capteurs thermiques photovoltaïques soient utilisés comme producteur d'électricité et échangeur de chaleur lors de la période de refroidissement, mais également comme source de chaleur directe pour le chauffage ou la pompe à chaleur lors des périodes de transition.

Summary

CoolShift is a building cooling concept in which the cooling load is stored during the day, for example in the thermoactive building mass (TABS), and released into the environment during the night. Photovoltaic thermal collectors (PVT) are used for heat dissipation. The heat is transferred by natural convection to the ambient air and by radiation exchange with the cold sky. In most nights, passive cooling is sufficient. If necessary, a low-lift heat pump increases the output temperature and thus the power density of the PVT collectors. One aim of this study was to prove feasibility by simulation. A room in a real office building constructed according to Minergie-P was modelled using the Carnot toolbox in Matlab Simulink and simulated in several variants over a cooling season. Compared to a



cooling system consisting of cooling sails, chiller and recooling, the electrical energy requirement for CoolShift is about 3 times lower. Because of the high costs of the PVT-collectors the investment costs of the CoolShift variant are higher than those of the equivalent conventional system. On the other hand, the PVT collectors can be used not only as electricity source and as heat exchangers for cooling purposes, but also for direct heating during the transition period and as a powerful source for heat pumps.

Take-home messages

- Der elektrische Energiebedarf zur Kühlung von Bürogebäuden ist mit CoolShift um einen Faktor 2 bis 3 tiefer als der eines konventionellen Vergleichssystems.
- Die Abgabe der Kühlleistung erfolgt geräuschlos.
- Die zur Kühlung verwendeten Kollektoren können direkt oder über eine Wärmepumpe Heizenergie liefern.
- Der Mehrfachnutzen von PVT-Kollektoren zur Stromproduktion, Kühlung und Wärme Gewinnung vermeidet Konkurrenzsituationen bei beschränkter Dachfläche.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé.....	3
Summary	3
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung.....	7
2 Methodik	8
2.1 Wetter, Raum und interne Lasten.....	8
2.2 Lüftung, Verschattung und Heizung	8
2.3 Modellierung der Kältemaschine	9
2.4 Konventionelle Kühlung	9
2.5 CoolShift	9
2.6 Auswertung	10
3 Resultate	11
3.1 Kalibrierung des Raummodells	11
3.2 Vergleich der Kühlsysteme.....	11
3.3 Detailbetrachtungen	12
4 Kostenschätzung	14
5 Diskussion und Schlussfolgerungen	16
6 Ausblick	17
7 Dank	18
8 Referenzen.....	18
9 Anhang.....	19
9.1 Simulationsparameter	19



Abkürzungsverzeichnis

IEBau	Institut Energie am Bau
CS	CoolShift
KK	Konventionelle Kühlung
LK	Luftkühlung
PK	Passivkühlung
EER	Energy Efficiency Ratio
PV	Photovoltaik
PVT	Photovoltaisch-thermisch
KM	Kältemaschine
L/W	Luft/Wasser
S/W	Sole/Wasser
TABS	Thermisch aktivierte Bauteilsysteme
UST	Unverglast thermisch
Q	Thermische Energie
E	Elektrische Energie
P	Leistung
el	Elektrisch
CHF	Schweizer Franken
EUR	Euro

1 Einleitung

Aufgrund der fortschreitenden Klimaerwärmung sowie steigender Komfortbedürfnisse wird für die nächsten Jahrzehnte ein starkes Wachstum der zur Gebäudekühlung aufgewendeten Energie erwartet [1][2]. Bei der Kühlung über die Klimaanlage oder Kühlsegel wird die Kühlleistung mittels bedarfsgesteuerter Kältemaschinen erbracht. Dies hat folgende Nachteile: Die Kältemaschine arbeitet bei hohen Umgebungstemperaturen und entsprechend hohen Temperaturhuben. Verglichen mit Niederhubanwendungen sind die erreichbaren Wirkungsgrade zwangsläufig tiefer. Der Betrieb der Kältemaschinen fällt grösstenteils in das Zeitfenster zwischen Nachmittag und Abend, welches bereits den höchsten Stromverbrauch hat [3]. Bei nächtlichen Lufttemperaturen über 25°C ist zudem die Kühlung durch Lüftung nicht möglich.

Es ist daher wünschenswert, in der Nacht zu kühlen und gleichzeitig den Effekt der Abstrahlung in den kalten Nachthimmel zu nutzen. Der Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen Erde und Weltall kann in einer äquivalenten Schwarzkörper-Temperatur des Himmels ausgedrückt werden. Diese kann deutlich unter der konvektiven Umgebungstemperatur liegen. Dieser Effekt wurde schon vor Jahrtausenden zur Eisproduktion genutzt [4]. Abb. 1 zeigt ein Becken für die nächtliche Eisproduktion und einen Speicher für Eis im Iran.

Das Prinzip der nächtlichen Kühlung durch freie Konvektion und Strahlungsaustausch wurde in mehrere Arbeiten untersucht [7]-[9], [11]-[12]. Als Wärmeübertrager können unverglaste Solarkollektoren und photovoltaisch-thermische Kollektoren (PVT) eingesetzt werden. Die niedrige Umgebungs- und Himmelstemperatur ermöglichen eine effiziente Wärmeabgabe. Durch den Strahlungsanteil ist sogar eine passive Kühlung unter die Umgebungstemperatur möglich. Einige dieser Studien haben den hohen Flächenbedarf der Kollektoren kritisiert [7]-[9]. Das Konzept «CoolShift» löst dieses Problem mittels einer Kältemaschine, welche bei Bedarf die Abgabetemperatur der Kollektoren erhöht. Verglichen mit dem konventionellen, bedarfsgesteuerten Ansatz arbeitet die Kältemaschine aufgrund der tieferen nächtlichen Umgebungstemperaturen und des kleineren Temperaturhubes bei wesentlich höheren Wirkungsgraden. Abb. 2 zeigt die gute Kongruenz von Schwarzkörperspektrum bei 298 K und dem Transmissionsspektrum der Atmosphäre. Dies ist der Grund für den hohen erzielbaren Beitrag der Abstrahlung zur Kühlleistung.



Abb. 1: Becken zur nächtlichen Eisproduktion (links) und Eisspeicher (rechts) im Iran [5][6]

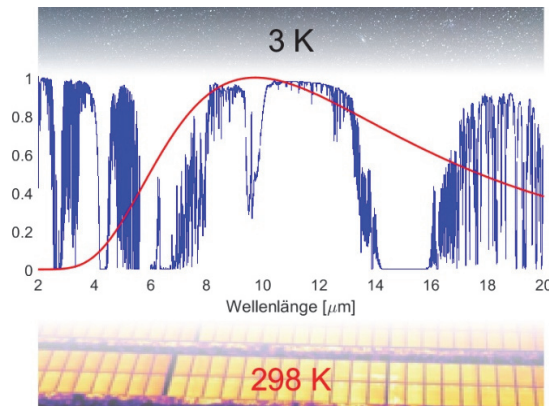


Abb. 2: Arbeitsprinzip der nächtlichen Strahlungskühlung. Oben: Nachthimmel. Mitte: Normierte Schwarzkörper-Emission bei 298 K (rot) und Transmissionsspektrum der Atmosphäre (blau). Unten: Infrarotaufnahme eines PV-Generatorfeldes. [10]

Dieses Vorprojekt knüpft an zwei am IEBau bereits durchgeführte Studien an [11][12]. Das Ziel ist der Nachweis der technischen Machbarkeit und die Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials mittels numerischer Simulationen.

2 Methodik

Zur Evaluation des CoolShift-Konzepts werden ein Konferenzraum eines existierenden Bürogebäudes (Minergie P-ECO) sowie drei Kühlsysteme mit Matlab/Simulink unter Verwendung der CARNOT Toolbox, Version 6.3 [13] modelliert:

- Nächtliche Lüftungskühlung.
- konventionelle Luft/Wasser-Kältemaschine mit deckenmontierten Kühlseglern.
- CoolShift mit PVT-Kollektoren, einer Sole/Wasser-Kältemaschine und einer TABS-Decke.

Bei ausreichend tiefer Umgebungstemperatur wird das Gebäude über die PVT-Kollektoren passiv gekühlt. Im Bedarfsfall erhöht die Kältemaschine die Abgabetemperatur. Alle Systeme werden mit lokalen Wetterdaten vom 15. April bis zum 30. September simuliert. Die Tage im April dienen als Einschwingzeit und werden für die Auswertung ignoriert. Die Auswahl des Gebäudes, des zu modellierenden Raumes und die für den Vergleich verwendeten Kühlkonzepte wurde durch die Jobst Willers AG massgeblich mitbestimmt.

2.1 Wetter, Raum und interne Lasten

Ein Wetterdatensatz für Basel-Binningen [14] mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10.5 °C und einer Jahressonneneinstrahlung von 1035 kWh/m² wird verwendet. Der Raum ist im dritten Stock mit einer Süd-West-Ausrichtung. Die Bodenfläche beträgt 43 m², die Fensterfläche 18.3 m². Es wird angenommen, dass eine interne Last von 640 W den Raum zwischen 8:00 und 17:00 aufheizt. Auf der Gegenseite von Decke, Boden und Innenwänden wird die gleiche Temperatur wie im betrachteten Raum angenommen. Demzufolge gibt es keine Energieeinträge aus benachbarten Räumen.

2.2 Lüftung, Verschattung und Heizung

Die Taglüftung läuft von 7:00 bis 20:00 mit einer Luftaustauschrate von 44.9 m³/h und einer Wärmerückgewinnung von 80 %. Nachtauskühlung durch Zwangslüftung erfolgt zwischen 0:00 und 6:00, sofern die Raumtemperatur mindestens 8 K über der Umgebungstemperatur liegt. Die



Einschalttemperatur liegt bei 24 °C und die Zieltemperatur bei 20 °C. Bei der Nachauskühlung ist die Wärmerückgewinnung ausgeschaltet. Die Fenster werden durch aussenliegende Lamellenstoren verschattet, sobald die Bestrahlungsstärke auf der Fassadenfläche 180 W/m² übersteigt. Es wird angenommen, dass die Verschattung den solaren Leistungseintrag um 80 % senkt. Die verbleibenden 20 % bilden den restlichen Lichtdurchlass sowie die Wärmeübertragung zwischen den aufgeheizten Verschattungselementen und dem Fenster ab. Eine idealisierte Heizung hält die Raumtemperatur zwischen 20 °C und 21 °C. Deren Einfluss ist für die betrachtete Zeitspanne jedoch vernachlässigbar.

2.3 Modellierung der Kältemaschine

Die Modellierung der Kältemaschine ist idealisiert. Der Kompressor hat eine Leistung zwischen 120 W und 400 W. Der Wirkungsgrad (EER) und damit die thermische Leistung wird mit einer konstanten Carnot-Effizienz von 40 % und konstantem ΔT für Kondensator und Verdampfer [15][16] in Abhängigkeit des Kältemaschinen-Typs berechnet. Ein PI-Regler regelt die Ausgangstemperatur auf der Kälteseite.

2.4 Konventionelle Kühlung

Die konventionelle Kühlung besteht aus einer Luft/Wasser-Kältemaschine, welche Wasser mit einer Temperatur von 4 K unter der Raumtemperatur liefert. Das Abgabesystem besteht aus 12 Kühlsegeln des Typs Kigo Swiss [17] mit einer Gesamtfläche von 24.6 m². Die Raumtemperatur wird in einem Band von 2 K unterhalb der Obergrenze in Abb. 3 gehalten [18]. Die verwendete Raumtemperatur ist ein gleitender Mittelwert der letzten 48 h. Zum Vergleich mit den PVT-Kollektoren für CoolShift wird eine PV-Anlage mit identischen elektrischen Eigenschaften angenommen.

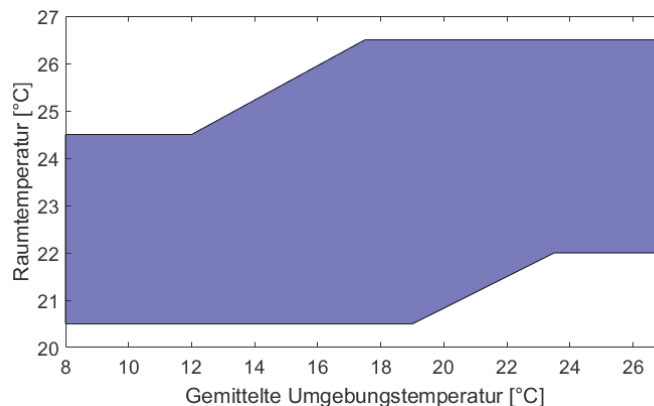


Abb. 3: Raumtemperatur in Abhängigkeit der gemittelten Umgebungstemperatur

2.5 CoolShift

Abb. 4 zeigt das Hydraulikschema von CoolShift und konventioneller Kühlung. Vier PVT-Kollektoren des Typs SOLINK [19] mit einer Gesamtfläche von 7.92 m² dienen der Wärmeabgabe. Diese Kollektoren bestehen aus einem PV-Modul und einem auf dessen Rückseite angeordneten Wärmeübertrager. Dieser besitzt metallische Lamellen, die einerseits mit dem Modul im Kontakt sind und andererseits einen guten Wärmeübergang zur Umgebungsluft ermöglichen. Die Kollektoren sind nach Süden ausgerichtet und haben eine Neigung von 30°. Der Kreislauf enthält ein 70/30 % Wasser-Glykol-Gemisch. Auf der Gebäudeseite wird Wasser verwendet. Die Kältemaschine liefert Wasser mit



einer Temperatur von 2 K unter der Raumtemperatur an eine TABS-Decke. Im Gegensatz zu den Referenzsystemen ist die nächtliche Lüftungskühlung ausgeschaltet. CoolShift ist wie folgt geregelt: Der Kühlbetrieb ist zwischen 0:00 und 12:00 freigegeben, sofern Kühlbedarf vorliegt (siehe Kapitel 3.1) und die Bestrahlungsstärke auf die Horizontale unter 50 W/m^2 liegt. Der Kühlbetrieb wird beendet, sobald eine Raumtemperatur von 4 K unter der Obergrenze des Komfortbands in Abb. 3 erreicht wird. Die theoretische, passive Kühlleistung wird jederzeit mit einem Modell der PVT-Kollektoren geschätzt, welches mit den aktuellen Wetterdaten sowie einer Vorlauftemperatur von 1 K unterhalb der Raumtemperatur arbeitet. Liegt die geschätzte Leistung unterhalb einer bestimmten Grenze (P_{schalt}), wird die Kältemaschine eingeschaltet.

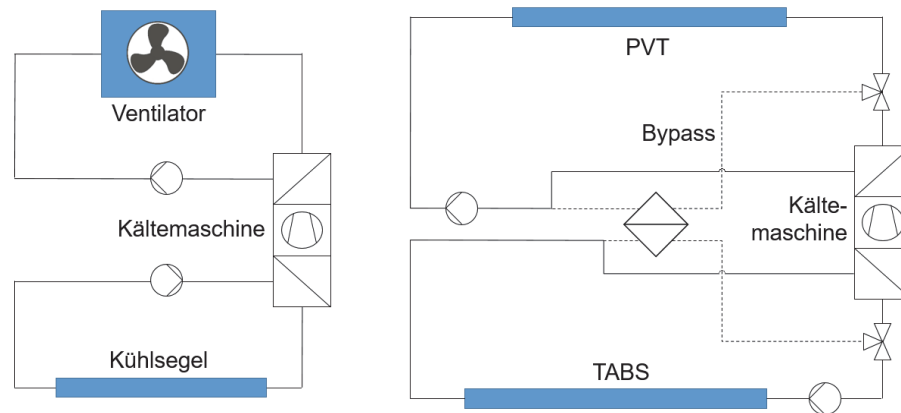


Abb. 4: Hydraulikschema für konventionelle Kühlung (links) und CoolShift (rechts).

2.6 Auswertung

Die Qualität der Regelung der Raumtemperatur wird durch ein Integral der Abweichung aus dem Komfortband gemäss Abb. 3 für jeden Tag zwischen 8:00 und 17:00 quantifiziert. Die übrigen elektrischen und thermischen Kennzahlen sind in Tab. 1 aufgelistet. Die Kühlenergie wird in drei Komponenten aufgeteilt: Lüftungskühlung, Passivkühlung über die PVT-Kollektoren sowie Kühlung über die Kältemaschine. Der Energiebedarf der Förderpumpen wird berücksichtigt. Für die Lüftungskühlung wird die elektrische und thermische Leistung integriert, wenn die Lüftung zur Kühlung beiträgt. Die elektrische Überschussenergie ist definiert als die von der PV-Anlage gelieferte Energie abzüglich der gesamten elektrischen Energie, welche für die Kühlung verwendet wird.

$T_{\text{abweichung}}$	Abweichung aus Komfortband
$Q_{\text{kühl,tot}}$	Totale thermische Energie Kühlung
$E_{\text{el,kühl,tot}}$	Totale elektrische Energie Kühlung
EER_{sys}	EER Gesamtsystem
E_{PV}	PV-Strom
$E_{\text{el,überschuss}}$	Elektrische Überschussenergie
$E_{\text{el,LK}}$	Elektrische Energie Lüftungskühlung
$Q_{\text{kühl,LK}}$	Thermische Energie Lüftungskühlung
$E_{\text{el,KM}}$	Elektrische Energie Kältemaschine
$Q_{\text{kühl,KM}}$	Thermische Energie Kältemaschine
$E_{\text{el,PK}}$	Elektrische Energie Passivkühlung
$Q_{\text{kühl,PK}}$	Thermische Energie Passivkühlung



3 Resultate

3.1 Kalibrierung des Raummodells

Das Raummodell mit Taglüftung und internen Lasten wird über ein Jahr simuliert. Eine idealisierte Heizung und Kühlung hält die Raumtemperatur zwischen 21 °C und dem Wert 0.5 K unter der Obergrenze des Komfortbandes nach Abb. 3. Aus dieser Simulation werden eine Heizgrenze von 11 °C und eine Kühlgrenze von 13 °C Umgebungstemperatur abgeleitet. Die Heizenergie gemäss Tab. 2 ist eher niedrig, was mit der guten Isolation, viel solarer Einstrahlung und einer hohen spezifischen internen Last begründet wird.

Modus	Raum	Pro Fläche
Heizen	647 kWh/a	15.0 kWh/m ² a
Kühlen	433 kWh/a	10.1 kWh/m ² a

Tab. 2: Heiz- und Kühlenergie pro Jahr

3.2 Vergleich der Kühlsysteme

Tab. 3 vergleicht die Kennzahlen für vier CoolShift-Varianten mit den beiden Referenzsystemen. Wie erwartet hat die Variante mit nächtlicher Lüftungskühlung exzessive Temperaturabweichungen aber einen geringen Stromverbrauch. Die Variante mit konventioneller Kühlung hingegen hat keine Temperaturabweichungen. Die abgegebene Kühlenergie ist höher als in der idealisierten Kalibrations-Simulation in Kapitel 3.1, da die Raumtemperatur in einem Band von 2 K unterhalb der Obergrenze in Abb. 3 gehalten wird und nicht bei 0.5 K unterhalb der Referenztemperatur.

		Nächtliche Lüftungskühlung	Konventionelle Kühlung	CoolShift, ohne Kältemaschine	CoolShift, P _{schalt} = 500 W	CoolShift, P _{schalt} = 750 W	CoolShift, P _{schalt} = 1000 W
T _{abweichung}	Kh	4031	0.0	24.7	2.2	0.1	0.0
Q _{kühl,tot}	kWh	125.7	492.4	611.3	620.0	626.1	628.5
E _{el,kühl,tot}	kWh	17.4	100.9	36.0	40.3	44.8	49.1
EER _{sys}		7.2	4.9	17.0	15.4	14.0	12.8
E _{PV}	kWh	743.1	743.1	775.3	775.3	775.3	775.3
E _{el,überschuss}	kWh	725.7	642.2	739.3	735.0	730.5	726.2
E _{el,LK}	kWh	17.4	10.2				
Q _{kühl,LK}	kWh	125.7	62.2				
E _{el,KM}	kWh		90.7		8.1	18.7	31.6
Q _{cool,KM}	kWh		430.2		59.7	144.0	257.3
E _{el,PK}	kWh			36.0	32.3	26.1	17.5
Q _{kühl,PK}	kWh			611.3	560.3	482.1	371.2

Tab. 3: Vergleich der Kühlsysteme

Die abgegebene Kühlenergie ist bei den CoolShift-Varianten aus zwei Gründen höher als bei der konventionellen Kühlung: Die thermischen Verluste durch den zeitlichen Versatz zwischen Kühlung und Kühlungsbedarf sowie gelegentliche Unterkühlung, da die Zieltemperatur der nächtlichen Kühlung für einen heissen Folgetag ausgelegt ist. CoolShift ohne Kältemaschine hat einen hohen EER, aber auch signifikante Temperaturabweichungen. Zunehmender Einsatz der Kältemaschine verringert die Temperaturabweichungen stark, wobei auch der EER sinkt. Bei allen CoolShift-Varianten dominiert die Passivkühlung.

3.3 Detailbetrachtungen

Abb. 5 vergleicht die über alle Tage gemittelte Raumtemperatur mit dem gemittelten Komfortband gemäss Abb. 3. Alle Temperaturen steigen aufgrund der internen Lasten ab 8:00 und sinken ab 17:00 um ca. 2 K. Die Varianten Nachtkühlung und konventionelle Kühlung zeigen um 0:00 und 6:00 kleine Temperatursprünge, welche durch das Ein- und Ausschalten der nächtlichen Lüftungskühlung sowie Restwärme in der Gebäudemasse verursacht werden. Bei der konventionellen Kühlung erreicht die Temperatur um 10:00 ihren Höhepunkt, bevor der Einschaltzeitpunkt der Kühlung erreicht wird. Die Temperaturverläufe CoolShift-Varianten sind alle ähnlich. Die Raumtemperatur wird nachts gesenkt und steigt während des Tags kontinuierlich an. Da mit CoolShift die Deckenmasse gekühlt wird, sind keine Effekte durch Restwärme beobachtbar. Verglichen mit der Decke sind die anderen Innenflächen vernachlässigbar. Der Boden hat eine niedrige Leitfähigkeit, die Aussenwände bestehen grösstenteils aus Fensterfläche. Die Innenwände sind sehr leicht, sodass ihre Wärmekapazität näherungsweise vernachlässigt werden kann.

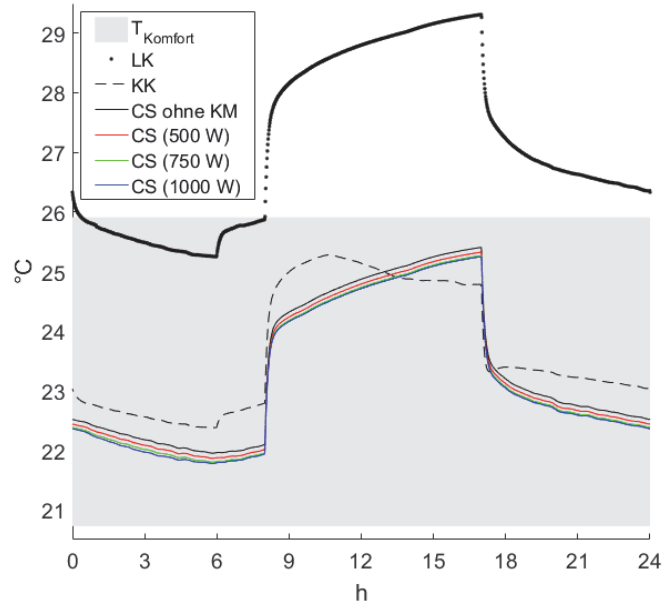


Abb. 5: Über alle Tage gemittelte Raumtemperatur und gemitteltes Komfortband

Nachfolgend wird die Variante CoolShift mit $P_{\text{schalt}} = 750 \text{ W}$ detaillierter betrachtet. Abb. 6 zeigt einen 10-tägigen Auszug der Raumtemperatur, der Umgebungstemperatur und des Komfortbandes. Der Tag 200 weist mit ca. 35°C die höchste Umgebungstemperatur der Simulationsperiode auf. Dabei tangiert die Raumtemperatur die zulässige Obergrenze. Die Untergrenze wird jedoch auch während der kälteren Tage 194-197 nie erreicht.

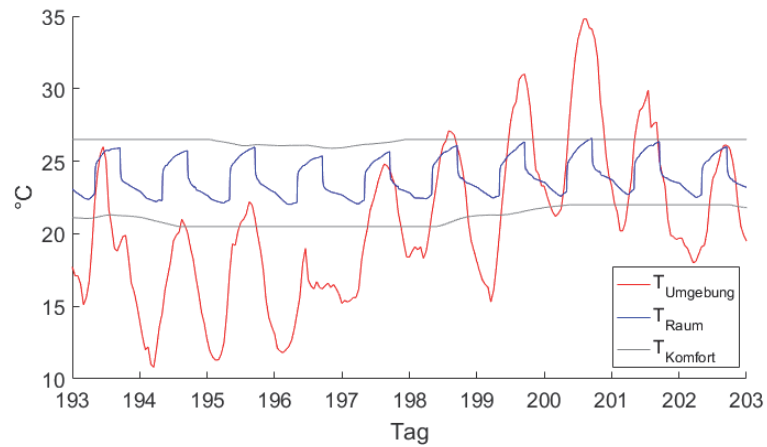


Abb. 6: Auszug Temperaturverlauf für CoolShift (750 W)

Abb. 7 vergleicht die Leistungsschätzung der Regelung (siehe Kapitel 2.5) mit der tatsächlichen Wärmeabgabe der PVT-Kollektoren, wenn die Kältemaschine nicht läuft. Die Schätzung korreliert zu 82 % mit dem simulierten Echtwert. In der Simulation sind das PVT-Modell und die Wetterdaten fehlerfrei. Bei einer praktischen Implementierung muss von einer schwächeren Korrelation ausgegangen werden.

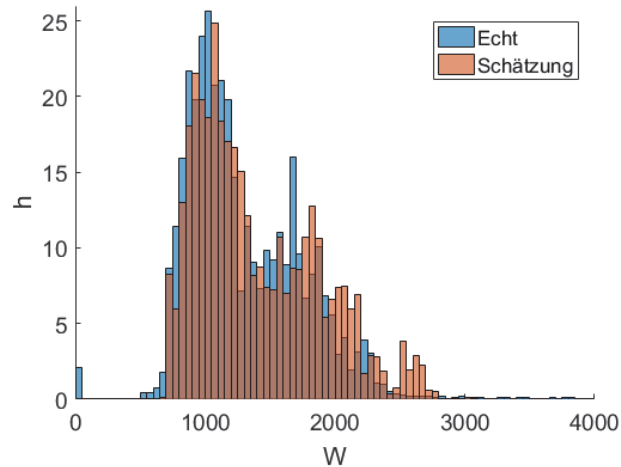


Abb. 7: Leistungsschätzung Passivkühlung für CoolShift (750 W)

Abb. 8 zeigt den Betriebszustand von CoolShift über die gesamte Simulationsperiode. Es besteht eine klare Dominanz des passiven Kühlbetriebs. Die Kältemaschine läuft nur während besonders heißen Phasen, wie der um den Tag 200 in Abb. 6.

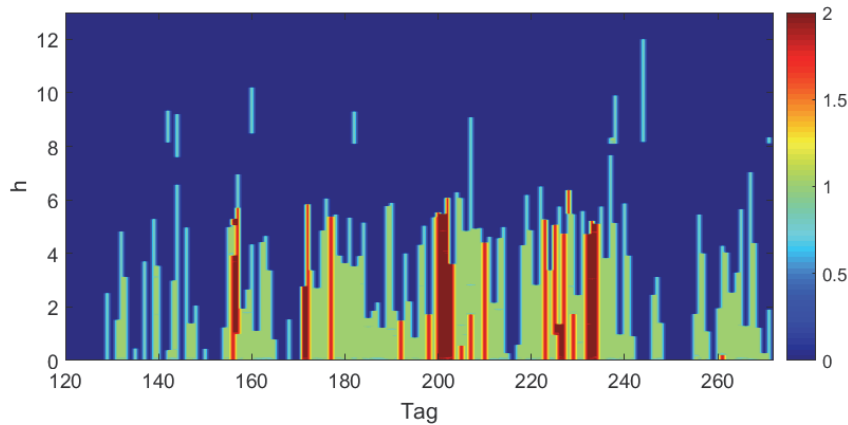


Abb. 8: Regelung für CoolShift (750 W). 0 = aus; 1 = Passivkühlung; 2 = Aktivkühlung

4 Kostenschätzung

Tab. 4 zeigt eine vergleichende Kostenschätzung für CoolShift und konventionelle Kühlung mit TABS und Kühlsegeln. Komponenten, welche für alle Konfigurationen gleich sind (z.B. Wechselrichter, Verteilleitungen, etc.), werden nicht berücksichtigt. Der Vergleich basiert auf Listenpreisen inklusive Rabatten der eingesetzten Komponenten. Die jeweiligen Kostenpunkte werden in den nachfolgenden Abschnitten begründet.

		CoolShift, TABS	CoolShift, Kühlsegel	Konventionell, TABS	Konventionell, Kühlsegel
L/W-KM mit Ventilator (82 kW)	[a]				70'000
L/W-KM mit Ventilator (48 kW)	[a]			40'000	
S/W-KM (48 kW)	[a]	40'000	40'000		
PVT-Feld	[b]	163'000	163'000		
PV-Anlage	[c]			41'000	41'000
Montage PV/PVT	[b,c]	16'000	16'000	11'000	11'000
TABS-Decke	[d]	124'000		124'000	
Kühlsegel	[d]		495'000		495'000
Bypass	[e]	6'000	6'000	6'000	
Summe (CHF)		349'000	720'000	222'000	617'000

Tab. 4: Gesamtkostenschätzung für vier Varianten in CHF

[a] Der simulierte Raum hat eine Fläche von 43 m². Das Gebäude hat eine totale Nutzfläche von 2060.5 m². Daraus ergibt sich für die Auslegung ein gerundetes Flächenverhältnis von 48. Nimmt man



40 W/m² Kühlleistung für die konventionelle Kühlung mit Kühlsegeln an, ergibt sich eine Leistung von ca. 82 kW. Die idealisierte Sole/Wasser-Kältemaschine in den CoolShift-Simulationen liefert eine Kühlleistung zwischen 1.5-2.0 kW bei einer elektrischen Leistung zwischen 150-200 W. Der niedrige Temperaturhub erklärt den hohen resultierenden EER um 10. Nimmt man für Kältemaschinen einen Standard-EER um 4.0 an, würde ein Gerät mit einer nominellen thermischen Leistung von 600-800 W ausreichen. Unter der Annahme, dass der EER in Realität etwas tiefer liegen würde als in der Simulation, wird die Kühlleistung für die Auslegung der Kältemaschine auf 1 kW aufgerundet. Aufskaliert auf das gesamte Gebäude ergeben sich damit 48 kW Kühlleistung. Es wird angenommen, dass für die konventionelle Kühlung mit TABS eine Luft/Wasser-Kältemaschine mit der gleichen Leistung zu gleichen Kosten verwendet werden kann. Die entsprechenden Kosten in Tab. 4 wurden in Zusammenarbeit mit der Jobst Willers AG geschätzt. Auffällig im Vergleich der Varianten ist die Dominanz der Kühlsegel. Die Varianten mit TABS sind verhältnismässig günstig und bei sorgfältiger Planung auch technisch problemlos umsetzbar.

[b] Tab. 5 zeigt eine Offerte für 200 PV-Module. Ein Umrechnungskurs von 1.11 CHF/EUR resultieren Kosten von 40'748.10 CHF. Diese werden auf 41'000 CHF gerundet. Der Montageaufwand (Vorbereitung Flachdach, Ständermontage, Modulmontage, Verkabelung, Installation, etc.) wird auf 10 Arbeitstage zu 8 h bei einem Stundensatz von 130 CHF geschätzt, zuzüglich Montagematerial (Bauschuttmatten, etc.) im Wert von 1000 CHF. Daraus resultieren 11'400 CHF für die Montage. Dieser Wert wird auf 11'000 CHF gerundet.

Ständer	7'950 EUR
Transport und Zoll	1'760 EUR
PV-Module	27'000 EUR
Summe	36'710 EUR

Tab. 5: Offerte für 200 PV-Module

[c] Tab. 6 zeigt eine Offerte für die PVT-Kollektoren. Auf die Anfrage für 200 Module wurde vom Hersteller eine Konfiguration aus 29 Reihen mit sieben Kollektoren (total 203 Kollektoren) vorgeschlagen. Mit dem obigen Umrechnungskurs und den angebotenen 29 % Rabat resultieren Kosten von 153'395.23 CHF. Dieser wird auf 153'000 CHF gerundet. Zusätzlich wird mit 100 m Anschlussleitungen für 10'000 CHF gerechnet. Die Gesamtkosten betragen damit 163'000 CHF.

	Stück	EUR/Stück	EUR
PVT-Kollektoren, Reihe aus 7 Stück	29	6685.7	193'885.30
Verbindungs-schläuche	29	26	754.00
Summe			194'639.30

Tab. 6: Offerte für 203 PVT-Kollektoren

Für den Montageaufwand werden die Annahmen für die PV-Anlage übernommen, jedoch mit 14 Arbeitstagen. Daraus resultieren 15'560 CHF, gerundet auf 16'000 CHF.

[d] Die Kosten für eine TABS-Decke und an der Decke montierte Kühlsegel (mit oder ohne thermische Anbindung an die Decke) wurden von der Jobst Willers AG auf 60 CHF/m² und 420 CHF/m² geschätzt, inklusive Montage. Für TABS wird eine Aktivierung der gesamten Deckenfläche von 2060.5 m² angenommen. Die Kühlsegel im Testraum mit 43 m² haben eine Fläche von 24.6 m², was einem



Anteil von 57.2 % entspricht. Dieser Anteil wird auf das gesamte Gebäude angewandt, was einer Kühlsegelfläche von 1178.8 m² entspricht. Daraus resultieren Gesamtkosten von 123'630 CHF für TABS und 495'095 CHF für die Kühlsegel. Die Werte werden gerundet auf 124'000 CHF und 495'000 CHF.

[e] Die Kosten für den Bypass der Kältemaschine werden vom IEBau gemäss Tab. 7 auf 6'200 CHF geschätzt. Dieser Wert wird auf 6'000 CHF gerundet.

	Menge	CHF/Menge	CHF
Rohr	10 m	100	1'000
3-Wege Ventil	2	1'000	2'000
T-Stück	2	100	200
Wärmetauscher	1		2'000
Servomotor	2	500	1'000
Summe			6'200

Tab. 7: Kosten für den Bypass der Kältemaschine

In der Simulation verbraucht die konventionelle Kühlung mit Kühlsegeln 100 kWh Strom. Multipliziert mit einem Skalierungsfaktor von 48 für das gesamte Gebäude und einem Strompreis von 0.25 CHF/kWh ergeben sich Stromkosten von 1200 CHF. Eine Verdopplung der Energieeffizienz würde 600 CHF pro Jahr einsparen. Verglichen mit den geschätzten Systemkosten in Tab. 4 sind diese Beträge gering.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Für das gegebene Gebäude und Klima liegt der Stromverbrauch der Kühlung mit CoolShift zwischen 51 % und 64 % unter dem des konventionellen Referenzsystems. Jedoch wird das Komfortband gelegentlich nicht eingehalten. Die Raumtemperatur kann mit CoolShift während des Tages nicht geregelt werden und steigt von Morgen bis Abend kontinuierlich an. Aufgrund der konstanten internen Last ist auch der tägliche Temperaturanstieg relativ konstant. Daher ist es in der Simulation möglich, Über- und Unterkühlung des Raums mit einer einfachen Regellogik grösstenteils zu verhindern. In der Realität kann die interne Last von Tag zu Tag stark variieren. Um dies zu kompensieren wäre eine komplexere Regelung notwendig. Bemerkenswert ist ausserdem der hohe Anteil der Passivkühlung bei allen CoolShift-Varianten. Ein weiterer Vorteil von CoolShift ist die Kühlung der PVT-Module durch die rückseitigen Wärmetauscher, welche den PV-Ertrag in der Simulation auch ohne Fluidzirkulation um 4.3 % steigert.

Ursprünglich war CoolShift in Kombination mit abgehängten Kühlsegeln vorgesehen. Simulationen haben jedoch gezeigt, dass die thermische Speicherkapazität aufgrund mangelnder Aktivierung der Gebäudemasse zu gering ist. Diese Variante wird daher nicht weiter diskutiert.

Diese Vorstudie zeigt deutlich das energetische Potenzial von CoolShift gegenüber konventionellen Lösungen. Die wirtschaftliche Beurteilung ist jedoch bei Weitem nicht abschliessend. Durch die Wahl alternativer Produkte für die Schlüsselkomponenten kann die Preisstruktur deutlich variieren. Die in dieser Arbeit untersuchte CoolShift-Variante ermöglicht nicht nur das Kühlen, sondern auch die Wärmegewinnung für Heizzwecke und die Stromproduktion. Diese Mehrfachnutzung eröffnet ein Potenzial zur Senkung der Gesamtsystemkosten, das im Rahmen dieser Studie jedoch nicht analysiert werden konnte.



6 Ausblick

Die positiven Ergebnisse dieser Studie legen nahe, das Konzept CoolShift zu vertiefen und im Hinblick auf die Umsetzung im Markt weiter zu entwickeln, entsprechend der Zielsetzungen im Task 5.1.2 «Future Cooling Solutions» des SCCER FEEB&D, an dem sich die FHNW beteiligt. Dabei stehen folgende Aufgaben und Fragestellungen im Vordergrund:

- Entwicklung und Validierung von Werkzeugen für Planung und quantitative Dimensionierung.
- Entwicklung von Entscheidungshilfen für die Wahl der Systemvariante nach wirtschaftlichen, energetischen und gebäudetechnischen Kriterien.
- Entwurf eines Konzeptes zur prädiktiven Regelung zur Erhöhung der Systemeffizienz und des Komforts.

Diese Ziele erfordern eine vertiefte Analyse der systemtechnischen Möglichkeiten sowie die Modellierung und experimentelle Charakterisierung von Komponenten. Dies wird im Folgenden erläutert:

Die Möglichkeiten der thermischen Aktivierung des Gebäudes sollen klassifiziert und durch geeignete Modelle abgebildet und simuliert werden. Ausserdem verwendet CoolShift PVT-Kollektoren auf eine Art, für die sie weder ausgelegt noch getestet sind. Dasselbe gilt für unverglaste Kollektoren. Für die Entwicklung und Optimierung von Kollektoren für diesen Anwendungszweck sowie für die Dimensionierung von Anlagen müssen geeignete Modelle hergeleitet und durch Experimente validiert werden. Des Weiteren ist die Modellierung der Kältemaschinen stark idealisiert. Diese wird durch auf Messdaten basierendes Modell ersetzt.

Im Gegensatz zu dieser Vorstudie soll langfristig auch der Heizfall betrachtet werden. Da PVT- und UST-Kollektoren alleine selten ausreichende Temperaturen für die Raumheizung liefern, ist auch in diesem Fall die Kombination mit einer Kältemaschine/Wärmepumpe sinnvoll. Besonders im Frühling könnte jedoch ein signifikanter Anteil an Passivheizung möglich sein.

Tab. 8 zeigt eine Übersicht der möglichen Systemkonfigurationen. Konventionelle Luft/Wasser-Wärmepumpen dienen als Referenz. CoolShift wird entweder mit einem zusätzlichen Luft/Sole-Wärmetauscher oder einer Bodenquelle ergänzt. Dies ermöglicht bei Bedarf zusätzliche Kühlung tagsüber sowie Heizung bei vereisten oder Schneebedeckten Kollektoren. Eine Bodenquelle ist teurer als ein zusätzlicher Wärmetauscher, dürfte aber eine noch höhere Gesamteffizienz ermöglichen. Die Dachkollektoren können im Sommer tagsüber zur Regeneration der Bodenquelle verwendet werden. Auf der Abgabeseite wird TABS mit Klimasegeln verglichen, welche eine thermische Anbindung an die Betondecke haben. Ein solches System dürfte teurer sein und die Gebäudemasse weniger gut aktivieren, ist aber nachrüstbar.

		TABS & zusätzliche Luftkühlung/-heizung	Klimasegel mit Deckenaktivierung
Luft/Wasser-Wärmepumpe		Referenz	Referenz
CoolShift mit UST/PVT	Zusätzlicher Luft/Sole- Wärmetauscher	Neubau-Variante	Nachrüst-Variante
	Zusätzliche Bodenquelle	Neubau-Variante, teurer aber höhere Effizienz	Nachrüst-Variante, teurer aber höhere Effizienz

Tab. 8: Systemkonfigurationen für Nachfolgeprojekt



7 Dank

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energie für die Förderung dieses Projektes. Die Arbeit ist ein Beitrag zum «Task 5.1.2 Future Cooling Solutions» des Forschungsprogramms «Swiss Competence Center of Energy Research, Future Energy Efficient Buildings and Districts» SCCER FEEB&D, und wurde mit teilweiser Finanzierung durch Innosuisse durchgeführt. Folgende Vertreter aus Wirtschaft und Industrie haben uns vor und während des Projektes unterstützt: Die Herren Jobst Willers und Lorenz Matter (Jobst Willers AG) haben nicht nur detaillierte Daten zum untersuchten Bürogebäude zur Verfügung gestellt, sondern uns auch bei der Entwicklung der Fragestellungen und bei der Dimensionierung der zu modellierenden Varianten beraten. Herrn Ulrich Leibfried (Consolar GmbH), Herrn Bernard Thissen (Energie Solaire SA) sowie Herrn Christian Dersch (Roth Werke GmbH) danken wir für den fachlichen Austausch und die detaillierten Informationen zu ihren Produkten.

8 Referenzen

- [1] "The Future of Cooling," IEA, <https://www.iea.org/futureofcooling/>, abgerufen am 11. Juni, 2019
- [2] M Isaac et al., "Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change," Energy Policy, Volume 37, Issue 2, p. 507-521
- [3] "Bewährter Strommix aus Kern- und Wasserkraft", Nuklearforum Schweiz, 2015, https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/170101_Faktenblatt_Strommix_d_Web.pdf, abgerufen am 28. Juni, 2019
- [4] R Pomeroy, "How People Created Ice in the Desert 2000 Years Ago," RealClear Science, 2018, https://www.realclearscience.com/blog/2018/07/09/how_people_created_ice_in_the_desert_2000_years_ago.html, abgerufen am 17. April, 2019
- [5] "The Persian ice house, or how to make ice in the desert," FieldStudyOfTheWorld, 2016, <https://www.fieldstudyoftheworld.com/persian-ice-house-how-make-ice-desert/>, abgerufen am 20. Juni, 2019
- [6] "Yakhchal of Yazd province," Wikipedia, 2008, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yakhchal_of_Yazd_province.jpg, abgerufen am 20. Juni, 2019
- [7] U Eicker & A Dalibard, "Photovoltaic-thermal collectors for night radiative cooling of buildings," Solar Energy, Volume 85, Issue 7, p. 1322-1335, 2011
- [8] EA Goldstein et al., "Sub-ambient non-evaporative fluid cooling with the sky," Nature Energy, Volume 2, Article 17143, 2017
- [9] N Fernandez et al., "Energy Savings Potential of Radiative Cooling Technologies," Pacific Northwest National Laboratory, 2015
- [10] Himmel: Phys.org; Atmosphärenspektrum: Ohio State University, Department of Astronomy; Wärmebild: Building Diagnostics Group Inc.
- [11] C Wemhöner et al., "Kühlen über thermisch aktivierte Aussenflächen – Potenzialstudie," Insitut Energie am Bau, FHNW, 2011
- [12] C Wemhöner et al., "AKTIVA: Heizen und Kühlen über thermisch aktivierte Aussenflächen – Labortest und Entwicklung von integrierten Systemlösungen," Institut Energie am Bau, FHNW, Institut für Energietechnik, Institut für Energietechnik, HSR, 2016
- [13] CARNOT Toolbox for Matlab/Simulink R2016b, Ver 6.3, 10/2018, © Solar-Institut Juelich
- [14] "Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education," Meteotest, Bern, CH, 2009
- [15] L Gasser et al., "High efficiency heat pumps for low temperature lift applications," 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, NL, 2017
- [16] F Bünning et al., "Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization," Applied Energy, Volume 209, p. 502-515, 2018
- [17] "Kigo Standard Deckensegel – Wandpaneele," Kigo Swiss, CH, <https://docs.wixstatic.com/>



[ugd/8d1d54_b50728a2d48a421a8cc0e9511c4ce39c.pdf?index=true](#) , abgerufen am 30.

August, 2019

- [18] "SIA 180:2014 – Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden," Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, CH, 2014

- [19] "SOLINK – Das Energieversorgungssystem für Wärmepumpen," Energie Solaire, CH, https://www.energie-solaire.com/jt_files/pdf/Techn_Produktinfo_SOLINK_2017_11_07.pdf, abgerufen am 17. April, 2019

9 Anhang

9.1 Simulationsparameter

Raum	
Länge süd	8.82 m
Länge west	4.92 m
Höhe	2.61 m
Glasfläche süd	11.75 m ²
Glasfläche west	6.55 m ²

Boden/Decke (oben nach unten)				
	Dicke	Dichte	Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit
	cm	kg/m ³	J/kgK	W/mK
Bodenbelag	1	200	1300	0.060
Beton	8	2200	1100	1.500
Trittschalldämmung	2	80	1030	1.000
Isolation	3	30	1450	0.033
Beton	28	2400	1000	2.500

Innere Wände				
	Dicke	Dichte	Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit
	cm	kg/m ³	J/kgK	W/mK
Verputz	1.0	1400	1000	0.700
Gipskarton	2.5	900	1000	0.250
Isolation	10.0	60	1030	0.034
Gipskarton	2.5	900	1000	0.250
Verputz	1.0	1400	1000	0.700

Äussere Wände (aussen nach innen)				
	Dicke	Dichte	Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit
	cm	kg/m ³	J/kgK	W/mK
Verputz	2	1000	1000	0.870
Isolation	24	80	870	0.035
Beton	20	2400	880	2.500
Verputz	1	1000	1000	0.700



Fenster	
Schichten	3
Glasdicke	5 mm
U-Wert	0.9 W/m ² K
G-Wert	43 %
Lichtdurchlässigkeit	80 %
Lichtabsorption	10 %
Verschattungskoeffizient Storen	80 %
Rahmenanteil	31 %

Emissivitäten		
	Infrarot	VIS
Wände	0.9	0.65
Glas	0.95	

Lüftung	
El. Leistung	22 W
Volumenstrom	44.9 m ³ /h

Kälteabgabe		
	Kühlsegel	TABS-Decke
Fläche	12 * 2.05 m ²	43 m ²
Rohrtiefe		5 cm
Zuleitung	2 cm * 20 m	2 cm * 20 m
Massenfluss	0.3 kg/s	0.3 kg/s
El. Leistung Zirkulationspumpe	35 W	35 W

Kältemaschine		
	Konventionell	CoolShift
Kompressorleistung	120-400 W	120-400 W
Carnot-Effizienz	40 %	40 %
ΔT Kondensator	7 K	2 K
ΔT Verdampfer	2 K	2 K
Fördermenge Ventilator	0.16 kg/s	
El. Leistung Ventilator	15 W	

PVT-Kollektoren	
Fläche	4 * 1.98 m ²
Zuleitung	2 cm * 20 m
Massenfluss	0.25 kg/s
El. Leistung Zirkulationspumpe	35 W

Bypass, CoolShift	
Wärmeübergangskoeffizient	1000 W/K
Thermische Kapazität	16728 J/K