



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und  
Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**

**Schlussbericht** 29. Januar 2013

---

## **Fensterkollektor**

2000-Watt taugliche Komponente für  
Raumwärme/-kühlung, Warmwasser sowie  
Sonnenschutz

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE

Forschungsprogramm «Solarwärme und Wärmespeicherung»

CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

JBT Trading Henrik Telepski

Wyssenhalten 452

CH – 3154 Rüschegg Heubach

[www.fensterkollektor.ch](http://www.fensterkollektor.ch)

**Autor:**

Jan Telepski, JBT Trading Henrik Telepski, [jan@telepski.ch](mailto:jan@telepski.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns

**BFE-Programmleiter:** Jean-Christoph Hadorn

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** SI/500808-01 / 500808-01

# Abstract

Ziel des Projekts war es, die Rahmenbedingungen für den Prototypenbau eines Sonnenkollektors in Form einer Vorstudie zu untersuchen und festzulegen. Der patentierte Sonnenkollektor vereint die Vorteile eines Wärmekollektors mit denen der Wärmepumpe, besitzt zwei unterschiedliche Ausführungen für den Einsatz in Fenstern und Fassaden und hat das Potential, den Energiebedarf eines Hauses vollständig zu decken. Die Vorstudie beschränkt sich auf den Einsatz in Fassaden mit der Zielrichtung der Anwendung für Hochhäuser.

Als Berechnungsbasis für die durchgeführte Simulation diente der Roche Tower in Rotkreuz. Die Konstruktion der Fassade wurde für die Simulation nachgebildet. Es wurde eine Etage des Hauses simuliert, wo 30% der Fassadenfläche von allen Himmelsrichtungen mit Kollektoren ausgestattet wurde.

Selbst mit nur 30% der Fassadenfläche liefert der Kollektor im Jahr mit 340 GJ wesentlich mehr Energie als für den Bedarf an Warmwasser und Heizung notwendig ist (65 GJ). Allerdings wird in der Nacht oder im Winter nicht genügend Energie geliefert. Um diese Zeiten zu überbrücken, wäre ein Energiespeicher oder eine zusätzliche Energiequelle notwendig.

Bei 30% Fassadenfläche liefert der Fassadenkollektor alleine auf der Südseite bereits 150% der benötigten Energie.

The goal of the project was to research and define the general conditions for the construction of a solar panel collector prototype in the form of a preliminary study. The patented solar panel collector combines the advantages of a heat collector and heat pump, comes in two different versions for use in windows and façades and has the potential to fully meet the energy requirements of a building. The preliminary study is limited to the use in façades, with the aim of application in skyscrapers.

The Roche Tower in Rotkreuz served as the basis of the calculation in the conducted simulation. The design of the façade was modelled for the simulation. One floor of the building was simulated, where 30% of the area of the façade was equipped with the collectors in all cardinal directions.

Even with only 30% of the area of the façade covered, the collector provides considerably more energy per year than is required to satisfy the need for hot water and heating. Admittedly, there is not enough energy supplied during the night or winter. To overcome these times, an energy storage or an additional source of energy is required.

With 30% front surface coverage with the collector, there's 150% of the necessary energy already covered solely with the south side.

# Voruntersuchung

## Ausgangslage

Es gibt bereits viele ökologische Lösungen für die Energieversorgung eines Hauses und Wärmekollektoren oder Photovoltaikanlagen sind inzwischen häufig auf Dächern zu sehen. Diese Lösungen sind im Bereich von Einfamilienhäusern oder kleinen Bürogebäuden seit Jahren im Einsatz. Schaut man sich aber die grösseren Gebäude oder Hochhäuser an, werden diese ökologischen Lösungen immer rarer.

Es gibt mehrere Gründe, warum diese Lösungen im kleinen Bereich z.B. auf ein Hochhaus nicht übertragbar sind. Wärmekollektoren oder Photovoltaikanlagen in der üblichen Ausführung benötigen viel Fläche und sind kein Schmuckstück für eine Fassade. Die Dachfläche eines Hochhauses bietet zu wenig Platz für die Kollektoren, um den Energiebedarf des gesamten Hauses zu decken. In den Fassaden haben sie sich aus ästhetischen Gründen nicht durchgesetzt.

Der patentierte Fenster- oder Fassadenkollektor basiert auf Jalousien als Energieabsorber – einer Form, die sich im Bild eines Hauses bereits etabliert hat. Diese Erscheinungsform prädestiniert den Kollektor für den Einsatz in Fassaden von Hochhäusern, wo genügend Fläche vorhanden ist.

Diese Voruntersuchung wurde mit dem Ziel durchgeführt, eine ökologische Lösung für die Energieversorgung eines Hochhauses zu finden.

Die Forschungseinrichtung, die diese Voruntersuchung durchgeführt hat, ist die NTB Buchs. Die Arbeiten sind unter der Leitung von Prof. Stafan Bertsch durchgeführt worden. Der Bericht der NTB ist im Anhang zu finden.

## Basis der Simulation

Der Roche Tower in Rotkreuz besitzt eine Ausführung der Fassade, die zur Integration des Fassadenkollektors bestens geeignet ist. Weiterhin ist das Haus nach den aktuell gültigen Trends gebaut worden und eignet sich somit gut als Basis einer Simulation.

Es wurde eine Etage des Hauses simuliert, wo 30% der Fassadenfläche von allen Himmelsrichtungen mit Fassadenkollektoren ausgestattet wurde. Um die Sicht durch die grossen Fassadenfenster nicht zu versperren, sind die Kollektoren in der Höhe der Zwischendecken positioniert. Als eine weitere Stelle zum Anbringen von Kollektoren könnten die Fassadenelemente an allen vier Ecken dienen.

Die Simulation einer gesamten Etage bringt den Vorteil, dass die Ergebnisse mit der Anzahl der Etagen multiplizierbar sind, wenn man das Endergebnis für das ganze Haus berechnen möchte. Es wurden alle gängigen Normen für Energiebedarf und Energieverbrauch der Etagenfläche berücksichtigt.

Eine einzelne Etage würde mit einer eigenen Wärmepumpe ausgestattet werden, die in dem Fall von der Grösse überschaubar dimensioniert werden kann. Dies ermöglicht die Verwendung von Geräten, die bereits standardmässig auf dem Markt verfügbar sind. Weiterhin kann eine Etage unabhängig von der Sonneneinstrahlung der anderen gesteuert werden, was die Effektivität der gesamten Anlage erhöht, falls benachbarte Häuser Schatten auf die Fassade werfen sollten.

Die Wärmepumpen der einzelnen Etagen würden mittels Wärmetauscher zusammengebunden werden, um den Austausch der Energie mit einem Energiespeicher zu ermöglichen.

## Definierte Ziele

Folgende Ziele sind für die Simulation definiert worden:

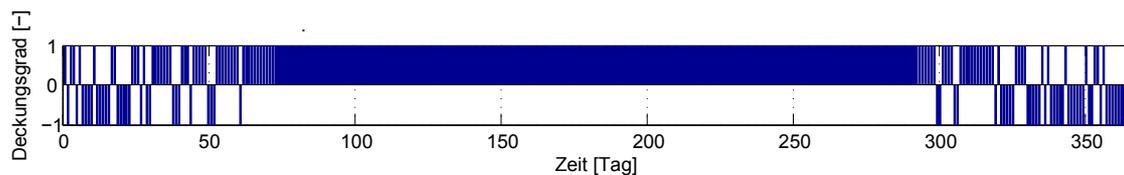
- Berechnung der Effektivität des Kollektors
- Berechnung der Effektivität des gesamten Systems.
- Ermittlung der nötigen Fassadenfläche für die Abdeckung des Energiebedarfs einer Etage.
- Ermittlung des Energieertrages am Standort Schweiz für alle Jahreszeiten.

## Ergebnisse

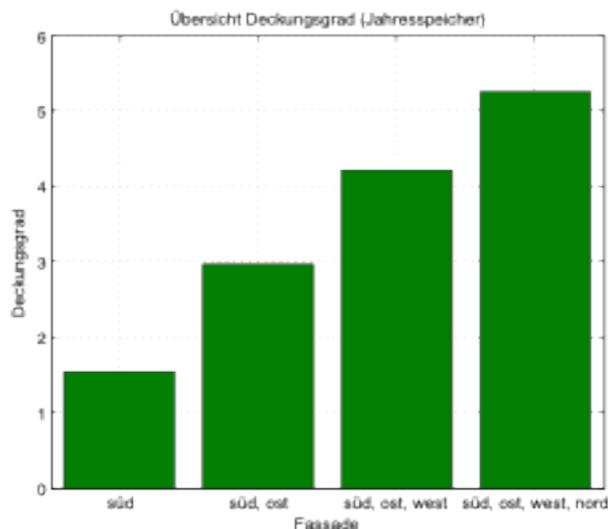
Die Ergebnisse der Simulation haben den vermuteten hohen Wirkungsgrad des Kollektors bestätigt. Der Bericht der NTB Buchs

Selbst wenn die Fassade nur zu 30% mit Kollektoren bestückt wird, liegt der Energieertrag im Jahr bei 340 GJ. Der Bedarf einer Etage an Energie für Warmwasser und Heizung beträgt im Jahr nur 65 GJ, es gibt demnach einen Überschuss von 275 GJ.

Weil aber Sonne in der Nacht nicht vorhanden und im Winter nicht stark genug ist, wäre eine Überbrückung dieser Zeiten mittels eines Energiespeichers notwendig. In der Simulation wurde angenommen, dass ein Tagesspeicher vorhanden ist. Demnach entsteht in Wintermonaten in Zürich eine Unterdeckung, wie unten gezeigt.



Um die Unterdeckung auszugleichen, wäre ein grösserer Energiespeicher oder eine zweite Energiequelle notwendig.



Würde ein Jahresspeicher verwendet, würde bereits mit der Südfassade und 30% Kollektorfläche ein Überschuss an Energie von 50% entstehen, wie auf der Abbildung links dargestellt.

Wie gross der Energiespeicher sein müsste, um die Unterdeckung auszugleichen, wurde in der Simulation nicht berechnet. Dies kann in einem Folgeprojekt ermittelt werden.

Die Ausstattung von 30% Fassadenfläche mit Fassadenkollektoren verursacht Mehrkosten von 25% der Fassadenkosten, was im Vergleich zu den Gesamtkosten eines Hauses relativ wenig ist.

Die Ergebnisse sind zuerst für den Standort Zürich berechnet worden. Um einen Vergleich mit anderen Standorten zu ermöglichen, sind später noch Simulationen für Davos, Genf und Locarno vorgesehen. Die Ergebnisse sind unterschiedlich und im Falle einer konkreten Anwendung wäre es sinnvoll, eine Simulation für den Ziel-Standort zu berechnen.

## Zusammenfassung

Die durchgeführte Voruntersuchung gibt bereits einen guten Überblick über den hohen Wirkungsgrad des Fassadenkollektors.

- Der Kollektor ist für den Einsatz in Fassaden von Hochhäusern geeignet.
- Der Kollektor liefert bei 30% Abdeckung der Fassadenfläche im Jahr 5 mal mehr Energie als für die komplette Versorgung mit Warmwasser und Heizung notwendig wäre.
- Der Kollektor kann ein Hochhaus bei relativ geringen Mehrkosten von ca. 25% der Fassadenkosten vollständig mit Wärmeenergie versorgen, wenn die Kollektorfläche 30% der Fassadenfläche ausmachen würde.
- Weil die Menge an Sonnenenergie in Wintermonaten in der Schweiz zu gering ist, um den Bedarf zu decken, wäre ein Energiespeicher notwendig.
- Der Kollektor kann in der Höhe der Zwischendecken und in den ECKelementen eingesetzt werden und versperrt dadurch nicht die Durchsicht.
- Es gibt Potential zur Optimierung der Kollektorfläche in der Fassade und der Grösse des eventuellen Energiespeichers. Es ist vorstellbar, dass eine geringere Fassadenfläche als 30% ausreichen würde, wenn der Energiespeicher die Wintermonate überbrücken könnte.

## Prototypenbau

Die durchgeführte Voruntersuchung hatte das Ziel, die Rahmenbedingungen für den Prototypenbau zu untersuchen und festzulegen. Dieser Schritt ist erfolgreich getan und öffnet den Weg für den Prototypenbau.

Einige Fragen bleiben noch offen, z.B. wie gross müsste der Energiespeicher sein, um die Unterdeckung auszugleichen, oder ob sich die Ergebnisse der Simulation mit der Praxis decken, um nur wenige zu nennen.

Diese und weiteren Fragen können durch den Prototypenbau und weitere Simulationen beantwortet werden.

## Referenzen

Folgende Firmen haben sich bereits für den Fassadenkollektor interessiert:

- EgoKiefer, CEO Thomas Gerosa, +41 71 757 32 21
- Rhombergbau, CEO Hubert Rhomberg, +43 5574 403 200
- Technopark Luzern, CEO Hansruedi Lingg, +41 41 455 21 21
- Schid & Partner GmbH, CEO Christian Schmidt, +43 55 748 67 00
- Zech AG, CEO Roman Zech, +43 5523 5969 333
- CTA AG, Theo Studer, +41 31 720 10 60
- Euro-Centrum, Ceo Jerzy Kwiatkowski, +48 32 783 43 13

## Anhang



 **Interstaatliche Hochschule  
für Technik Buchs**  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# Vorstudie Fensterkollektor

Vertiefungsprojekt Master in Science of Engineering, 24. Januar 2013

Student  
Projektbetreuer  
Auftraggeber

Andres Heldstab, B.Sc  
Prof. Stefan Bertsch, Ph.D  
Dipl.-Ing. Jan Telepski

Institut für Energiesysteme  
Interstaatliche Hochschule für Technik NTB  
Werdenbergstrasse 4, 9470 Buchs  
Tel. +41 81 755 31 66, Fax +41 81 756 54 34  
E-Mail [andres.heldstab@ntb.ch](mailto:andres.heldstab@ntb.ch), [www.ntb.ch](http://www.ntb.ch)

## Zusammenfassung

Die Sonne ist die grösste Energiequelle der Welt und wird als Lösung unserer Energieprobleme gehandelt. Der Trend geht immer mehr auf Sonnenenergie und immer mehr Ideen und Konzepte werden entwickelt, um den Schritt weg von den fossilen und atomaren Brennstoffen zu schaffen.

Der Fensterkollektor ist ein Konzept für Hochhäuser mit Doppelfassaden, der die solare Einstrahlung nutzt, um den Wärmebedarf zu decken. Sonnenkollektoren werden in den ungenutzten Bereichen der transparenten Doppelfassade eingesetzt und mit einem Wärmepumpensystem verbunden. Bei Sonnenschein erwärmt sich der Kollektor und die Wärmepumpe kann diesen Energieeintrag nutzen, um den Wärmebedarf zu decken.

Es wurde eine Simulation des Fensterkollektors aufgesetzt. Das Modell beinhaltet die Sonneneinstrahlung, die nach dem Sonnenstand und den Meteorodaten von Meteonorm berechnet werden. Es wurde die Reflexion des Aussenglases, die Effizienz des Kollektors und die einer einstufigen Wärmepumpe modelliert. Der Wärmebedarf wurde in Warmwasser- und Heizwärmebedarf unterteilt und nach der SIA Norm 380/1 für ein Verwaltungsgebäude berechnet. Die Simulation wurde jeweils für eine Etage durchgeführt.

Die Simulation berechnete den Deckungsgrad für verschiedene Standorte. Der Deckungsgrad ist der Anteil Tage pro Jahr, in denen der Fensterkollektor mit einem Tagesspeicher den Wärmebedarf decken kann. In Abbildung 1 wurde der Deckungsgrad für den Gesamtwärmebedarf für die Standorte Zürich, Davos, Genf und Locarno bestimmt und als Maxima und Minima aufgetragen. Dabei wurde jeweils die ertragreichste Fassade (Südfassade) und jeweils die nächstbessere hinzugefügt. Das Verhältnis der Kollektorfläche zur Fassadenfläche beträgt 30%.

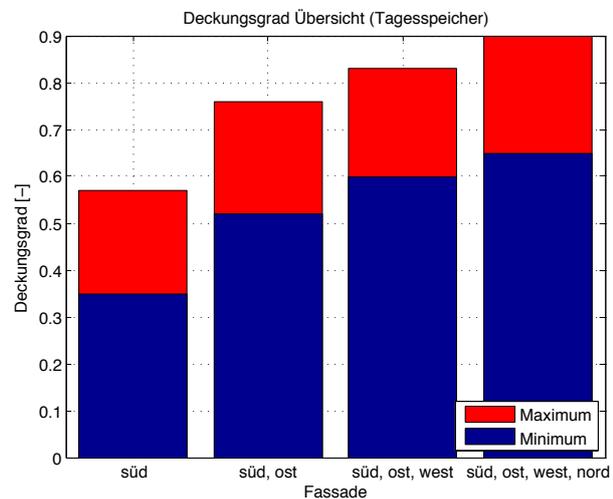


Abbildung 1: Deckungsgrad mit Tagesspeicher (Zürich, Davos, Genf, Locarno)

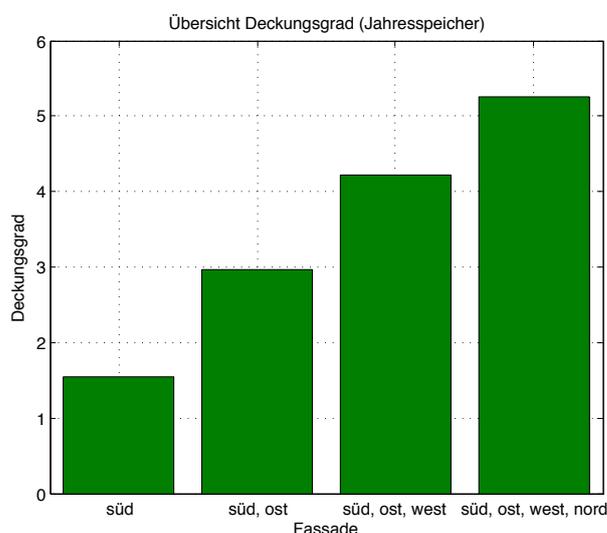


Abbildung 2: Deckungsgrad mit Jahresspeicher (Zürich)

Sobald ein grösserer Speicher, in Form von Energiepfählen oder grossen sensiblen Speichern, vorhanden ist, steigt der Deckungsgrad, weil mehr ertragarme Tage überbrückt werden können. Im besten Fall kann mit einem Jahresspeicher und der ertragreichsten Fassade der Gesamtwärmebedarf einer Hochhausetage gedeckt werden. In Abbildung 2 erkennt man, dass 150% der benötigten Wärme geliefert wird, wobei hier der Standort Zürich betrachtet wurde.

Die Erweiterung einer Doppelfassade zu einem Fensterkollektor würden die Fassadenkosten um ca. 25% erhöhen.

## Nomenklatur

$a_1$	Erster Kennlinienparameter eines Kollektor $[\frac{W}{m^2 K}]$
$a_2$	Zweiter Kennlinienparameter eines Kollektor $[\frac{W}{m^2 K^2}]$
$A$	Absorption $[-]$
$A_{Fassade}$	Fassadenfläche $[m^2]$
$A_P$	Personenfläche $[\frac{m^2}{P}]$
$A_{Stock}$	Stockwerkfläche $[m^2]$
$COP$	Leistungszahl $[-]$
$E$	Strahlung $[W]$
$E_{F,El}$	Elektrizitätsbedarf pro Jahr $[\frac{MJ}{m^2 a}]$
$f_{El}$	Reduktionsfaktor Elektrizitätsbedarf $[-]$
$f_{Alb}$	Albedofaktor $[-]$
$h$	Sonnenhöhe $[rad]$
$h$	Wärmedurchgangskoeffizient $[\frac{W}{m^2 K}]$
$h$	Enthalpie $[\frac{J}{kg}]$
$H_{Alb,\alpha}$	Albedostrahlung auf geneigte Fläche $[W]$
$H_{Glob,0}$	Globalstrahlung auf horizontale Fläche $[W]$
$H_{Dif,0}$	Diffusstrahlung auf horizontale Fläche $[W]$
$H_{Dif,\alpha}$	Diffusstrahlung auf geneigte Fläche $[W]$
$H_{Dir}$	Direktstrahlung $[W]$
$JAZ$	Jahresarbeitszahl $[-]$
$k$	Wärmeleitungskoeffizient $[\frac{W}{m K}]$
$L$	Charakteristische Länge $[m]$
$Pr$	Prandtl-Zahl $[-]$
$\dot{m}_{KM}$	Massenstrom des Kältemittels $[\frac{kg}{s}]$
$n$	Brechzahl $[-]$
$n$	Tag $[d]$
$Nu$	Nusselt-Zahl $[-]$
$\dot{Q}_{el}$	Elektrische Leistung des Verdichters $[W]$
$\dot{Q}_{El}$	Wärmeabgabe der elektrischen Geräte $[W]$
$\dot{Q}_{Fassade}$	Wärmeverlust über die Fassade $[W]$
$\dot{Q}_{Heiz}$	Wärmeabgabe der Heizung $[W]$
$Q_{Heiz,jahr}$	Wärme über ein Jahr $[J]$
$\dot{Q}_{Heizbedarf}$	Heizbedarf $[W]$
$\dot{Q}_{Kälte}$	Kälteleistung der Wärmepumpe $[W]$
$\dot{Q}_{Kollektor}$	Wärmeübertragung durch den Kollektor $[W]$
$\dot{Q}_P$	Wärmeabgabe pro Person $[\frac{W}{P}]$
$\dot{Q}_{Personen}$	Wärmeabgabe aller Personen $[W]$
$\dot{Q}_{Verdampfer}$	Wärmeübertragung durch den Verdampfer $[W]$
$R$	Reflexion $[-]$
$R_p$	Reflexion der parallel zur Einfallsebene schwingenden Komponente $[-]$
$R_s$	Reflexion der seriell zur Einfallsebene schwingenden Komponente $[-]$
$Re$	Reynolds-Zahl $[-]$
$S$	Streuung $[-]$
$t_{akt}$	Aktuelle Tageszeit nach UTC $[h]$
$t_{gl}$	Zeitgleichung $[h]$
$t_P$	Präsenzzeit $[\frac{h}{d}]$
$t_w$	Wahre Ortszeit $[h]$
$T$	Transmission $[-]$
$T_a$	Aussentemperatur $[K, C]$
$T_{Raum}$	Raumtemperatur $[K, C]$

$T_{Verdampfer}$	Verdampfungstemperatur [K, C]
$T_{Vorlauf}$	Vorlauftemperatur [K, C]
$U$	U-Wert [ $\frac{W}{m^2K}$ ]
$U_{Fassade}$	U-Wert der Fassade [ $\frac{W}{m^2K}$ ]
$v_i$	Windgeschwindigkeit in der Doppelfassade [ $\frac{m}{s}$ ]
$v_a$	Aussenwindgeschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]
$W_{el,jahr}$	Elektrische Arbeit der Wärmepumpe [J]

### Griechische Zeichen

$\alpha$	Neigungswinkel [rad]
$\delta$	Deklination [rad]
$\Delta T_{Kollektor}$	Temperaturabstand im Kollektor [K, C]
$\epsilon_0$	Einfallwinkel [rad]
$\epsilon_1$	Ausfallwinkel [rad]
$\eta_0$	Optischer Wirkungsgrad eines Kollektor [-]
$\eta_{isent}$	Isentropischer Wirkungsgrad [-]
$\mu$	Dynamische Viskosität [ $\frac{kg}{sm}$ ]
$\rho$	Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
$\rho$	Geografische Breite [rad]
$\Phi_w$	Längengrad [rad]
$\psi$	Azimut [rad]
$\omega$	Stundenwinkel [rad]

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>3</b>
<b>1. Einführung in das Konzept des Fensterkollektors</b>	<b>6</b>
1.1. Neues Konzept Fensterkollektor . . . . .	6
1.2. Prinzip einer Wärmepumpe . . . . .	7
1.3. Anbindung des Fensterkollektors an die Wärmepumpe . . . . .	7
<b>2. Beschreibung der Simulation</b>	<b>9</b>
2.1. Gebäudemodell . . . . .	9
2.2. Modell für die solarer Einstrahlung . . . . .	14
2.3. Model der Wärmepumpe . . . . .	17
2.4. Ablauf der Gesamtsimulation . . . . .	19
<b>3. Ergebnisse</b>	<b>20</b>
3.1. Bilanz der Energien . . . . .	20
3.2. Deckungsgrad . . . . .	21
3.3. Parametrische Studie . . . . .	21
3.4. Variation der Standorte . . . . .	23
3.5. Jahresarbeitszahl . . . . .	25
<b>4. Kostenschätzung der Fassade</b>	<b>27</b>
4.1. Abschätzung über die Komponenten . . . . .	27
4.2. Abschätzung über BFE-Artikel . . . . .	27
<b>5. Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>28</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>29</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>30</b>
A.1. Beurteilung der Anbindung des Fensterkollektors an die Wärmepumpe . . . . .	30
A.2. Bilanz der Energien für Davos, Genf, Locarno . . . . .	34

# 1. Einführung in das Konzept des Fensterkollektors

Solare Einstrahlung und Wärmestrahlung wird am Fenster bisher wenig genutzt. Durch Lamellen-, Sonnenstoren, Rollläden, Jalousien, Fensterladen und Fassadenlösungen wird die Einstrahlung reguliert, doch die Abwärme wird an die Umgebung abgegeben und nur selten für Heizung oder Brauchwarmwasser weiterverwendet.

In einem Patent vom Mai 2012 [TEL12] wurden zwei neue Konzepte für die Nutzung der solaren Einstrahlung am Fenster veröffentlicht. Im Hintergrund geht es darum, das Fenster als Wärmequelle für eine Wärmepumpe zu nutzen. Dazu muss die Strahlung auf einen Absorber treffen und die resultierende Wärme soll in einen Kaldampfkreislauf eingebracht werden.



Abbildung 3: Fensterkollektor

Das erste Konzept besteht aus einem Fenster mit Doppel- oder Dreifachverglasung, in dem eine Jalousie integriert ist. Je nach Sonnenstand und Wärmeeintrag kann die Jalousie manuell oder geregelt rauf oder runter gefahren werden. Zusätzlich sind Ein- und Auslässe für ein gasförmiges Kältemittel integriert, das die Wärme die an der Jalousie entsteht, aufnimmt und im Wärmepumpenkreislauf genutzt wird. In Abbildung 3 ist der Fensterkollektor in einer Schnittansicht dargestellt.

Das zweite Konzept ist ähnlich wie das Erste, jedoch mit dem Unterschied, dass das Kältemittel anstatt durch die Kavität des Fensters nun durch Kanäle an der Jalousie geleitet wird.

## 1.1. Neues Konzept Fensterkollektor

Da man den Fensterkollektor vor allem bei Hochhäusern, wegen der grossen Fassadenflächen, einsetzen möchte, wurde ein neues Konzept im Zusammenhang mit Doppelfassaden entworfen.

Dieses Konzept besteht darin, dass man bei Doppelfassaden, die nach dem Prinzip von Kastenfenster-Fassaden oder Korridorfassaden aufgebaut sind, nun in zwei Bereiche unterteilt. Der erste Bereich ist die normale durchsichtige Fassade, bei der der Sonnenschutz durch eine Jalousie gewährleistet werden kann. Der zweite Teil wird von einem Kollektor besetzt, der die solare Einstrahlung nutzen kann.

Der Kollektor der Fassadenelemente kann dann über verschiedenen Varianten an die Wärmepumpe angeschlossen werden. Für fünf wurden Vorteile und Nachteile aufgelistet, die im Anhang A.1 abgelegt sind. Die Variante 'Direkte Verdampfung Parallel' und 'Zwischenkreislauf pro Stockwerk Seriell' sind weiter verfolgt worden.



Abbildung 4: Fassadenkollektor

## 1.2. Prinzip einer Wärmepumpe

Die Funktionsweise einer Wärmepumpe besteht aus vier Arbeitsschritten, wobei das Prinzipschema in Abbildung 5 dargestellt ist.

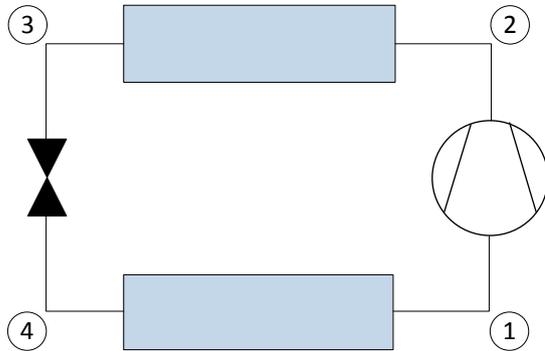


Abbildung 5: Prinzipschema einer Wärmepumpe

Erstens wird über den Verdampfer (4–1) Wärme von einem tiefen Temperaturniveau ins Kältemittel aufgenommen. Durch diese Wärme wird das Kältemittel verdampft. Dieses gasförmige Kältemittel wird danach vom Kompressor (1–2) verdichtet und dabei steigt die Temperatur an. Das heiße Kältemittel gibt nun Wärme über den Kondensator (2–3) durch Kondensieren ab, diese geschieht auf einem hohen Temperaturniveau und ist für die Heizung oder die Zubereitung von Brauchwarmwasser nutzbar. Nach dem Kondensieren wird das flüssige Kältemittel über ein Expansionsventil (3–4) entspannt und kann wieder auf einem geringen Temperaturniveau Wärme aufnehmen.

## 1.3. Anbindung des Fensterkollektors an die Wärmepumpe

Die 'Direkte Verdampfung Parallel' bedeutet, dass die Kollektoren die im Fassadenelement eingebaut sind, direkt mit flüssigem Kältemittel durchflossen werden. Diese Direktverdampfer sind parallel am Wärmepumpenkreislauf, wie in Abbildung 6 gezeigt, angeschlossen.

Dieses System wurde gewählt, weil es ein einfacher Kreislauf ist. Es werden keine zusätzlichen Pumpen oder Wärmetauscher benötigt. Jedoch wäre für die Variation des Durchflusses durch die einzelnen Fassaden weiter Komponenten nötig.

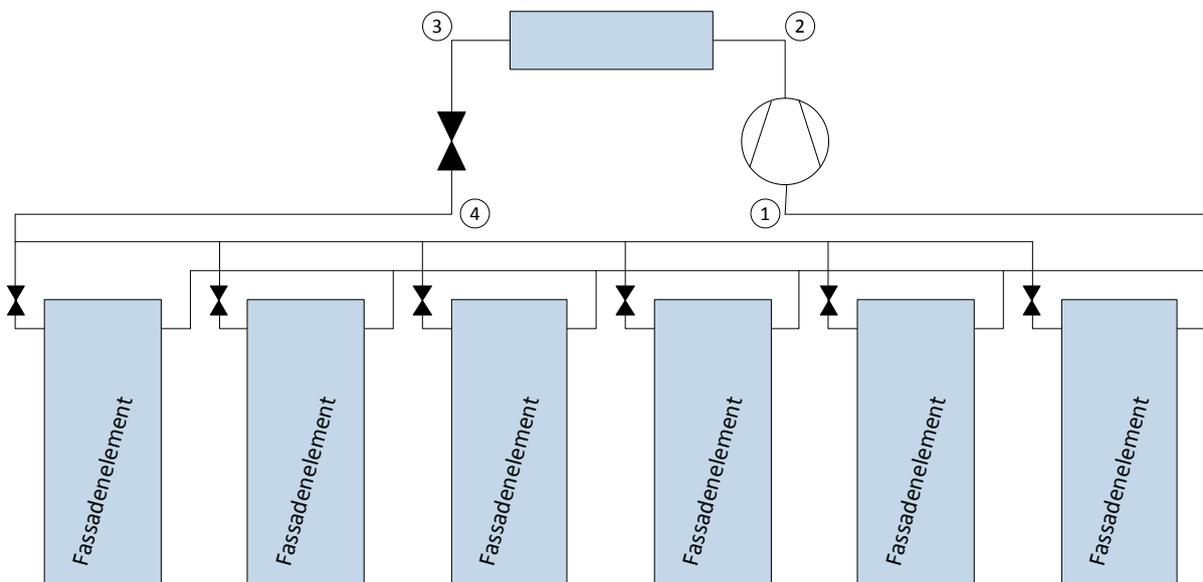


Abbildung 6: Konzept von 'Direkte Verdampfung Parallel'

Der 'Zwischenkreislauf pro Stockwerk Seriell' besteht aus einem Zwischenkreislauf mit einem einfachen Wärmetransportmedium, wie zum Beispiel Wasser oder Sole. Am Zwischenkreislauf sind die

Fassadenelemente, wie in Abbildung 7 gezeigt, in Serie angeschlossen. Der Wärmeübergang vom Zwischenkreislauf auf den Wärmepumpenkreislauf wird über einen Wärmetauscher ermöglicht. Dieses System wurde gewählt, weil bewegliche Leitungen durch den tieferen Druck im Zwischenkreislauf möglich sind. Für die Übertragung der Wärme in den Wärmepumpenkreislauf ist nur ein zusätzlicher Wärmetauscher nötig und der Wärmepumpenkreislauf bleibt von der Fassade abgekoppelt. Das Abkoppeln des Wärmepumpenkreislaufes hat den Vorteil, dass weniger Kältemittel notwendig ist, was ökologisch besser, ökonomisch günstiger und das die Wärmepumpe einfacher zum Installieren ist.

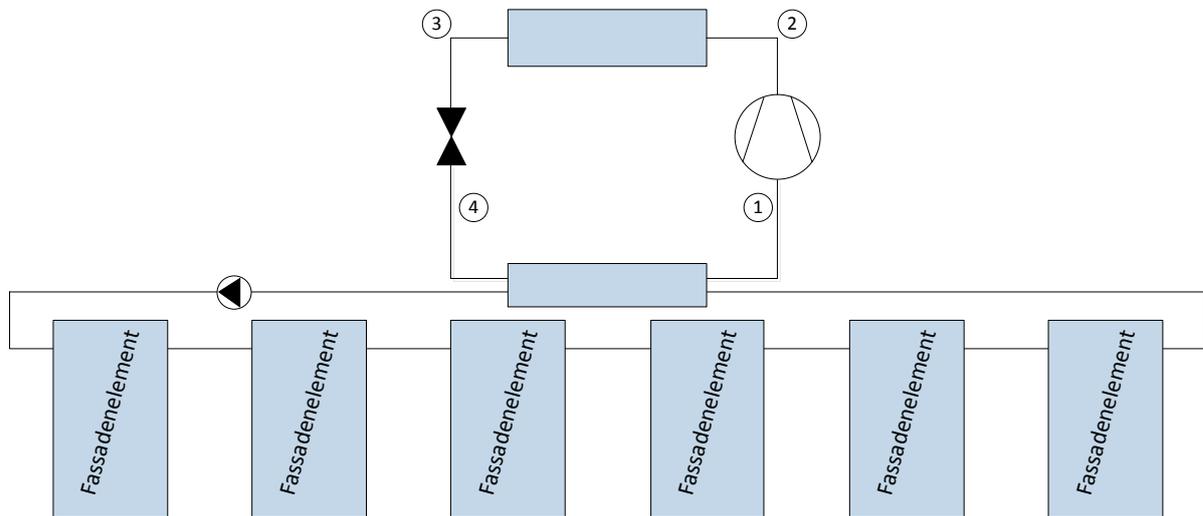


Abbildung 7: Konzept von 'Zwischenkreislauf pro Stockwerk Seriell'

Aus diesem Konzept von Fensterkollektor verbunden mit einer Wärmepumpe wurde nun eine Simulation aufgebaut, um den nutzbaren Wärmeertrag zu berechnen.

## 2. Beschreibung der Simulation

Die Simulation besteht aus mehreren Teilen. Grundsätzlich wurde die Simulation in Matlab aufgebaut, das Arbeitskennlinienfeld der Wärmepumpe wurde jedoch in EES ermittelt und danach ins Matlab integriert. Die Simulation besteht aus drei verschiedenen Teilen, die in diesem Abschnitt beschrieben werden.

- Das **Gebäudemodell**, das die Geometrie, Grösse, Ausrichtung und Wärmebedarf beschreibt, aber auch die Fassade mit den notwendigen Parametern.
- Das **Modell für die solare Einstrahlung**, das den Sonnenstand und die verschiedenen Strahlungen beschreibt.
- Das **Modell der Wärmepumpe**, das über die verschiedenen Arbeitspunkten den COP beschreibt.

### 2.1. Gebäudemodell

#### Geometrie, Position und Ausrichtung

Das Modell besteht aus einem Stockwerk. Dies ist sinnvoll, da der Wärmeeintrag durch Verschattungen und den Wärmeverbrauch durch die Nutzung, wie zum Beispiel Wohnen, Verwaltung, Restaurant und Hotel, unterschiedlich sein kann und so auch unterschiedlich ausgelegt werden muss.

In Anlehnung an den Roche Tower, wird diese Geometrie, leicht abgeändert, für das Modell übernommen. Die Geometrien sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Parameter	Wert
Höhe eines Geschosses	4 m
Breite der Fassade	40 m
Fassadenfläche pro Himmelsrichtung	160 m <sup>2</sup>
Nutzfläche pro Stockwerk	1600 m <sup>2</sup>

Tabelle 2: Masse der Fassade

Für die Simulation sind Wetterdaten nötig. Diese werden in Meteonorm für das Modeljahr 2005 simuliert. Man erhält die Werte von Aussentemperatur  $T_a$ , globale Strahlung auf horizontale Fläche  $H_{Glob,0}$ , diffuse Strahlung auf horizontale Fläche  $H_{Dif,0}$  und die Windgeschwindigkeit  $v_a$ . Diese Daten liegen in einem Stundenraster vor.

Das Gebäude ist nach den vier Himmelsrichtungen ausgerichtet. So zeigen die jeweiligen Fassaden die Effekte jeder Ausrichtung. Die Kollektorfläche wird über den Nutzungsgrad  $\eta_{Nutz}$  definiert. Dieser gibt an wie viel Kollektorfläche gegenüber Fassadenfläche verbaut wurde. Man nimmt an, dass etwa 30% der Fassadenfläche für Kollektoren verwendet werden können.

#### Aufbau der Fassade

Die Fassade besteht in der Simulation aus einem Frontglas, einer Kavität und einem Kollektor, der parallel zu einer 3-fach Verglasung steht. In Abbildung 9 ist der Aufbau der Fassade dargestellt.

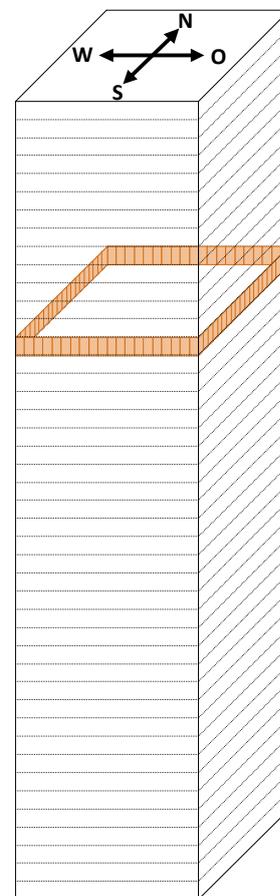


Abbildung 8: Simulationsgebiet

Ebenfalls ist die Strahlung eingezeichnet. Als Strahlungsquelle ist die Sonne gegeben, aber auch der Kollektor. Wenn die Temperatur am Kollektor höher als die Umgebungstemperatur ist, strahlt dieser Wärme ab, die dann in der Umgebung aufgenommen werden kann. Das Frontglas wird als Standard Sicherheitsglas ausgelegt, dabei hat ein solches Glas eine Brechzahl von 1.5 und ein U-Wert von  $5.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ . Als Vereinfachung wird angenommen, dass der Kollektor gegen die Innenräume perfekt isoliert ist und die 3-fach Verglasung einen U-Wert von  $0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  hat. Diese Annahme kann getroffen werden, weil über das Frontglas viel mehr Wärme fließen kann als über die 3-fach Verglasung. Das Flächenverhältnis von 3-fach Verglasung und Kollektor kann über  $\eta_{Nutz}$  variiert werden. Die verwendeten Parameter für die Fassade sind in Tabelle 3 hinterlegt.

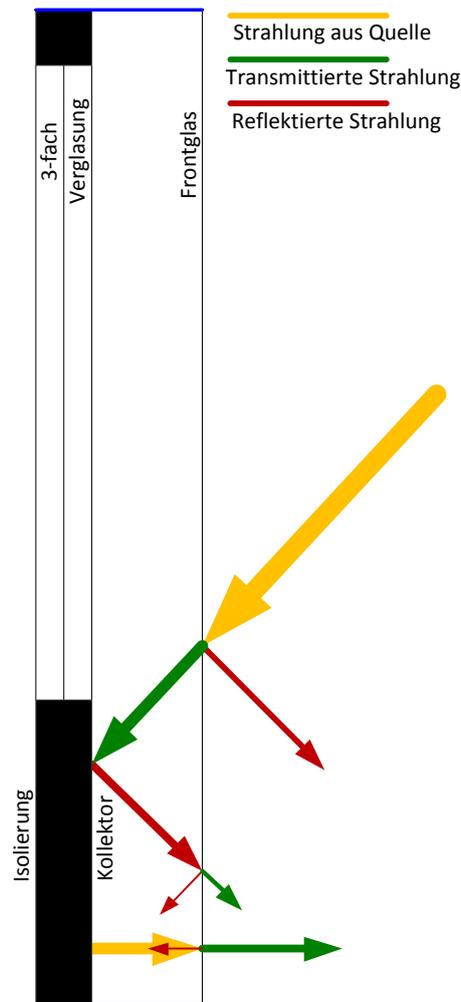


Abbildung 9: Aufbau der Fassade und Reflexion der Einstrahlung

Element	Eigenschaften (Annahmen)
Frontglas	$n = 1.5, U = 5.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
Luft	$n = 1$
Kollektor	$\eta_0 = 0.8, a_1 = 4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}, a_2 = 0.01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^2}$
3-fach Verglasung	$U = 0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

Tabelle 3: Eigenschaften der verschiedenen Elemente in der Fassade

## Reflexion am Frontglas

Je nach Einstrahlungswinkel wird Strahlung reflektiert. Die Reflexion am Frontglas kann über die Formel von Fresnel in Gleichung 1 berechnet werden. Es wird die seriell zur Einfallsebene schwingende Komponente  $R_s$  und parallel zur Einfallsebene schwingende Komponente  $R_p$  betrachtet. Dabei zeigt sich eine Abhängigkeit durch den Einfall- und Ausfallwinkel. Da nur der Einfallwinkel gegeben ist, kann über das Brechungsgesetz in Gleichung 2 der Ausfallwinkel durch die Brechzahlen berechnet werden [HAF03].

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{\sin^2(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{\sin^2(\epsilon_1 + \epsilon_0)} \\ R_p &= \frac{\tan^2(\epsilon_1 - \epsilon_0)}{\tan^2(\epsilon_1 + \epsilon_0)} \\ R &= \frac{R_s + R_p}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sin(\epsilon_0) \cdot n_0 = \sin(\epsilon_1) \cdot n_1 \quad (2)$$

Da das Licht zwei Grenzflächen Luft/Glas und Glas/Luft durchschreitet, muss die Reflexionsberechnung zwei mal durchgeführt werden. In Abbildung 10 ist die Reflexion an den Grenzflächen Luft/Glas und Glas/Luft nach der Fresnelformel aufgezeichnet.

Bei der Grenzfläche Luft/Glas ist die minimale Reflexion bei 0.04 und beginnt bei  $60^\circ$  zu steigen. Bei rechtem Winkel liegt die Reflexion bei 1, was Totalreflexion bedeutet.

Die Grenzfläche Glas/Luft zeigt ein anfangs völlig anderes Bild. Jedoch muss beachtet werden, dass der Lichtstrahl gebrochen wurde und nun maximal bei  $42^\circ$  liegt. Die grösseren Einstrahlungswinkel können nicht vorhanden sein.

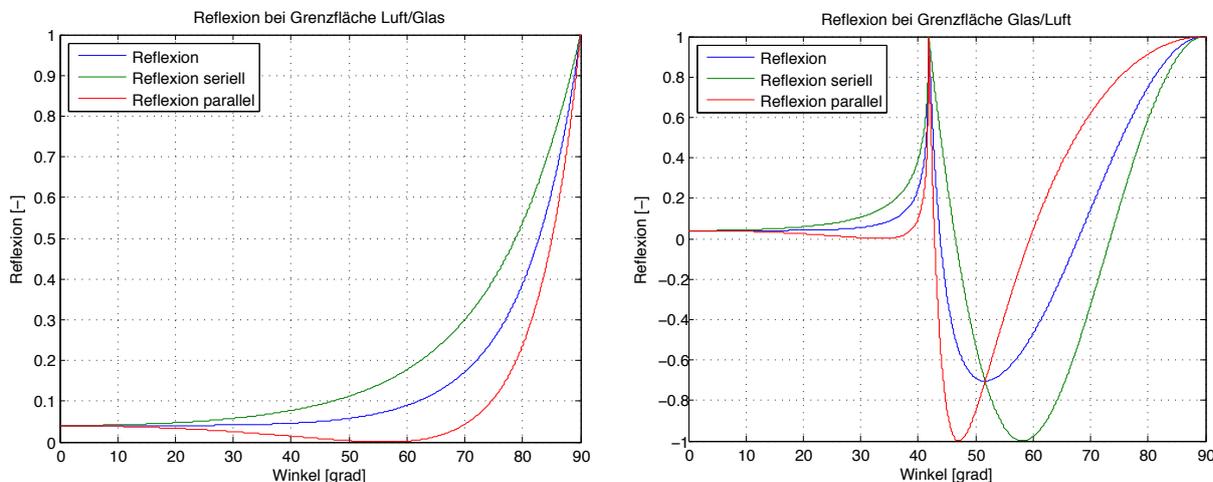


Abbildung 10: Reflexion an Grenzfläche Luft/Glas und Glas/Luft mit  $n_{Luft} = 1$  und  $n_{Glas} = 1.5$

Da bei beiden Grenzflächen Reflexionen entstehen, können aus den Reflexionen wieder Reflexionen entstehen, die sich durch das Glas fortpflanzen. In Abbildung 11 ist ein Beispiel gezeigt. Diese Fortpflanzung kann über eine geometrische Reihe beschrieben werden. Hier wird nur die Reflexion  $R$  und Transmission  $T$  des Lichtes betrachtet, die Absorption  $A$  und Streuung  $S$ , die im realen Glas ebenfalls entstehen, werden vernachlässigt, da sie sehr klein sind. Der Zusammenhang von Transmission und Reflexion ist in Gleichung 3 gezeigt. Die geometrische Reihe der Reflexion von A nach B  $R_{AB}$  ist in Gleichung 4 definiert [DGS08].

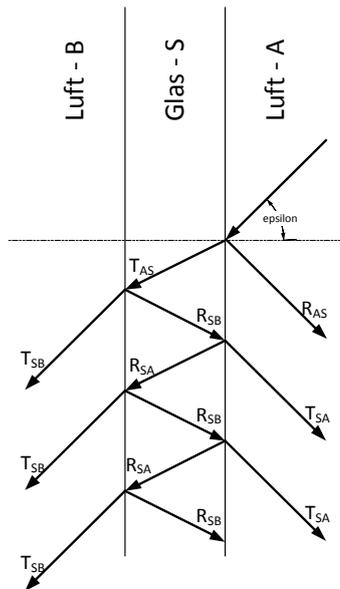


Abbildung 11: Reflexionen im Glas

$$\begin{aligned} T + R &= 1 \\ R_{AS} &= R_{SA} \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_{AB} = R_{AS} + \frac{R_{SB} \cdot T_{AS}^2}{1 - R_{SA} \cdot R_{SB}} \quad (4)$$

### Verschmutzung am Frontglas

Verschmutzungen am Frontglas werden nicht betrachtet. Man kann aber davon ausgehen, dass es bei einem Einfallswinkel von  $50^\circ$ - $80^\circ$  zu einer Verminderung der Transmission kommt [LUQ03]. Die Verschmutzung ist zyklisch und ändert sich nach Häufigkeit der Reinigung oder meteorologischen Einflüssen. Ebenfalls hat die Oberflächeneigenschaft des Glases einen Einfluss der hier nicht beurteilt werden kann.

### Reflexion an der Fassade und Effizienz des Kollektor

Wie in Abbildung 9 erkennbar ist, entstehen nicht nur am Frontglas Reflexionen, sondern auch am Kollektor. Daraus kann die Gesamtreflexion der Fassade ebenfalls mit der geometrischen Reihe aus der Gleichung 4 berechnet werden. Für diese Berechnung wird von der optischen Effizienz  $\eta_0$  des Kollektors ausgegangen.

Die thermische Effizienz des Kollektors kann über die Kennliniengleichung in zweiter Näherung dargestellt werden. Der optische Wirkungsgrad entspricht dem  $\eta_0$ , zusätzlich gibt es einen Wärmeverlust an die Umgebung, falls die Temperatur am Kollektor höher ist als die Umgebung, dann treten Verluste über Konvektion und Wärmeabstrahlung auf, die durch die Kennlinienparameter  $a_1$  und  $a_2$  einbezogen sind. In Gleichung 5 ist der Zusammenhang dargestellt und in Abbildung 12 ist die Kennlinie dargestellt. Die Stillstandstemperatur liegt ca. bei  $145^\circ\text{C}$ .

$$\eta = \eta_0 - \frac{a_1 \cdot \Delta T}{E} - \frac{a_2 \cdot \Delta T^2}{E} \quad (5)$$

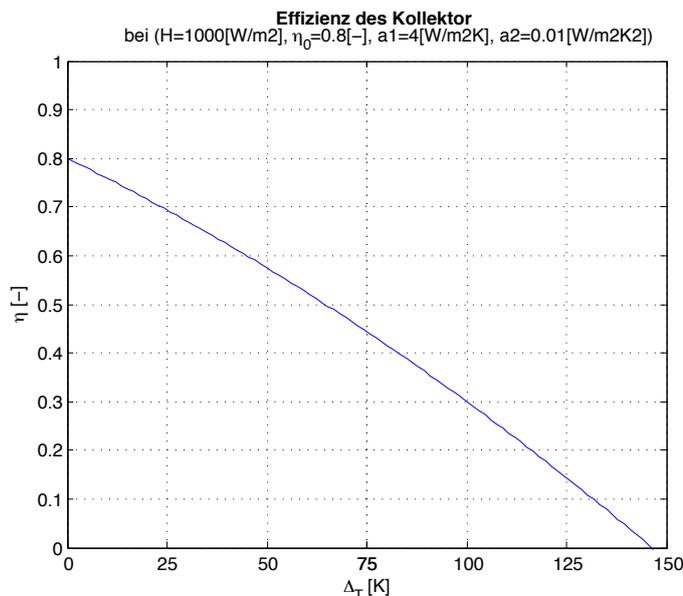


Abbildung 12: Effizienz des Kollektor

### Konvektion in der Fassade

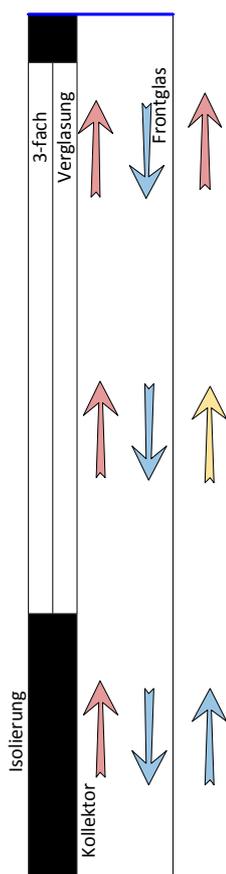


Abbildung 13: Konvektion

Die Verdampfungstemperatur in der Wärmepumpe wird so eingestellt, dass der Kollektor immer 5 K höher als die Aussentemperatur ist. Der Grund ist, dass so kein Kondensationswasser am Kollektor entstehen kann. Es ist nicht sinnvoll Wärme aus der Luft über Konvektion zu nutzen, den das Frontglas vermindert den Wärmeeintrag massiv, darum ist man völlig abhängig von Sonnenstrahlung. Da nun der Kollektor wärmer ist als die Umgebung, entsteht in der Fassade eine natürliche Konvektion. Diese ist in Abbildung 13 dargestellt. Am Kollektor und an der 3-fach Verglasung erwärmt sich die Luft und steigt auf. Am Frontglas kühlt sich die Luft ab und sinkt. Dadurch entsteht eine Zirkulation der Luft, die den Wärmeverlust unterstützt. Aus der Konvektion in der Fassade, der Wärmeleitung des Glases und der Konvektion an der Aussenfassade kann der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$ , auch U-Wert genannt, berechnet werden. Gleichung 6 stellt den Zusammenhang her.

$$U_{Fassade} = \frac{1}{\frac{1}{h_{innen}} + \frac{1}{U_{Glas}} + \frac{1}{h_{aussen}}} \quad (6)$$

Dabei ist der Wärmedurchgangskoeffizient  $h_{aussen}$  und  $h_{innen}$  über die Zirkulationsgeschwindigkeit  $v$  und die Höhe  $L$  der Fassade bestimmt. In Gleichungen 7 sind die Zusammenhänge gegeben und bezieht sich auf Platten [VDI06]. Zu beachten ist, dass von einer turbulenten Strömung ausgegangen wird, was nicht immer zutrifft und dass von einer bekannten Zirkulationsgeschwindigkeit  $v$  ausgegangen wird, die hier aber nur geschätzt wird.

$$\begin{aligned}
Re &= \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \\
Nu &= \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \\
h &= \frac{Nu \cdot k}{L}
\end{aligned} \tag{7}$$

Für innere Strömung wird von einer Geschwindigkeit von  $0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ausgegangen, diese Werte sind Annahmen die sich an einer Untersuchung von Doppelfassaden orientiert [TAN04]. Für die äussere Windgeschwindigkeit werden die Daten von Meteoronorm verwendet.

## Wärmebedarf

Der Wärmebedarf teilt sich in zwei Gruppen auf. Erstens der Brauchwarmwasserbedarf, der übers Jahr gleichmässig benötigt wird und zweitens den Heizbedarf, der vor allem im Winter benötigt wird. Diese wurden für die Gebäudekategorie Verwaltung ermittelt.

Der Brauchwarmwasserbedarf kann durch SIA 380/1 abgeschätzt werden. Diese geben an, dass für ein Verwaltungsgebäude ein Bedarf von  $25 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$  nötig ist.

Der Heizungsbedarf kann ebenfalls über die SIA Norm 380/1 berechnet werden. Neben dem Verlust durch die Fassade, die mit Gleichung 8 beschrieben ist, hat man verschiedene andere Quellen wie Wärme über Personen, in Gleichung 9, und Wärme über elektrische Geräte, in Gleichung 10. Die Summe bildet den Wärmebedarf, in Gleichung 11. Die nötigen Parameter sind in Tabelle 4 abgelegt.

$$\dot{Q}_{Fassade} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{U_{Fassade}} + \frac{1}{h_a}} \cdot A_{Fassade} \cdot (T_a - T_{Raum}) \tag{8}$$

$$\dot{Q}_{Personen} = \frac{A_{Stock} \cdot \dot{Q}_P \cdot t_P}{A_P \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \tag{9}$$

$$\dot{Q}_{El} = \frac{A_{Stock} \cdot E_{F,El} \cdot f_{El}}{8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} \tag{10}$$

$$\dot{Q}_{Heizbedarf} = -(\dot{Q}_{Fassade} + \dot{Q}_{Personen} + \dot{Q}_{El}) \tag{11}$$

Parameter	Wert
Raumtemperatur $T_{Raum}$	$20^\circ\text{C}$
Personenfläche $A_P$	$20 \frac{\text{m}^2}{\text{P}}$
Wärmeabgabe pro Person $\dot{Q}_P$	$80 \frac{\text{W}}{\text{P}}$
Präsenzzeit pro Tag $t_P$	$6 \frac{\text{h}}{\text{d}}$
Elektrizitätsbedarf pro Jahr $E_{F,El}$	$80 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$
Reduktionsfaktor Elektrizitätsbedarf $f_{El}$	0.9
U-Wert der Fassade $U_{Fassade}$	$0.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

Tabelle 4: Parameter für die Berechnung des Heizungsbedarfs

## 2.2. Modell für die solarer Einstrahlung

Die solare Strahlung wird von verschiedenen Faktoren bestimmt. Einer darunter ist der Sonnenstand. Dieser ist abhängig von der geografischen Breite  $\rho$ , der Deklination  $\delta$  und der Tageszeit (Stundenwinkel  $\omega$ ) [MAR12]. Um die solare Einstrahlung auf verschieden ausgerichtete Fassaden

zu bestimmen und den Winkel, in dem die Strahlung aufs Glas trifft, wird die Position der Sonne für die Simulation berechnet.

### Geographische Breite $\rho$

Die Solarkonstante  $H_{sol}$  variiert am Äquator durch die Exzentrizität der Umlaufbahn der Erde um die Sonne von  $1368 \text{ W/m}^2$  (Aphel) bis  $1418 \text{ W/m}^2$  (Peripel). Diese ist jedoch nicht für die Jahreszeiten verantwortlich. Die Intensität nimmt bei zunehmendem Breitengrad  $\rho$  ab. Am Äquator ist die höchste Einstrahlung vorhanden, da die Flächennormale in die Richtung der Sonne zeigt. Bei steigender Breite erhöht sich der Winkel der Flächennormalen zur Geraden zwischen Sonne und Erde, das bewirkt eine Abnahme der Intensität.

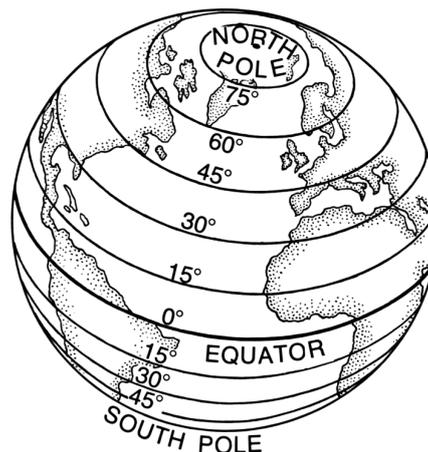


Abbildung 14: Breitengrade auf der Erde

### Deklination $\delta$

Die Neigung der Erdachse wird durch die Deklination  $\delta$  beschrieben. Die Abweichung der Erdachse wird auf die Flächennormale der Ekliptik (Erdumlaufbahn) Ebenen gemessen. Diese ist für die Jahreszeiten auf der Erde verantwortlich, da sich verschiedene Einstrahlintensitäten einstellen. In Tabelle 5 sind markante und bekannte Eckpunkte aufgelistet.

Datum	Deklination	Bedeutung
21. Juli	$-23.45^\circ$	Sonnenwende, Sonnenhöchststand
21./22. Dezember	$23.45^\circ$	Sonnenwende, niedrigster Sonnenstand
21. Februar, 21. September	$0^\circ$	Äquinoktum

Tabelle 5: Eckpunkte des Sonnenstands

In Gleichung 12 ist die Deklination  $\delta$  an jedem Tag  $n$  übers Jahr nach gregorianischer Zeitrechnung mathematisch dargestellt.

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \cos\left(\frac{360^\circ}{365 \text{ d}} \cdot (n + 10 \text{ d})\right) \quad (12)$$

### Stundenwinkel $\omega$

Der Stundenwinkel  $\omega$  beschreibt die Rotation der Erde. Dabei ist der Höchststand der Sonne im Süden der Nullpunkt. Die wahre Ortszeit in Stunden  $t_w$  ist beim Höchststand der Sonne auf 12 h definiert und wird als Referenzpunkt in Gleichung 13 verwendet. In jeder Stunde dreht sich die Erde um  $15^\circ$ .

$$\omega = (t_w - 12 \text{ h}) \cdot 15^\circ \quad (13)$$

Die wahre Ortszeit in Stunden  $t_w$  berechnet sich aus dem Längengrad  $\Phi_w$ , aus der aktuellen Tageszeit nach UTC in Stunden  $t_{akt}$  und der Zeitgleichung in Stunden  $t_{gl}$ . Gleichung 14 stellt den Zusammenhang her.

$$t_w = \frac{\Phi_w}{15^\circ/\text{h}} + t_{akt} + t_{gl} \quad (14)$$

Die Zeitgleichung in Stunden  $t_{gl}$  korrigiert die wahre Ortszeit in Stunden  $t_w$  dadurch, dass die Exzentrizität der Erdumlaufbahn berücksichtigt wird. Die Abweichung variiert bis zu  $\pm 16$  Minuten. Aus Gleichung 15 kann die Abweichung berechnet werden.

$$t_{gl} = \frac{[0.0066 + 7.3525 \cdot \cos(J + 85.9) + 9.9359 \cdot \cos(2J + 108.9) + 0.3387 \cdot \cos(3J + 105.5)] \text{min}}{60 \frac{\text{min}}{\text{h}}} \quad (15)$$

$$J = \frac{360 \frac{\circ}{\text{a}} \cdot n}{8760 \frac{\text{h}}{\text{a}}}$$

## Sonnenstand

Für die Wiedergabe des Sonnenstandes wird als Koordinatensystem das Horizontsystem herangezogen. In Abbildung 15 ist das Horizontsystem dargestellt. Die Position der Sonne ist durch die beiden Winkel Azimut  $\psi$  und Sonnenhöhe  $h$  beschrieben. Die positive Zählrichtung vom Azimut  $\psi$  ist von Süden  $0^\circ$  nach Westen  $90^\circ$  und von der Sonnenhöhe  $h$  vom Horizont  $0^\circ$  zum Zenit  $90^\circ$ .

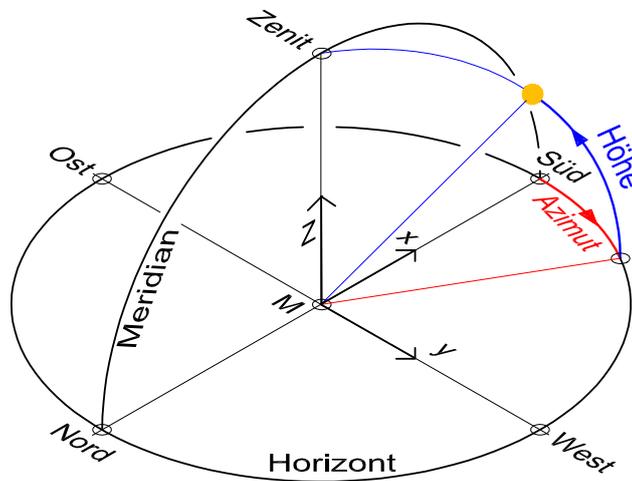


Abbildung 15: Horizontsystem

Der Azimut  $\psi$  kann über die sphärische Trigonometrie mit dem Seiten-Kosinussatz hergeleitet werden. Die in Gleichung 16 dargestellte Formel kann verwendet werden, jedoch muss bei der Umkehrfunktion vom Kosinus (arccos) auf die Eindeutigkeit geachtet werden.

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(h) \cdot \sin(\rho) - \sin(\delta)}{\cos(h) \cdot \cos(\rho)} \quad (16)$$

Die Sonnenhöhe kann ebenfalls über den Seiten-Kosinussatz ermittelt werden. Gleichung 17 stellt die Lösung dar.

$$\sin(h) = \sin(\delta) \cdot \sin(\rho) + \cos(\delta) \cdot \cos(\rho) \cdot \cos(\omega) \quad (17)$$

## Einflüsse von Atmosphäre und Wetter

Die Einflüsse auf die Intensität, die durch die Atmosphäre oder durch Wetterverhältnisse entstehen, müssen nicht betrachtet werden. Die Werte aus Meteoronorm sind bei den gegebenen Standort am Boden bestimmt und beinhalten somit die Verluste durch die Atmosphäre und dem Wetter.

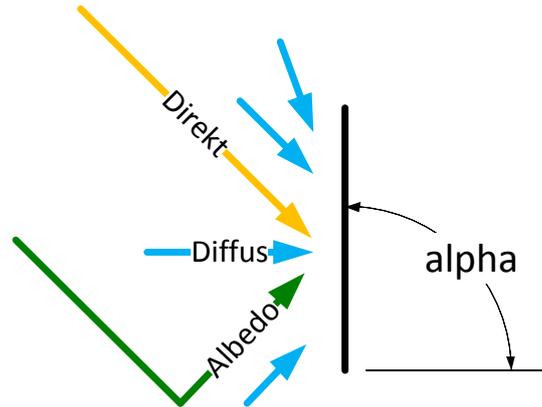


Abbildung 16: 3K-Modell mit Direkt-, Diffus- und Albedostrahlung

### Dreikomponenten Model

Die Strahlung  $H_0$ , die auf eine Fläche auftrifft, kann durch das 3K-Modell beschrieben werden. Es teilt sich in die drei Komponenten Direkt-, Diffus und Albedostrahlung auf. Die Direktstrahlung  $H_{Dir0}$  ist die Strahlung die direkt von der Sonne horizontal auf die Fläche auftrifft. Wenn die Strahlung zur Fläche geneigt ist, kann über die Gleichung 18 die Abweichung berechnet werden.

$$H_{Dir\alpha} = H_{Dir} \cdot \sin(h) \quad (18)$$

Die ungerichtete Strahlung, die durch Streuung in der Atmosphäre entsteht, wird als Diffusstrahlung  $H_{Dif}$  bezeichnet. Besonders bei Nebel oder Bewölkung ist diese Strahlung ausgeprägt. Bei einer geneigten Fläche kann die Diffusstrahlung nach Gleichung 19 beschrieben werden. Da diese Strahlung die Summe aller Richtung ist, kann nicht auf das allgemeine Reflexionsgesetz gegangen werden, jedoch kann mit einer Reflexion von 0.06 eine Annäherung gemacht werden [TON11].

$$H_{Dif\alpha} = \frac{H_{Dif0}}{2} \cdot (1 + \cos(\alpha)) \quad (19)$$

Die dritte Strahlung, die an umliegenden Objekten reflektiert wurde, wird Albedostrahlung  $H_{Alb}$  genannt. Diese ist dynamisch durch Jahreszeiten oder Umgebungsveränderungen und kann nur abgeschätzt werden, diese Abschätzung wird durch den Faktor  $f_{Alb} = 0.15$  gesetzt. Bei einer geneigten Fläche kann Gleichung 20 den Zusammenhang geben.

$$H_{Alb\alpha} = \frac{H_{Glob0} \cdot f_{Alb}}{2} \cdot (1 + \cos(\alpha)) \quad (20)$$

### 2.3. Model der Wärmepumpe

Es wurde ein einfaches Model der Wärmepumpe in EES erstellt. Für die Simulation wurde daraus ein Kennlinienfeld erstellt. Als Eingabewerte sind Vorlauftemperatur  $T_{Vorlauf}$ , Verdampfungstemperatur  $T_{Verdampfer}$  und Verdampferleistung  $\dot{Q}_{Verdampfer}$  gegeben, daraus folgt dann der COP. Zum jetzigen Zeitpunkt wurde der COP jedoch noch nicht abhängig von der Verdampferleistung  $\dot{Q}_{Verdampfer}$  ausgelegt, da ein Arbeitspunkt notwendig ist, auf den die Wärmepumpe ausgelegt ist. Das Model beschreibt eine einstufige Wärmepumpe. Das ph-Diagramm ist in Abbildung 17 gezeigt.

## Verdichter

Der Kompressor verdichtet das Kältemittel vom Punkt 1 auf Punkt 2. Dieser Prozess läuft weder isentrop noch isenthalp ab, aber kann über die isentropische Effizienz  $\eta_{isent}$  beschrieben werden, wie sie in Gleichung 21 dargestellt ist. Die Enthalpie  $h_{2s}$  ist in diesem Fall die Enthalpie bei isentroper Verdichtung.

$$\eta_{isent} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (21)$$

Die Verluste durch den Verdichter wie zum Beispiel Totvolumen und Leckagen wurden nicht ins Model einbezogen, da sie leistungsabhängig sind und nur auf die Kälteleistung auswirken und nicht auf den COP. Die elektrische Leistung  $\dot{Q}_{el}$  ist proportional zur Enthalpiedifferenz  $h_2 - h_1$  und ist in Gleichung 22 gezeigt.

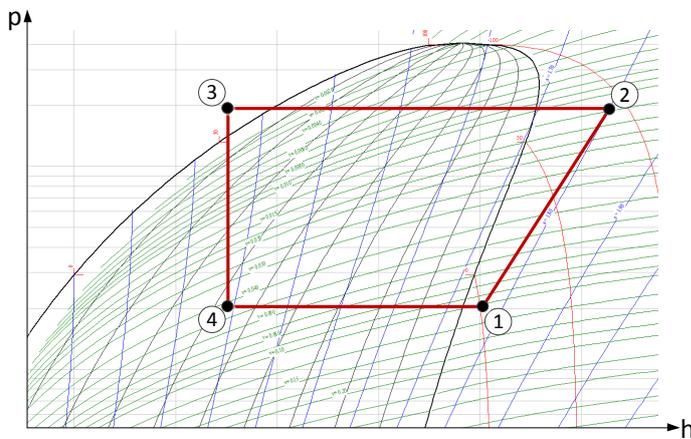
$$\dot{Q}_{el} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_2 - h_1) \quad (22)$$

## Kondensator

Im Kondensator wird das gasförmige Kältemittel kondensiert indem Wärme für Warmwasser oder Heizung abgegeben wird. Aus dem Massenstrom  $\dot{m}_{KM}$  und der Enthalpiedifferenz  $h_3 - h_2$  von Punkt 2 zu Punkt 3 wird die Heizleistung  $\dot{Q}_{Heiz}$  ermittelt und ist in Gleichung 23 beschrieben.

$$\dot{Q}_{Heiz} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_3 - h_2) \quad (23)$$

Als einfaches Model wird hier der Temperaturabstand zwischen Kondensationstemperatur und Vorlauftemperatur auf einen konstanten Wert von 5 K gesetzt.



Parameter	Wert
Überhitzung	5 K
Unterkühlung	5 K
$\eta_{isent}$	0.7
Kältemittel	R134A

Tabelle 6: Kreislaufparameter

Abbildung 17: p-h-Diagramm der Wärmepumpe

## Expansionsventil

Das Expansionsventil reduziert den Druck von Punkt 3 auf Punkt 4. Es ist ein isenthalper Vorgang und somit ist  $h_3 = h_4$ .

## Verdampfer

Der Verdampfer nimmt Wärme aus der Quelle auf, um das flüssige Kältemittel zu verdampfen. Dabei erhöht sich die Enthalpie von Punkt 4 zu Punkt 1. Die Kälteleistung  $\dot{Q}_{Kälte}$  wird über den Massenstrom  $\dot{m}_{KM}$  und die Enthalpiedifferenz  $h_1 - h_4$  hergeleitet und ist in Gleichung 24 gezeigt.

$$\dot{Q}_{K\ddot{a}l\ddot{t}e} = \dot{m}_{KM} \cdot (h_1 - h_4) \quad (24)$$

Wie beim Kondensator wird eine konstante Temperaturdifferenz als Modell gewählt. Es wird zwischen Verdampfungs- und Kollektortemperatur eine Differenz von 5 K für die Variante 'Direkte Verdampfung Parallel' eingestellt. Für die Variante 'Zwischenkreislauf pro Stockwerk Seriell' wird ein Temperaturabstand von 10 K gewählt, da ein Zwischenkreislauf mit Wasser vorhanden ist. Dieses Modell mit einer konstanten Temperaturdifferenz ist für den jetzigen Stand der Simulation ausreichend genau.

### Effizienz der Wärmepumpe

Die Effizienz der Wärmepumpe wird über den Coefficient of performance *COP* dargestellt. Dieser berechnet sich allgemein über das Verhältnis Nutzen zum Aufwand. Konkret ist dies in Gleichung 25 gezeigt.

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (25)$$

## 2.4. Ablauf der Gesamtsimulation

Die Gesamtsimulation ist in Matlab aufgebaut. Matlab ist primär für numerische Berechnungen mit Matrizen ausgelegt. Dies wird hier nun genutzt um eine Jahressimulation durchzuführen die in Stunden unterteilte Meteonormdaten verwendet. Die Matrix aus 8760 Datenpunkten (8760 Stunden = 1 Jahr) und vier Fassadenvarianten ist als Grundstruktur der Daten gegeben. Folgender Ablauf wird parallel für jeden Datenpunkt durchgeführt:

- Berechnung der Sonnenposition.
- Berechnung der Direkt-, Diffus- und Albedostrahlung auf eine vertikale Fläche.
- Berechnung des Strahlungseintrags auf den Kollektor und der daraus folgenden Kollektortemperatur. Hier sind die Modelle der Fassade integriert.
- Berechnung des COP bei gegebener Kollektortemperatur. Die Wärmepumpe wurde vorgängig in EES simuliert und ist als Kennlinienfeld vorhanden.
- Berechnung der Heizleistung durch den COP und den solaren Eintrag.
- Berechnung des Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser.

Die berechneten Daten können dann für die Auswertung und Darstellung benutzt werden.

### 3. Ergebnisse

Folgende Ergebnisse wurden, wenn nicht anders deklariert, mit dem Meteonorm Datensatz von Zürich errechnet. Daneben wurde nur die Anbindung mit 'Direkte Verdampfung Parallel' betrachtet um das Potenzial abzuschätzen.

#### 3.1. Bilanz der Energien

Um den Ertrag der vier Fassadenrichtungen darzustellen, wurde ein Plot mit der Akkumulation der Energien über einen Monat erstellt. Diese ist in Abbildung 18 aufgezeigt. Neben den Fassaden wurde ebenfalls der Brauchwarmwasser- und Heizwärmebedarf aufgezeigt.

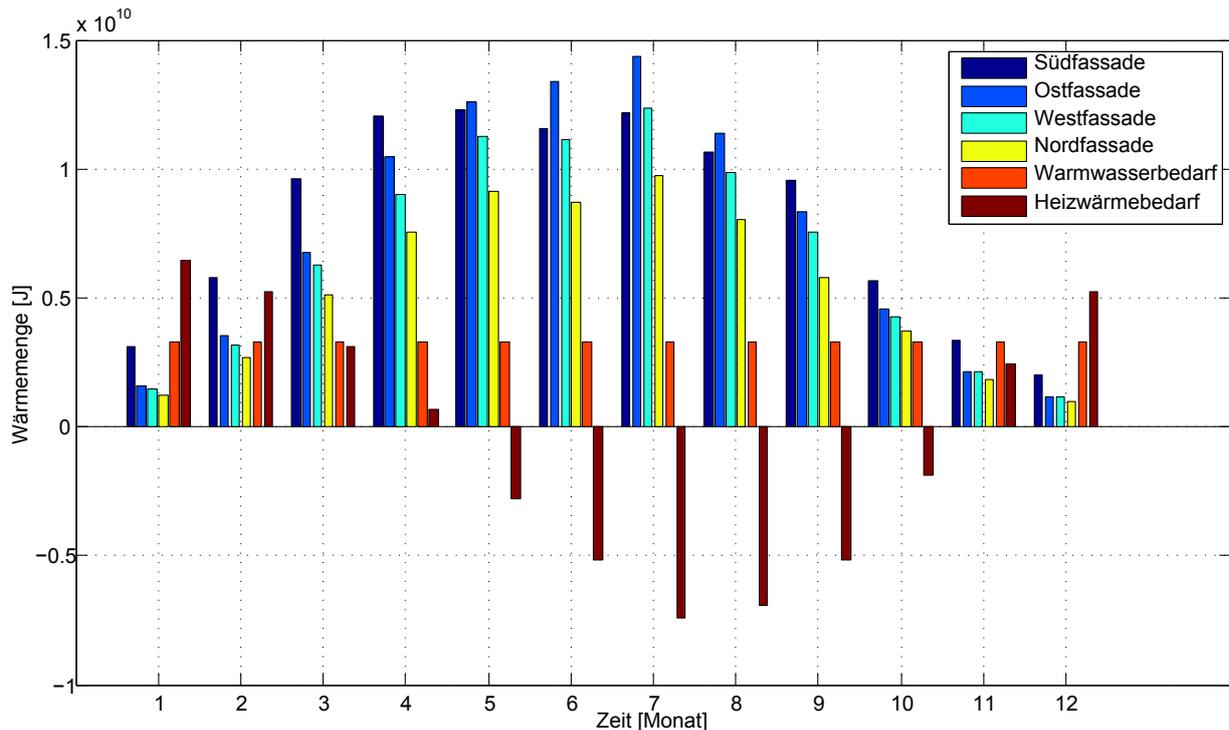


Abbildung 18: Bilanz der Energien pro Monat

Man erkennt eindeutig den saisonalen Einfluss durch die Sonnenscheindauer auf die Fassade bei der nutzbaren Energie. Dazu gegenläufig den Heizwärmebedarf, der im Winter hoch ist und im Sommer negativ wird, was bedeutet, dass gekühlt werden sollte, um die Raumtemperatur zu halten. Der Warmwasserbedarf bleibt übers Jahr derselbe. Allgemein gefolgert werden kann, dass der Flaschenhals die Wintermonate sind und auf diese Zeit die Heizung ausgelegt werden muss.

Beim Vergleich der vier Fassaden erkennt man, dass die Südfassade in den Wintermonaten deutlich den höchsten Ertrag bringt. Aber im Sommer hinter der Westfassade hinterherhinkt. Dies lässt sich so erklären, dass im Sommer während der Mittagszeit die Sonne im Zenit steht und somit keine direkte Strahlung die Südfassade trifft, sondern nur senkrecht aufs Dach trifft. Im Winter jedoch steht die Sonne so tief, dass über den Mittag sehr viel Strahlung auf die Fassade fällt.

Wenn man die Fassaden priorisiert, dann ist die Südfassade die Hauptfassade, danach kommt die Ostfassade, Westfassade und Nordfassade dazu. In den weiteren Betrachtungen wurde jeweils von der Südfassade ausgegangen und jeweils die nächstertragreichere dazu gefügt.

Es ist noch zu beachten, dass diese Akkumulation der Erträge nichts über die Deckung des Wärmebedarfs eines Gebäudes aussagt. Dazu muss erst ein Speicher definiert werden, der die jeweils ertragarmen Tagen überbrücken kann.

### 3.2. Deckungsgrad

Um nun abzuschätzen zu können, ob ein Gebäude mit Fensterkollektoren selbstversorgend ist. Was bedeutet ob die eingebrachte Energie den Verbrauch decken kann, wird der Deckungsgrad definiert.

**Der Deckungsgrad ist der Anteil Tage pro Jahr, die wärmetechnisch selbstversorgend sind.**

In dieser Arbeit wird, wenn nichts andere deklariert ist, davon ausgegangen, dass ein Tagesspeicher eingesetzt wird. Grössere Speicher bedeuten grösseren Aufwand und Kosten. Es gibt Konzepte mit Erdsondenfeldern, Energiepfähle oder grossen Warmwasserspeichern, die sehr kostenintensiv sind und hier nicht eingesetzt werden.

Übers Jahr betrachtet verhält sich der Deckungsgrad gemäss Abbildung 19. In den Sommermonaten kann der Bedarf gedeckt werden. In den Wintermonaten gibt es viele Tage, die auf Grund längerer ertragbarer Tage nicht gedeckt sind und eine zusätzliche Wärmequelle benötigt wird.

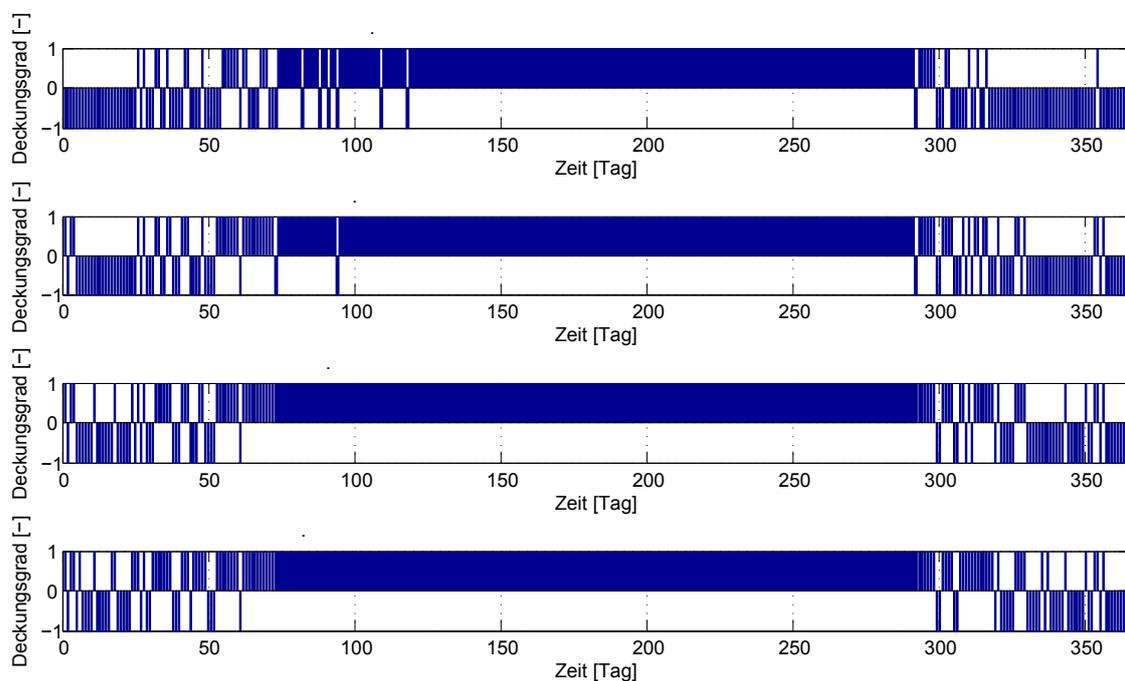


Abbildung 19: Deckungsgrad pro Tag für Warmwasser- und Heizwärmebedarf

Die Übersicht ist in Abbildung 20 gegeben. Man erkennt, dass der Deckungsgrad höher liegt, wenn nur der Warmwasserbedarf oder der Heizenergiebedarf beliefert wird. Wenn man die einzelnen Fassadenkombinationen betrachtet, erkennt man, dass die Südfassade allein den grössten Teil des Bedarfs decken kann, jede zusätzliche Fassade, die mit Fensterkollektoren ausgestattet wird, bringt einen nur geringfügig grösseren Deckungsgrad. Der Grund ist, dass in den Sommermonaten die Südfassade den Warmwasserbedarf leicht liefern kann und auch schon einen Überschuss generiert.

### 3.3. Parametrische Studie

Um nun verschiedene Einflüsse zu untersuchen, wurde eine parametrische Studie durchgeführt. Dabei wurden die bisherigen Fassadenkombinationen und Wärmebedarfskombinationen aufgezeigt.

- Variation der Kollektorfläche durch den Nutzungsgrad  $\eta_{Nutz}$
- Variation der Kollektortemperatur  $\Delta T_{Kollektor}$
- Variation des Albedofaktors  $f_{Alb}$

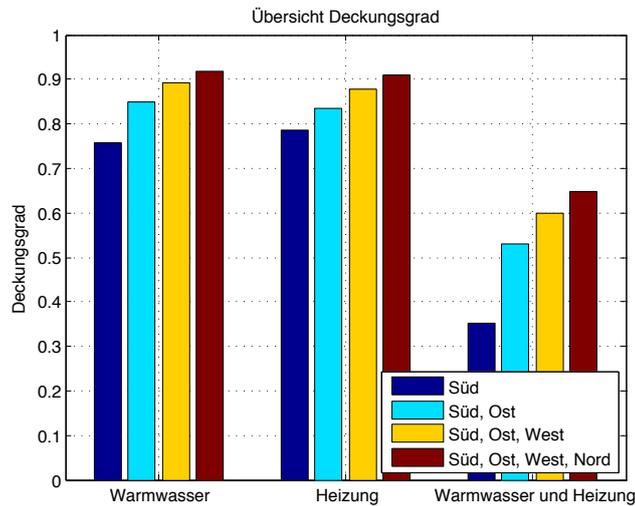


Abbildung 20: Deckungsgrad von Warmwasser, Heizung und beide zusammen

Zusätzlich könnte man noch die Konvektion in der Fassade oder die Vorlauftemperatur variieren. Jedoch stellte sich heraus, dass diese Parameter keinen sehr grossen Einfluss auf den Deckungsgrad haben. Sie beeinflussen diesen im untersten einstelligen Prozentbereich und sind hier nicht weiter aufgeführt.

### Variation des Nutzungsgrades $\eta_{Nutz}$

Der Nutzungsgrad  $\eta_{Nutz}$  wurde zwischen 0 und 1 variiert, das bedeutet, dass von der Fassadenfläche von 0 bis 100% für den Kollektor verwendet wird. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 geplotet.

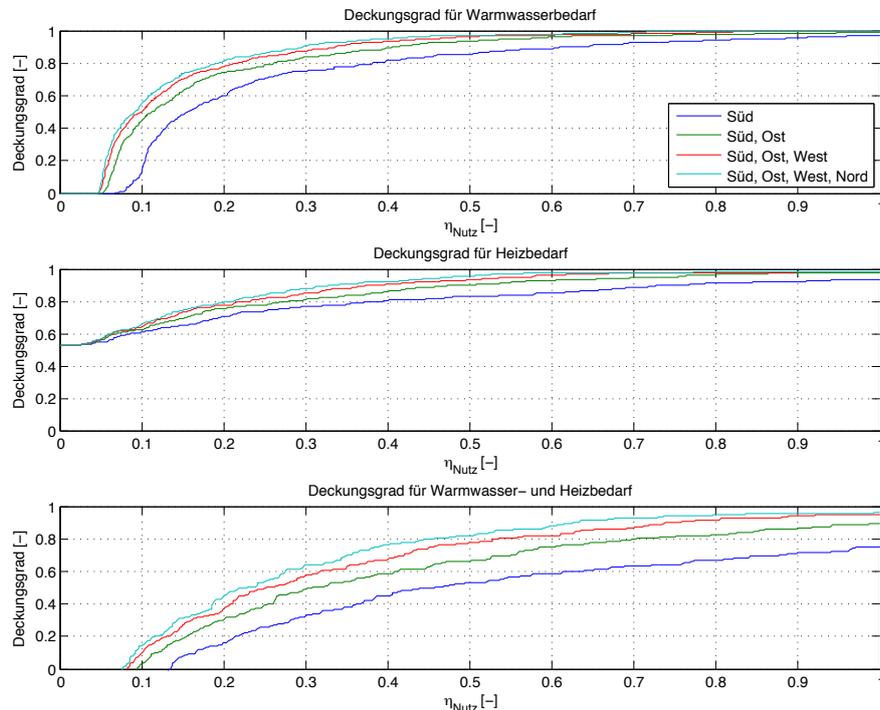


Abbildung 21: Abhängigkeit des Deckungsgrad zum Nutzungsgrad

Man erkennt, dass beim Warmwasser der sinnvolle Punkt im Bereich von 20 bis 40% liegt. Beim Heizwärmebedarf besteht ein Offset, gegeben durch die Sommermonate, wo kein Wärmebedarf vorhanden ist. Danach liegt der sinnvolle Punkt ebenfalls zwischen 20 und 40%. Wenn Warmwasser-

und Heizbedarf zusammengefasst sind, wird die Kurve flacher und verschiebt sich von der y-Achse weg. Das bedeutet, dass eine höher Nutzungsgrad notwendig ist, um den gleichen Deckungsgrad zu erreichen.

### Variation der Kollektortemperatur $\Delta T_{Kollektor}$

Die Kollektortemperatur sollte über der Aussentemperatur liegen, damit kein Kondenswasser entsteht. Jedoch darf die Temperatur auch nicht zu hoch sein, da thermische Abstrahlung und Konvektion entstehen kann, die die Effizienz des Kollektors vermindert. Der Einfluss ist in Abbildung 22 dargestellt.

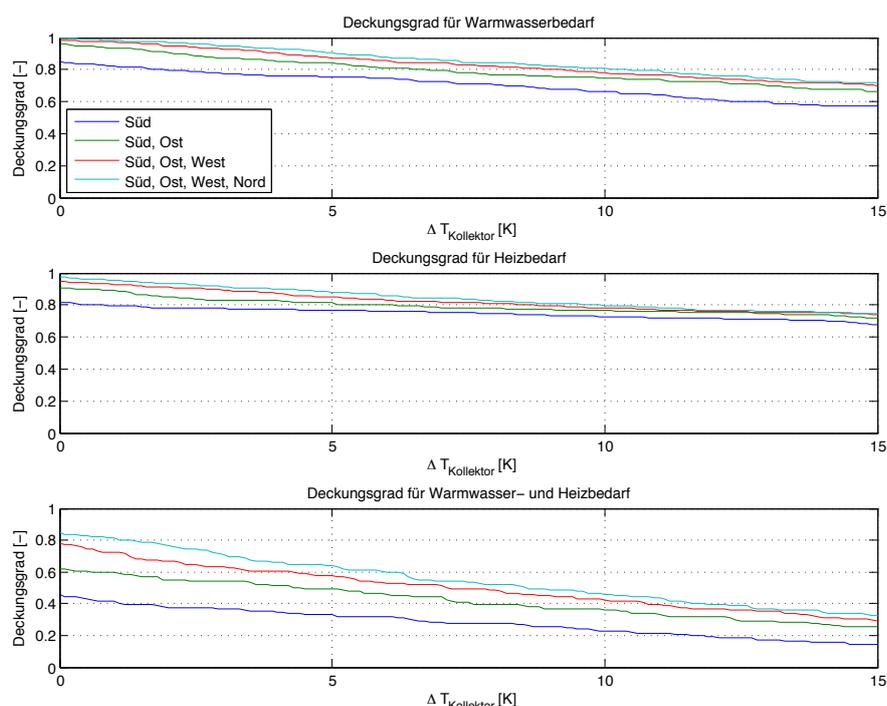


Abbildung 22: Abhängigkeit des Deckungsgrad zur Kollektortemperatur

Man erkennt bei hoher Temperaturdifferenz einen massiven Einfluss auf den Deckungsgrad. Bis zu 50% Reduktion des Deckungsgrads für Warmwasser- und Heizbedarf wird erwartet. Es ist darum wichtig, die Kollektortemperatur zu regeln, damit keine zu grossen Temperaturunterschiede entstehen können.

### Variation des Albedofaktors $f_{Alb}$

Der Albedofaktor ist eine empirische Grösse und ist je nach Umgebung anders. Es gibt auch eine saisonale Abhängigkeit, denn bei Schnee erhöht die Reflexion der direkten Strahlung und kann einen grossen Einfluss auf die Effizienz haben. Als Richtwert wird meist der Wert 0.15 bis 0.2 angegeben. Hier wurde aber das ganze Potential betrachtet und die Ergebnisse mit dem Albedofaktor zwischen 0 und 1 in Abbildung 23 aufgezeigt.

Wie vermutet steigt bei höherem Albedofaktor der Deckungsgrad. Jedoch wird man nie einen Albedofaktor von 1 erreichen.

### 3.4. Variation der Standorte

Der Deckungsgrad ist standortabhängig, was vor allem klimatisch und höhenbedingt ist. Aus diesem Grund wurde für drei weitere Standorte eine Simulation durchgeführt. Darunter sind Davos, als ein hochgelegener Ort mit wenig Nebel, Genf, ein Stadt in der Westschweiz und Locarno, eine Stadt in der Sonnenstube der Schweiz.

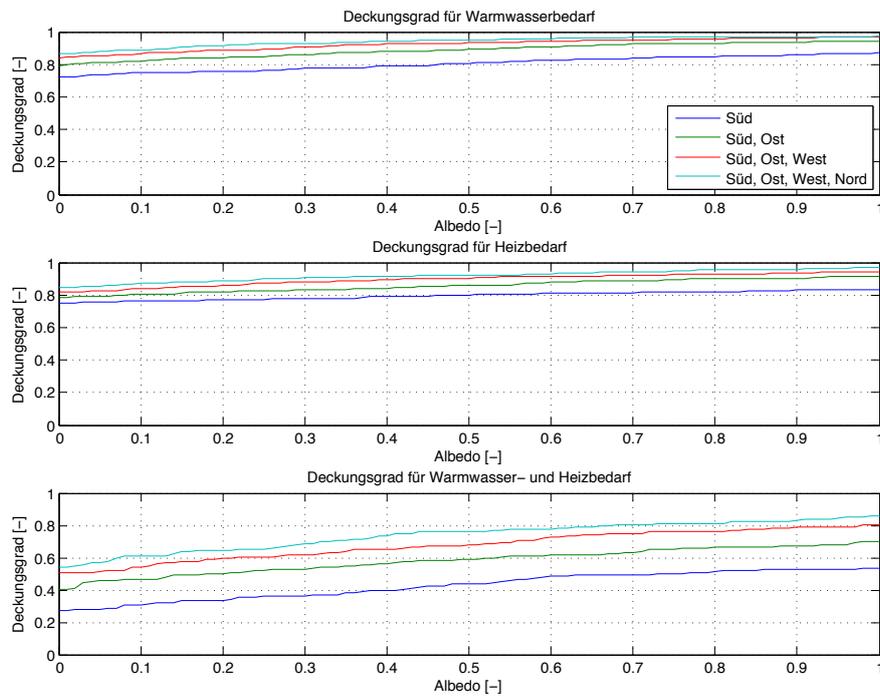


Abbildung 23: Abhängigkeit des Deckungsgrad zum Albedofaktor

### Davos

Der Deckungsgrad für Davos sieht deutlich anders aus als für Zürich. Dies lässt sich einfach den sehr geringen Vorkommen von Nebel erklären. In Abbildung 24 ist ersichtlich, dass für Warmwasser der Deckungsgrad über 95% liegt. Für die Heizung liegt sie einige Prozente über dem von Zürich. Hier ist natürlich zu beachten, dass durch die höhere Lage tiefer Temperaturen herrschen und somit eine höhere Heizlast vorhanden ist. Die Bilanz der Energien ist im Anhang A.2 dargestellt.

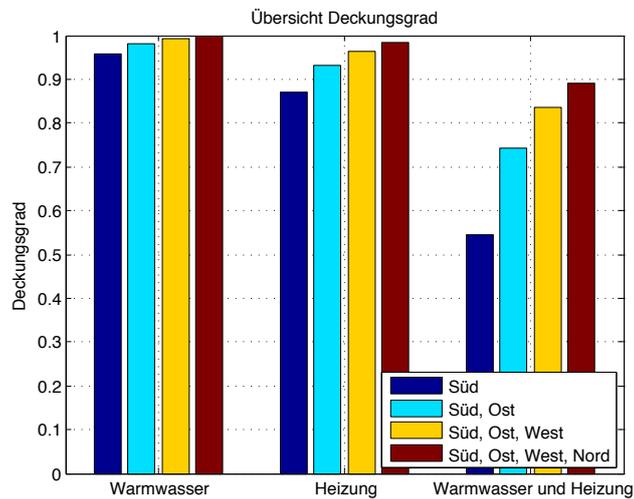


Abbildung 24: Deckungsgrad von Davos mit Tagesspeichern

### Genf

Der Deckungsgrad für Genf ist etwas höher aber doch sehr ähnlich wie Zürich. Klimatisch gesehen unterscheidet es sich nur geringfügig von Zürich und man kann somit auf ähnliche Ergebnisse schließen.

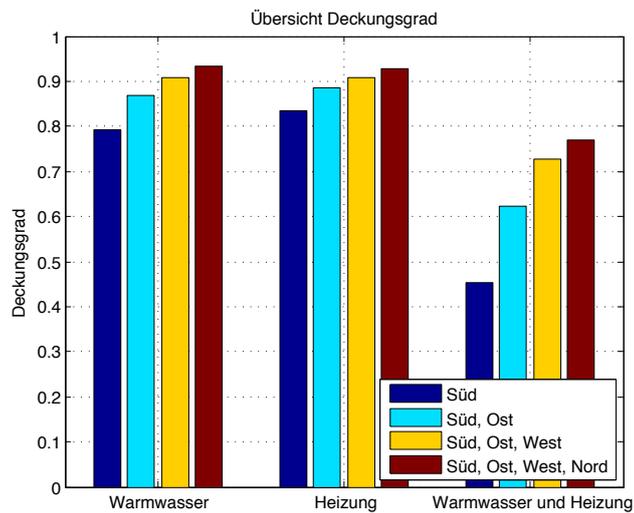


Abbildung 25: Deckungsgrad von Genf mit Tagesspeichern

### Locarno

Der Deckungsgrad von Locarno ist ähnlich wie Davos. Hier ist jedoch der Einfluss der tiefen Lage erkennbar, denn der Heizungsbedarf liegt tiefer. Da es gegenüber Davos mehr Nebel in Locarno hat, können die schlechteren Ergebnisse vom Warmwasserdeckungsgrad erklärt werden.

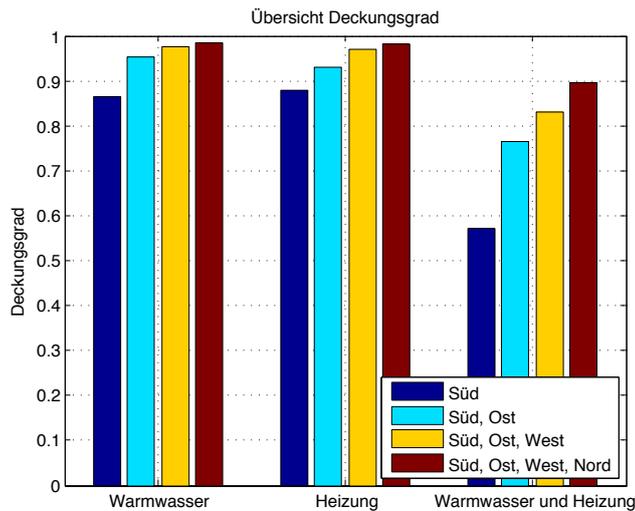


Abbildung 26: Deckungsgrad von Locarno mit Tagesspeichern

### 3.5. Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl  $JAZ$  ist ein Massstab für die Effizienz einer Wärmepumpenanlage und sagt wie viel Wärme im Verhältnis zur eingesetzten elektrischen Energie von einer Wärmepumpe über ein ganzes Jahr in einem Objekt erzeugt wurde. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 26 dargestellt.

$$JAZ = \frac{Q_{Heiz,jahr}}{W_{el,jahr}} \quad (26)$$

Die  $JAZ$  wurde für den Standort Zürich mit einer Südfassade bestimmt. Es wurde von einem Tagesspeicher ausgegangen und die Vorlauftemperatur wurde variiert. Die ideale Vorlauftemperatur ist für Warmwasser und Heizung unterschiedlich. Bei Warmwasser geht es darum eine möglichst hohe Temperatur um 50 bis 65°C zu fahren wegen der Legionellenprävention. Bei der Heizung

sieht dies anders aus, da wird eine möglichst tiefe Vorlauftemperatur gefahren um die Effizienz des Systems hoch zu halten. Die Wärmepumpe hat bei einem kleinen Temperaturhub eine höhere Effizienz und je nach Heizsystem kann eine Vorlauftemperatur zwischen 35 und 45°C gefahren werden.

<b>Vorlauftemperatur</b>	<b>35°C</b>	<b>45°C</b>	<b>55°C</b>	<b>65°C</b>
<i>JAZ<sub>Warmwasser</sub></i>			4.1	3.4
<i>JAZ<sub>Heizung</sub></i>	4.3	3.4		

Tabelle 7: Jahresarbeitszahl bei verschiedenen Vorlauftemperaturen

Aus den ermittelten Daten, die in Tabelle 7 abgelegt sind, kann man klar erkennen, dass desto höher die Vorlauftemperatur ist, desto geringer die Jahresarbeitszahl wird. Ebenfalls kann man erkennen, dass obwohl eine höhere Vorlauftemperatur gefahren wird, die Jahresarbeitszahl von Warmwasser ähnlich wie die der Heizung ist. Der Grund ist, dass Warmwasser übers ganze Jahr benötigt wird und darum auch im Sommer mit einer sehr guten Effizienz aufgeheizt wird. Daneben ist der Heizungswärmebedarf nur im Winter vorhanden und durch die kalte Aussenluft ist der Temperaturhub sehr hoch.

## 4. Kostenschätzung der Fassade

Um die Fassadenkosten für einen Fensterkollektor abzuschätzen, wird wieder vom Roche Tower in Rotkreuz ausgegangen. Es werden zwei unterschiedliche Abschätzungen gemacht.

### 4.1. Abschätzung über die Komponenten

Die erste Abschätzung wird über die Komponenten gemacht. Darin enthalten sind die Fassadenkosten ohne Kollektor, Kollektorkosten und der Aufwand für Anbringung und Anschluss an den Wärmepumpenkreislauf. In Tabelle 8 sind die Komponenten sowie die Kosten aufgetragen. Man unterscheidet zwischen Komponentenkosten und Fassadenkosten. Die Komponentenkosten sind wie der Name schon sagt nur auf die Komponente bezogen. Bei den Fassadenkosten wird der Nutzungsgrad  $\eta_{Nutz}$  von 30% miteinbezogen.

Komponente	Komponentenkosten [CHF/m <sup>2</sup> ]	Fassadenkosten [CHF/m <sup>2</sup> ]
Fassade	1'200	1'200
Kollektor	700	210
Befestigung	50	15
Kupferrohr (2 m)	50	15
<b>Total</b>		<b>1'440</b>

Tabelle 8: Schätzung der Kosten pro m<sup>2</sup>

Die **Fassade** hat gemäss den Architekten vom Roche Tower einen Preis von 1'200 CHF/m<sup>2</sup> gehabt. Die Kosten für den **Kollektor** könnten je nach Bauart zwischen 400-1'200 CHF/m<sup>2</sup> liegen. Hier wird ein Wert von 700 CHF/m<sup>2</sup> gewählt. Für die **Befestigung** und für den **Anschluss** ans System wird je ein Schätzwert von 50 CHF/m<sup>2</sup> gewählt.

Aus der Kalkulation kann nun ein Richtwert von **1'440 CHF/m<sup>2</sup>** ausgegangen werden. Im Bezug auf die Fassade ohne Kollektoren erzeugt der Fensterkollektor einen Aufpreis von 20%. Da jedoch die Kosten für den Speicher, Arbeitsaufwand und Wärmepumpe nicht enthalten sind, werden diese über eine zweite Abschätzung miteinbezogen.

### 4.2. Abschätzung über BFE-Artikel

Das Bundesamt für Energie gab in einem Artikel über Sonnewärme eine Grafik heraus, die in Abbildung 27 dargestellt ist [BFE02]. Darin sind die Kosten pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche dargestellt. In diesen Kosten ist der Kollektor, Leitungen, Apparate, Regulierung, Speicher sowie die Arbeit mit eingerechnet.

Bei 160 m<sup>2</sup> Fassadenfläche (Kollektorfläche 48 m<sup>2</sup>) kann nun durch Herauslesen die Zusatzkosten für die Fassade auf ca. 1'000-1'500 CHF geschätzt werden.

Was nun die Gesamtkosten für die Fassade auf **1'500 CHF/m<sup>2</sup>** erhöht (ausgegangen von 1'000 CHF Investitionskosten pro m<sup>2</sup> und dem Nutzungsgrad von 30%). Die gesamten Investitionskosten steigen um 25%.

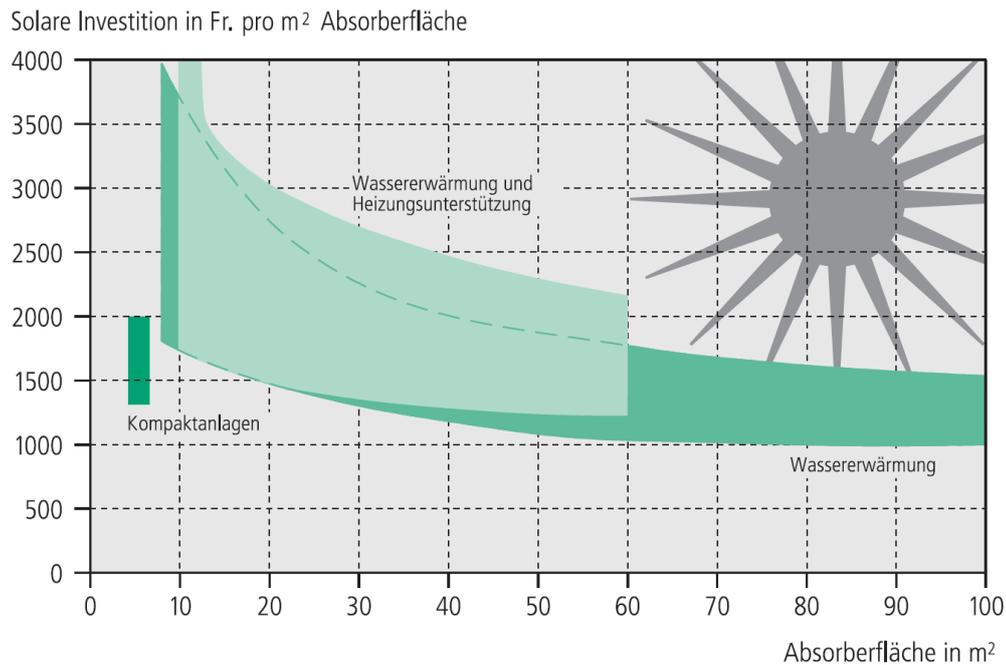


Abbildung 27: Solare Investitionskosten (Förderbeiträge nicht berücksichtigt) [BFE02]

## 5. Schlussfolgerung und Ausblick

Im Zuge dieser Vorstudie wurde eine Simulation aufgesetzt, um das Potenzial des Fensterkollektors abzuklären. Folgende Schlussfolgerungen können nun gezogen werden.

- Der Fensterkollektor kann den Wärmebedarf über einen Grossteil des Jahres decken, jedoch zeigte sich, dass eine zweite Wärmequelle oder einen grösseren Speicher nötig ist, um die ertragarmen Tag zu decken.
- Das Verhältnis Kollektorfläche zu Fassadenfläche ist bei 0.2 bis 0.4 für die Orte Zürich, Davos, Genf und Locarno sinnvoll, wenn nur der Warmwasserbedarf oder der Heizbedarf gedeckt werden muss. Beim Gesamtwärmebedarf sollte ein höheres Verhältnis angestrebt werden.
- Die Einflüsse des Klimas und der Höhenlage sind sehr gross und sollten für jeden neuen Standort betrachtet werden.
- Der zusätzliche Aufwand für eine Fassade mit einem Fensterkollektor würde 25% der Fassadenkosten ausmachen (Roche Tower, Rotkreuz).

Während der Vorstudie kamen Punkte zusammen die noch nicht umgesetzt werden konnten. Folgender Ausblick gibt weitere Arbeiten an, die im Zuge eines fort folgenden Projektes untersucht werden könnten.

- Die Integration von verschiedenen dynamischen Speichersystemen in die Simulation könnte Aufschluss geben, wie gross und welche Eigenschaften ein Speicher haben soll, um den Deckungsgrad zu optimieren.
- Der Einfluss von umliegenden Gebäuden und Gelände ist in der Simulation nicht enthalten und könnte als Modelloptimierung eingebaut werden.
- Eine Verifikation der Simulation durch einen Prototyp wäre sinnvoll, da die Simulation durch Annahmen und Vereinfachungen die Natur nicht eins zu eins wiedergibt.

## Literatur

- [BFE02] Bundesamt für Energie BFE, Sonnenwärme, Kosten und Kennzahlen, 2002.
- [DGS08] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Leitfaden Solarthermische Anlagen, Landesverband Berlin Brandenburg, 2008
- [HAF03] Haferkorn, H.: Optik, Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen, Wiley-VCH, 2003
- [LUQ03] Luque, A.; Hegedus, S.: Handbook of photovoltaic science and engineering, Wiley, 2003
- [MAR12] Markstaler, M.; Photovoltaik Skript Herbst 2012, NTB, 2012
- [TAN04] Tanner, C.; Zürcher, C.: Bauphysik der hinterlüfteten Fassaden, Ein Einblick in ausgewählte physikalische Phänomene und Folgerungen für die konstruktive Umsetzung und Ausführung. Zürcher Hochschule Winterthur, 2004.
- [TEL12] Telepski, J.: Window element with a solar collector. WO 2012/056297 A2
- [TON11] Tongtuam; Y. et al.: Effect of the diffuse radiation reflection from exterior wall on shading device integration photovoltaic case of thailand building. Energy Procedia 9 (2011) 104-116.
- [VDI06] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag Berlin, 2006

## A. Anhang

### A.1. Beurteilung der Anbindung des Fensterkollektors an die Wärmepumpe

#### Direkte Verdampfung Seriell (DVS)

Die Fensterkollektoren werden seriell verbunden. Sie wirken als Direktverdampfer im Wärmepumpenkreislauf.

- Vorteil
  - Einfacher Kreislauf, keine zusätzlichen Wärmetauscher und Pumpen nötig.
  - Einfache Leitungsführung möglich, es muss nicht parallel gefahren werden.
  - Gleichmässige Temperaturverteilung in der Fassade gewährleistet (ausser beim Überhitzungselement)
- Nachteil
  - Hohe Drücke in den Leitungen, bewegliche Leitungen möglich, sind aber sehr teuer.
  - Bei Wartungsarbeiten in der Fassade muss der Kältekreislauf geöffnet werden.
  - Durchfluss jedes Fassadenelementes ist gleich.

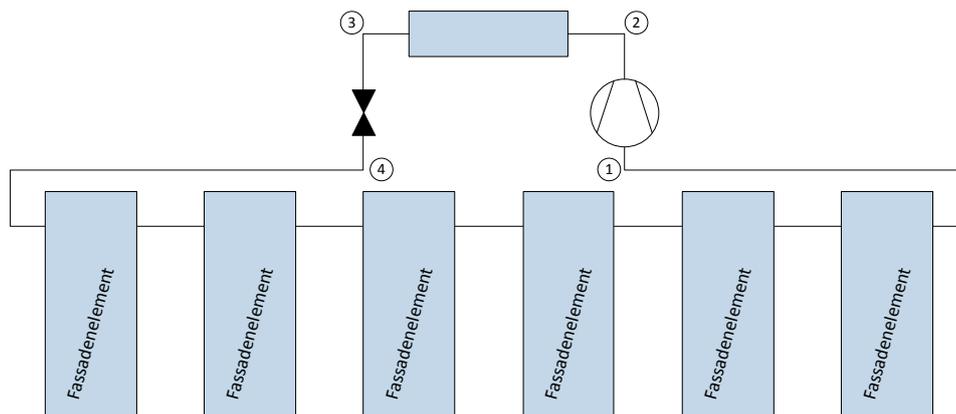


Abbildung 28: Schema von Direkte Verdampfung Seriell

#### Direkte Verdampfung Parallel (DVP)

Die Fensterkollektoren werden parallel verbunden. Sie wirken als Direktverdampfer im Wärmepumpenkreislauf.

- Vorteil
  - Einfacher Kreislauf, keine zusätzlichen Wärmetauscher und Pumpen nötig.
  - Durchfluss jedes Fassadenelementes kann variiert werden (Zusatzkomponenten nötig).
  - Gleichmässige Temperaturverteilung ist gewährleistet.
- Nachteil
  - Hohe Drücke in den Leitungen, bewegliche Leitungen möglich, sind aber sehr teuer.
  - Bei Wartungsarbeiten in der Fassade muss der Kältekreislauf geöffnet werden.
  - Doppelte Leitungsführung nötig.

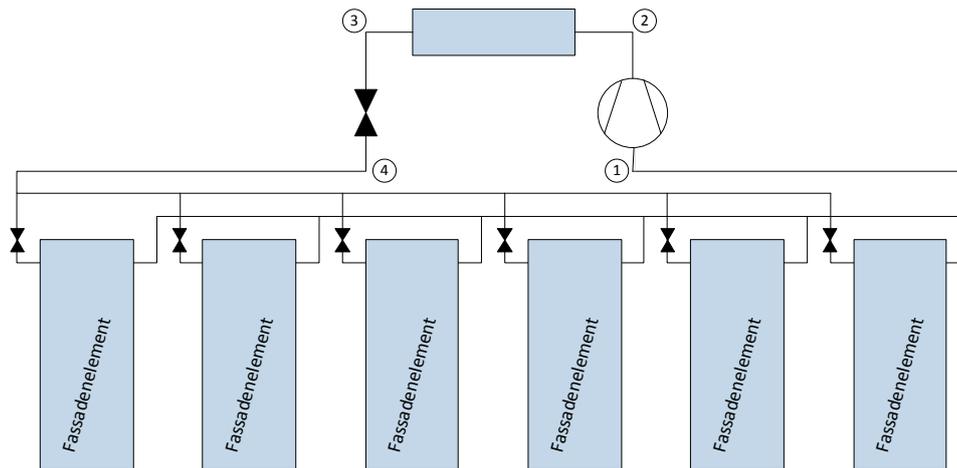


Abbildung 29: Schema von Direkte Verdampfung Parallel

### Zwischenkreislauf pro Element (ZPE)

Die Fenstekollektoren werden einzeln über einen Zwischenkreislauf an den Wärmepumpenkreislauf angekoppelt.

- Vorteil
  - Bewegliche Leitungen sind möglich, da kein sehr grosser Überdruck besteht.
  - Bei Wartung sind die einzelnen Fassadenelemente abkoppelbar.
  - Kältekreislauf bleibt ins sich geschlossen.
  - Gleichmässige Temperaturverteilung gewährleistet.
  - Durchfluss jedes Elementes kann variiert werden.
- Nachteil
  - Durch die Wärmetauscher wird die Wärmeübertragung vermindert.
  - Zirkulation muss über Pumpen herbeigeführt werden.
  - Hohe Kosten durch zusätzliche Wärmetauscher und Pumpen.

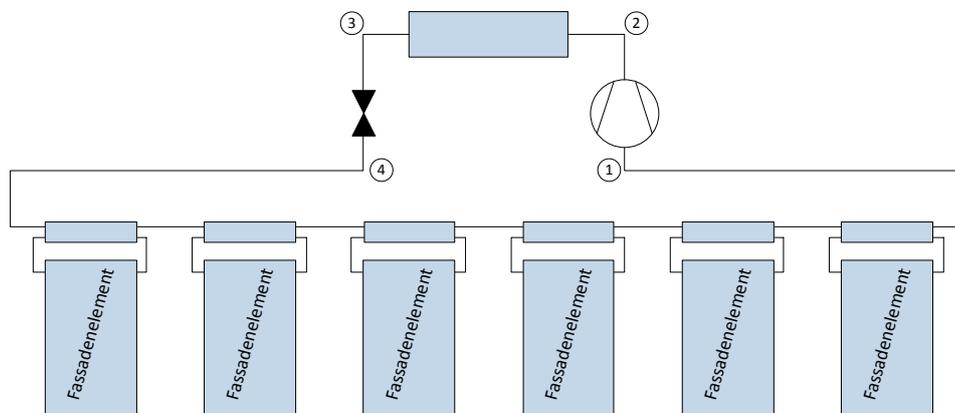


Abbildung 30: Schema von Zwischenkreislauf pro Element

### Zwischenkreislauf pro Stockwerk Seriell (ZPSS)

Die Fensterkollektoren werden seriell durch einen Zwischenkreislauf an den Wärmepumpenkreislauf angebunden.

- Vorteil
  - Bewegliche Leitungen sind möglich, da kein sehr grosser Überdruck besteht.
  - Nur ein zusätzlicher Wärmetauscher für den Zwischenkreislauf nötig.
  - Kältemittelkreislauf bleibt von der Fassade abgekoppelt.
- Nachteil
  - Durch den Wärmetauscher wird die Wärmeübertragung vermindert.
  - Zirkulation muss über Pumpen herbeigeführt werden.
  - Ungleichmässige Temperaturverteilung übers Stockwerk.
  - Zwischenkreislauf muss geöffnet werden, wenn Elemente abgekoppelt werden.
  - Durchfluss jedes Fassadenelementes ist gleich.

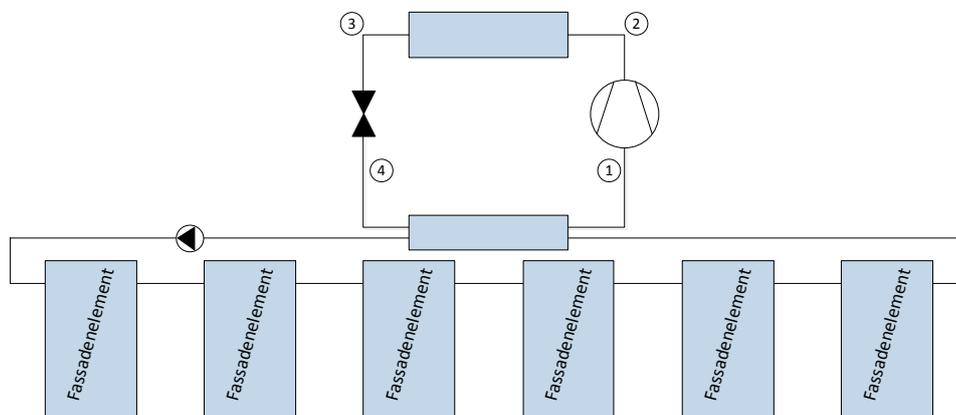


Abbildung 31: Schema von Zwischenkreislauf pro Stockwerk Seriell

### Zwischenkreislauf pro Stockwerk Parallel (SPSP)

Die Fensterkollektoren werden parallel durch einen Zwischenkreislauf an den Wärmepumpenkreislauf angebunden.

- Vorteil
  - Bewegliche Leitungen sind möglich, da kein sehr grosser Überdruck besteht.
  - Nur ein zusätzlicher Wärmetauscher für den Zwischenkreislauf nötig.
  - Kältemittelkreislauf bleibt von der Fassade abgekoppelt.
  - Gleichmässige Temperaturverteilung übers Stockwerk.
  - Durchfluss jedes Elementes könnte variiert werden (Zusatzkomponenten nötig).
- Nachteil
  - Durch den Wärmetauscher wird die Wärmeübertragung vermindert.
  - Zirkulation muss über Pumpen herbeigeführt werden.
  - Zwischenkreislauf muss geöffnet werden, wenn Elemente abgekoppelt werden.

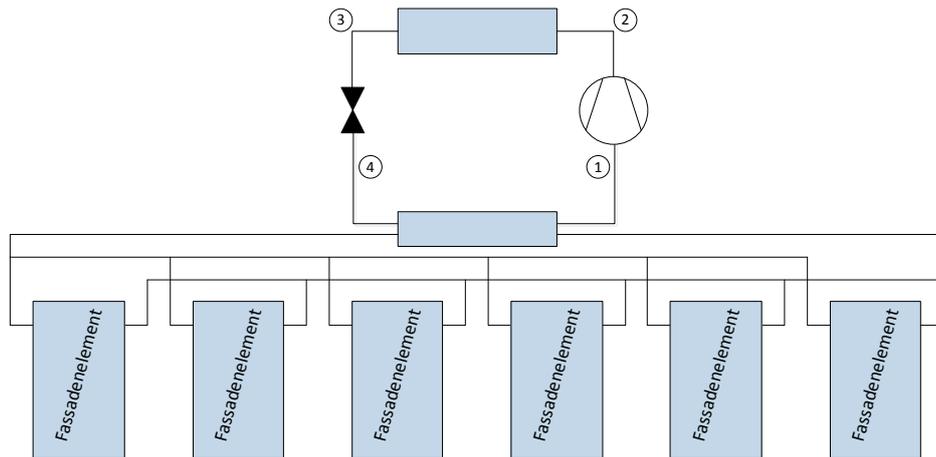


Abbildung 32: Schema von Zwischenkreislauf pro Stockwerk Parallel

### Beurteilung der Einbindungen

Durch die Auflistung der Vor- und Nachteile kann nun eine Beurteilung abgegeben werden, welche Anbindung verwendet werden kann. Diese Anbindungen wurden in der Simulation nur mit vereinfachten Annahmen modelliert. Bei den Direktverdampfern ging man davon aus, dass eine kleine Temperaturdifferenz von Kollektortemperatur zur Überhitzungstemperatur herrscht. Bei den Zwischenkreisläufen wurde eine grössere Temperaturdifferenz angenommen.

Kriterium	DVS	DVP	ZPE	ZPSS	ZPSP
Flexibilität der Anschlüsse	schlecht	schlecht	gut	gut	gut
Flexibilität des Durchflusses	schlecht	gut	gut	schlecht	gut
Wartung Fassadenelement	schlecht	schlecht	gut	mittel	mittel
Wärmeübertragung	gut	gut	mittel	mittel	mittel
Kosten/Aufwand gut	gut	schlecht	mittel	mittel	

Tabelle 9: Beurteilung der verschiedenen Einbindungen

## A.2. Bilanz der Energien für Davos, Genf, Locarno

### Davos

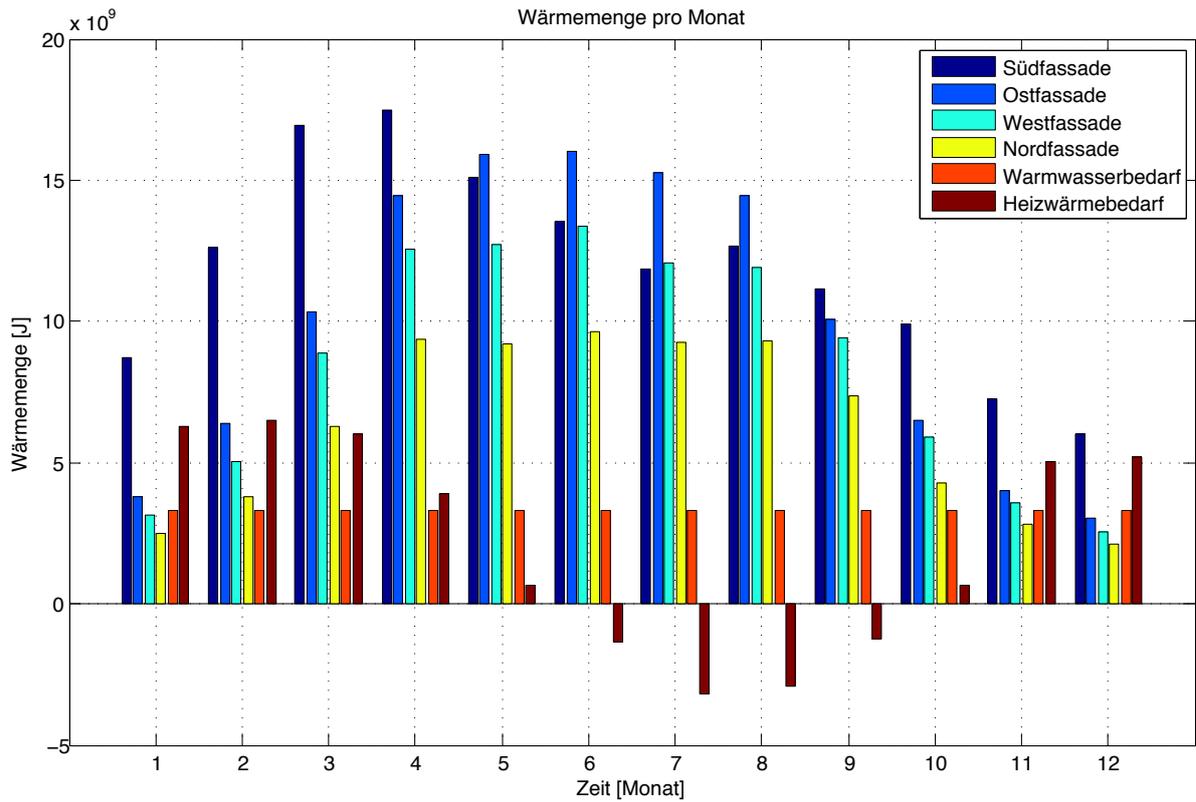


Abbildung 33: Bilanz der Energien pro Monat von Davos

### Genf

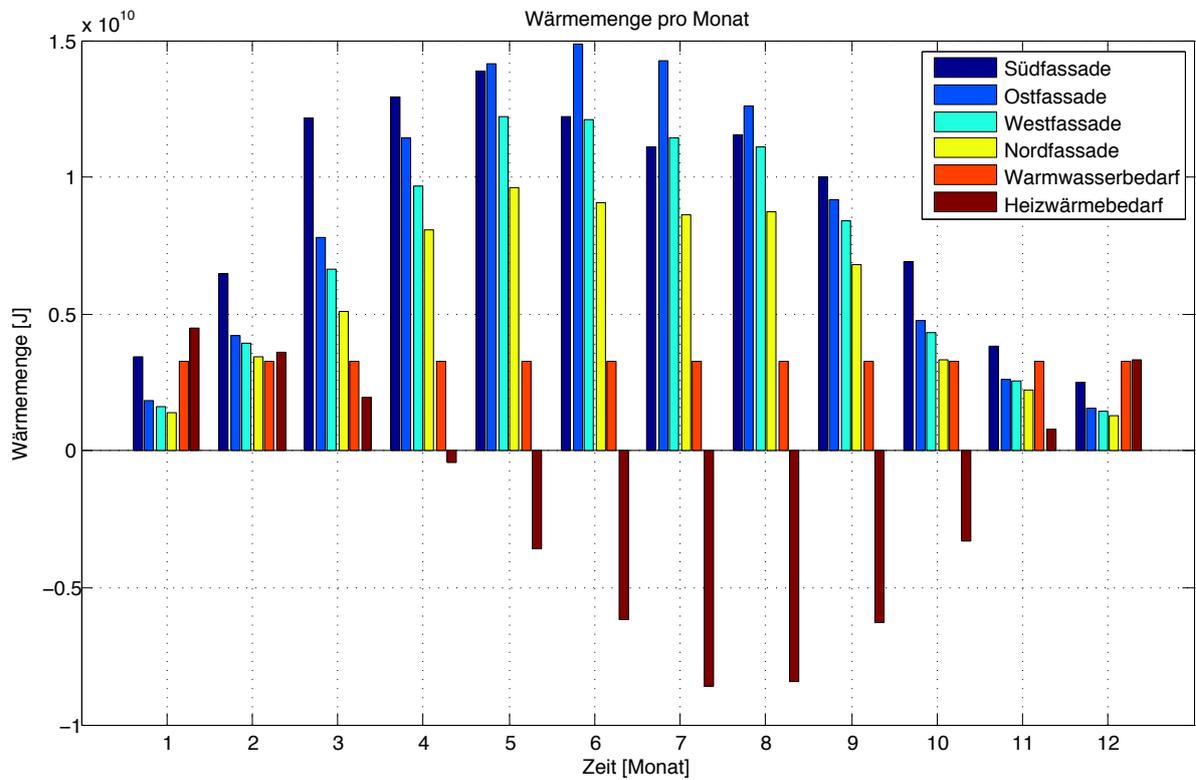


Abbildung 34: Bilanz der Energien pro Monat von Genf

# Locarno

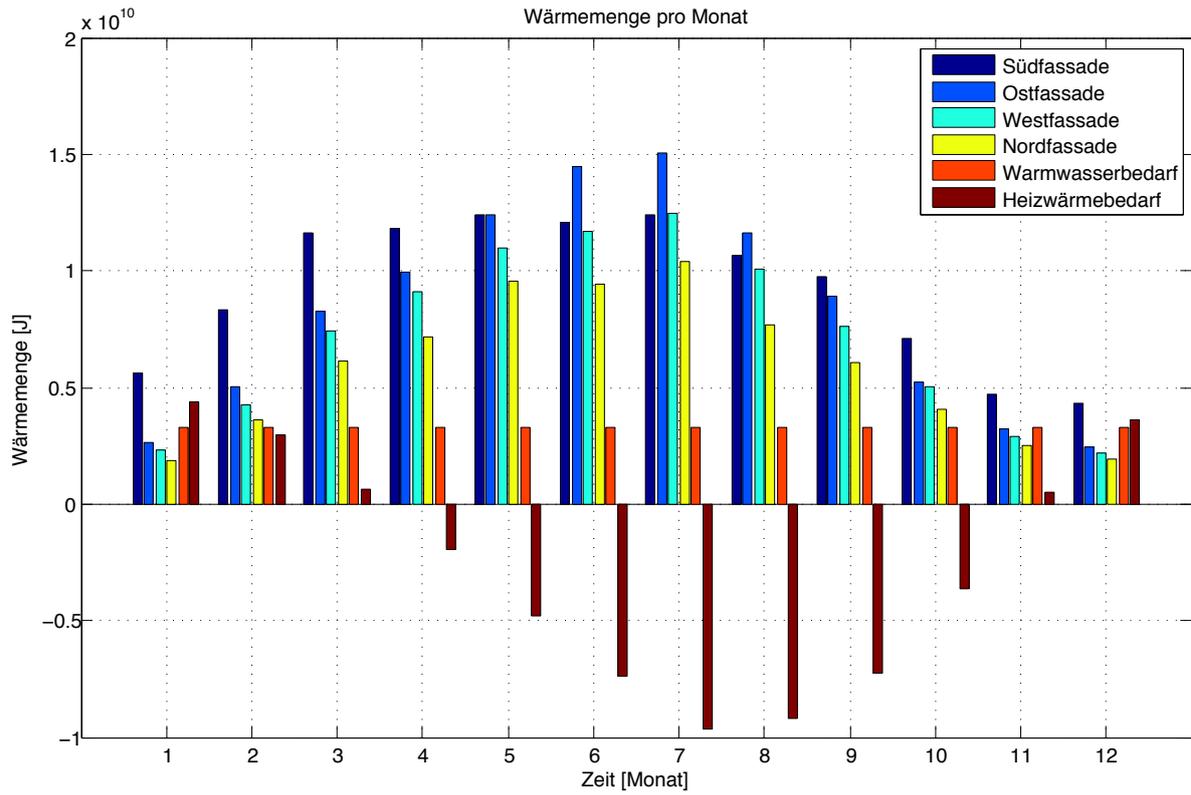


Abbildung 35: Bilanz der Energien pro Monat von Locarno