

2. Zwischenbericht zum Projekt

SYSTEMTECHNISCHE UND BAUPHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN FÜR DIE FASSADENINTEGRATION VON THERMISCHEN SONNENKOLLEKTOREN OHNE HINTERLÜFTUNG

Auftraggeber:

bmvit

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Minoritenplatz 5, A 1014 Wien

Auftragnehmer: AEE - Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE

A-8200 Gleisdorf, Feldgasse 19

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Irene Stadler

Ing. Werner Weiß

Tel.:+43 / 3112 5886 –62

Fax:+43 / 3112 5886 –18

E-Mail: i.stadler@aee.at

Projektpartner: Technisches Büro Leiler

TB für Bauphysik und Technischen Umweltschutz

Brunnengasse 12/15

A-1160 Wien

Tel.:+43 / 01 492 6850

Fax:+43 / 01 492 6850 11

E-Mail: w.leiler@surfeu.at

GREENoneTEC

Kanduth ProduktionsgmbH

Gewerbezone Welsbachstraße 4

A-9065 Ebental

Tel.:+43 / 463 73 770 13

Fax:+43 / 463 73 770 25

E-Mail: kanduth@greenonetec.com

DOMA Solartechnik

Sonnenstraße 1

A-6822 Satteins

Tel.:+43 / 5524 5353

Fax:+43 / 5524 5353 10

E-Mail: doma@doma.co.at

Gleisdorf, im Dezember 2000

Inhaltsverzeichnis

1	KURZFASSUNG.....	5
2	INHALTE UND ZIELE DES PROJEKTES.....	6
3	KURZFASSUNG DES ERSTEN ZWISCHENBERICHTS	8
4	DIMENSIONIERUNG VON FASSADENKOLLEKTORANLAGEN.....	9
4.1	Einstrahlungsprofil auf die Fassade	9
4.1.1	Angebot: Einstrahlung in die Fassade.....	9
4.1.1.1	Reflexionsstrahlung	10
4.1.1.2	Azimut.....	11
4.1.2	Verbrauch: Warmwasser und Raumheizung	12
4.1.3	Schlussfolgerungen.....	13
4.2	Simulationen und Ertragsvorhersage	14
4.2.1	Basisvarianten	14
4.2.2	Der Solare Deckungsgrad	15
4.2.3	Verbrauchsdaten.....	16
4.2.3.1	Warmwasserbedarf.....	16
4.2.3.2	Heizenergiebedarf	17
4.2.4	Ergebnisse der Simulationen	18
4.2.4.1	Solaranlage zur Warmwasserbereitung, EFH.....	18
4.2.4.2	Solaranlage zur Warmwasserbereitung bei hohem Verbrauch, EFH.....	19
4.2.4.3	Solaranlage zur Warmwasserbereitung, Mehrfamilienhaus.....	21
4.2.4.4	Solaranlage zur Warmwasserbereitung bei hohem Verbrauch, MFH	22
4.2.4.5	Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Raumheizung, EFH.....	24
4.2.4.6	Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Raumheizung mit großem Speicher, EFH.....	26
4.2.5	Schlussfolgerungen.....	29
5	BAUPHYSIKALISCHE ASPEKTE	30
5.1	Wärmedurchgang	30
5.1.1	Wandaufbauten.....	30
5.1.2	Absorbtemperatur	30
5.1.3	Sommerfall – Berechnung des Wärmedurchgangs	31
5.1.3.1	Temperatur- und Zeitprofil	35
5.1.3.2	Stagnationsfall	38
5.1.3.3	Vergleichsrechnungen	39
5.1.3.4	Sommerfall: Schlussfolgerungen, Ermittlung der Dämmstärke.....	41
5.1.4	Winterfall – Berechnung des effektiven U-Werts	44
5.1.4.1	Temperaturprofil	49
5.1.4.2	Negative effektive U-Werte.....	51
5.1.4.3	Winterfall: Schlussfolgerungen	52
5.1.5	Schlussfolgerung aus den Wärmestromberechnungen	54
5.2	Wasserdampfdiffusion	55
5.2.1	Aufgabenstellung	55
5.2.2	Physikalisches Modell	55
5.2.3	Beurteilungskriterien	56

5.2.4	Wandaufbauten.....	56
5.2.5	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D	58
5.2.6	Kondensationsmengen	59
5.2.6.1	Kondensation im Wandaufbau.....	59
5.2.6.2	Kondensationsmengen im Luftraum zwischen Absorber und Glasabdeckung des Kollektors...	60
5.2.7	Wandaufbauten mit Dampfsperre.....	62
5.2.8	Zusammenfassung	63
6	SOLARTECHNISCHE UND SYSTEMTECHNISCHE ASPEKTE.....	64
6.1	Betriebsarten von Solaranlagen	64
6.1.1	Low Flow und High Flow Anlagen	64
6.1.2	Matched Flow.....	66
6.2	Hydraulische Verschaltung von Kollektorfeldern	66
6.2.1	High Flow Kollektorverschaltung	68
6.2.2	Low Flow Kollektorverschaltung	69
6.2.3	Vergleich der Kollektorförderleistungen.....	71
6.2.4	Thermische Rohrlänge bei Low Flow Betriebsweise	72
6.3	Speichermanagement bei Kombianlagen mit Fassadenkollektor	73
7	DESIGN DES FASSADENKOLLEKTORSYSTEMS UND BAU DER PROTOTYPEN	75
8	TESTANLAGEN	76
8.1	Testanlage 1 – Zweifamilienwohnhaus Graz	76
8.1.1	Hydraulisches Gesamtkonzept.....	76
8.1.2	Regelungskonzept	79
8.1.2.1	Solarkreis.....	79
8.1.2.2	Heizen aus dem Speicher.....	79
8.1.2.3	Betrieb über Pelletkessel	79
8.1.2.4	Laden des Brauchwasserspeichers aus dem Puffer.....	80
8.1.2.5	Hydraulische Verschaltung des Kollektors.....	80
8.1.2.6	Hydraulische Einregelung des Solarkreises.....	80
8.1.3	Messtechnisches Gesamtkonzept Testfassade 1.....	81
8.2	Testanlage 2 – Bürogebäude St.Veit	82
8.2.1	Messtechnisches Gesamtkonzept Testfassade 2.....	84
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	85
10	ANHANG	86

Anhang 1 Wandaufbauten

Anhang 2 Daten der Vergleichsrechnungen mit TRNSYS

Anhang 3 Testanlage 1

1 Kurzfassung

Das vorliegende Projekt beschäftigt sich mit den systemtechnischen und bauphysikalischen Grundlagen für die Fassadenintegration von thermischen Sonnenkollektoren ohne Hinterlüftung. Die Fassadenintegration eröffnet ein weites und bisher relativ ungenütztes Marktsegment für die Solarthermie. Besonders bei der solaren Heizungsunterstützung werden große Flächen benötigt, die nicht immer ausreichend auf dem Dach zur Verfügung stehen. Hier gehen architektonische, bautechnische und wirtschaftliche Überlegungen Hand in Hand. Der Fassadenkollektor übernimmt neben seiner Funktion als Kollektor, auch die Funktion einer Wärmedämmung und als Gestaltungselement der Fassade, womit eine Kostenreduktion durch die gemeinsame Nutzung von Bauteilen erreicht wird.

Ein Ziel des Projektes ist die Erarbeitung der bauphysikalischen Grundlagen für die Konstruktion eines Fassadenkollektors. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Untersuchung zu Wasserdampfdiffusion und Wärmetransport. Die Berechnungen des Wärmetransportes zielten darauf ab, das Ausmaß einer sommerlichen Überhitzung zu ermitteln. Daraus lässt sich die notwendige Dämmstärke eines Wandaufbaus mit integriertem Kollektor ableiten. Diese wird für ausgewählte Wandaufbauten angegeben. Die Simulationen zeigten außerdem, dass sich der fassadenintegrierte Kollektor im Winter positiv auf die Transmissionswärmeverluste auswirkt. Auch außerhalb der Zeiten, in denen der Kollektor von Medium durchflossen wird, also an strahlungsarmen Tagen, wirkt er durch die direkte Integration in die Fassade als „passiv solares“ Element. An strahlungsintensiven Wintertagen wird je nach Wandaufbau eine Verminderung des U-Werts um bis zu 90% erreicht, an strahlungsarmen Tagen werden noch Verminderungen bis zu 45% erreicht.

Die Untersuchungen zur Wasserdampfdiffusion ergaben, dass es zu keinen problematischen Kondensationen in den gewählten Wandaufbauten mit fassadenintegriertem Kollektor kommt. Weitere Betrachtungen zeigten, dass es bei bestimmten Wettersituationen zu Kondensation von Wasser an der Glasabdeckung des Kollektors kommt, die jedoch bei Sonneneinstrahlung wieder verdunstet.

In weiterer Folge wurden geeignete hydraulische Verschaltungen von Kollektorfeldern in der Fassade erarbeitet. Ebenso wurde eine geeignete Systemschaltung mit einem angepassten Speichermanagement für Anlagen mit Fassadenkollektoren entwickelt.

Es wurden Einstrahlungsprofile in die Fassade erarbeitet, wobei auch der Einfluss der Schneereflexion untersucht wurde. Um Dimensionierungsrichtlinien für Fassadenkollektoranlagen geben zu können, wurden Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im Vergleich zu dachmontierten Kollektoranlagen dargestellt.

Im Rahmen des Projektes werden derzeit zwei Testanlagen errichtet. Der Bau der Prototypen und die Entwicklung der Fassadenanschluss technik erfolgt von den an dem Projekt beteiligten Firmen. Die Testfassaden werden auf unterschiedliche Wandaufbauten aufgebracht, um das unterschiedliche Verhalten des Systems Wand-Kollektor zu erfassen. Ein Messkonzept wurde erstellt.

2 Inhalte und Ziele des Projektes

Die Nutzung der Solarenergie mittels thermischer Kollektoren hat in Österreich eine steigende Tendenz. Zum überwiegendsten Teil werden diese Anlagen zur Warmwasserbereitung in Kleinanlagen genützt. Bei Anwendungen in den Bereichen solare Raumheizung, große Anlagen im städtischen Wohnbau, Hotels und solare Nahwärmenetze stehen nicht immer entsprechend geneigte und orientierte Dachflächen für die Montage von Sonnenkollektoren zur Verfügung. Beim Aufbau auf bestehende Dächer oder Aufständigung auf Flachdächern bilden die Anlagen oft auch einen Fremdkörper, weil sie nicht integraler Bestandteil der Architektur sind. Daher stoßen Solaranlagen teilweise auch noch auf Ablehnung bei Architekten und Städteplanern. Hier ist es für eine breite Marktdurchdringung notwendig, Kollektorsysteme zu entwickeln, die eine Integration der Kollektoren in Fassaden ermöglichen.

Im Weißbuch der Kommission [Lit 1] „Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger“ wird als strategisches Ziel angeführt, „... den Marktanteil der erneuerbaren Energieträger bis zum Jahre 2010 auf 12% zu erhöhen.“ Der im Weißbuch genannte jährliche Zuwachs der installierten Kollektorfläche in den Mitgliedsstaaten wird mit 20% beziffert. Damit würde im Jahr 2010 die installierte Gesamtfläche der thermischen Anwendung der Solarenergie 100 Millionen m² betragen. Dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn vor allem alle verfügbaren und geeigneten Flächen genutzt werden, die an Gebäuden zur Verfügung stehen. Bisher wurden Kollektoren nahezu ausschließlich auf Dächern montiert. Die Entwicklung von in Fassaden integrierten Kollektoren eröffnet ein neues Anwendungsfeld für thermische Kollektoren und trägt damit entscheidend zur Erreichung der oben genannten Ziele bei.

Der Bau- und Wohnbereich war für die bisherige Marktentwicklung von Solartechnologien in Österreich von zentraler Bedeutung, und es ist davon auszugehen, dass dies auch in absehbarer Zukunft so bleiben wird. Mitentscheidend für die Aufrechterhaltung der Wachstumsraten in den kommenden Jahren sind jedoch Weiterentwicklungen bei solaren Gebäudeelementen und deren intelligente und multifunktionale Integration in die Gebäudeaußenhülle.

Dabei spielen neben der technischen Funktion sowohl Aspekte eines ästhetisch ansprechenden und attraktiven Designs der Sonnenkollektoren selbst eine Rolle, als auch deren verbesserte Dach- oder Fassadeneinbindung als innovatives architektonisch-gestalterisches Element. Vor allem die Fassadenintegration von Solarkollektoren eröffnet neue Marktchancen, die durch bisherige dachintegrierte oder dachaufgebaute Systeme nicht abgedeckt werden.

Unter einem fassadenintegrierten Sonnenkollektor wird ein direkt in die Fassade aufgenommenes Kollektorelement verstanden, bei dem die Wärmedämmung Bestandteil sowohl des Gebäudes als auch des Kollektors ist. Zwischen beiden ist keine thermische Trennung in Form einer Hinterlüftung vorhanden. Dieser – nicht hinterlüftete - Fassadenkollektor stellt gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik eine wesentliche Verbesserung hinsichtlich Ressourcen- und Energieeffizienz dar, da der Kollektor verschiedene Funktionen in einem Bauteil übernimmt:

- Funktion als thermischer Flachkollektor
- Verbesserung der Wärmedämmung des Gebäudes
- Passiv solares Element, bei geringer Einstrahlung (Kollektor ohne Durchfluss)

- Witterungsschutz der Fassade durch die Kollektorverglasung
- Gestaltungselement der Fassade

Vorteile von nicht hinterlüfteten fassadenintegrierten Kollektoren sind demnach:

- Kostenersparnis durch gemeinsame Nutzung von Bauteilen
- vereinfachte Fassaden-Anschlusstechnik an die konventionelle Gebäudehülle
- Ersatz der konventionellen Fassade
- sowohl für den Neubau als auch für Altbausanierungen geeignet

Die Ergebnisse des Projektes dienen den zwei am Projekt beteiligten Solartechnikunternehmen als Grundlage für die Fertigung von Testfassaden und in weiterer Folge zur Fertigungsüberleitung und Serienfertigung.

Die genannten Vorteile sind aufgrund der geringen Verbreitung von Fassadenkollektoren sowie der geringen Datenbasis über die komponenten- und systemtechnischen Eigenschaften im wesentlichen theoretisch begründet.

Aufgabe dieses Projekts ist es daher, den in den einzelnen Arbeitspaketen beschriebenen Fragestellungen gezielt nachzugehen, Lösungsvorschläge zu erarbeiten und Solartechnikfirmen, Planern und Architekten Grundlagenwissen sowie eine solide Datenbasis an die Hand zu geben, welche die Fertigung, Auslegung und Errichtung derartiger Anlagen erlauben. Zentralen Stellenwert bei der Entwicklung der konstruktiven Lösungen haben dabei die Wiederverwertbarkeit der eingesetzten Materialien und die Ressourceneffizienz.

Im Rahmen dieses Projekts sollen system- und bautechnische sowie bauphysikalische Grundlagen geschaffen werden, die in weiterer Folge als Basis für konstruktive und ästhetisch ansprechende Lösungen für die Fertigung von fassadenintegrierten Sonnenkollektoren ohne thermische Trennung dienen. Das Anlagenverhalten wird in Testfassaden untersucht.

Derzeit sind vertikale Kollektoren wenig verbreitet. Die wenigen, bisher an der Fassade ausgeführten Anlagen wurden zumeist hinterlüftet ausgeführt und nicht direkt ins Gebäude integriert [Lit 2]. Dies wird begründet durch noch nicht im Detail untersuchte bauphysikalische Wechselwirkungen zwischen dem (im Extremfall sehr heißen) Absorber und der Gebäudewand. Insbesondere ist der Feuchtigkeitstransport durch die Gebäudewand, der durch die Glasscheibe behindert wird, noch zu untersuchen.

Weiters fehlen derzeit ausgereifte Lösungen, welche eine kostengünstige und einfache Montage und spätere Zugänglichkeit der kritischen Anlagenkomponenten ermöglichen. Zudem liegen kaum Dimensionierungsrichtlinien und systemtechnische Lösungen vor, die sich an den speziellen Erfordernissen bzgl. jahreszeitlicher Verteilung der Strahlung auf einer vertikalen Fläche ergeben.

3 Kurzfassung des ersten Zwischenberichts

Im ersten Zwischenbericht des Projektes wurde die Erhebung bestehender Anlagen dokumentiert und eine Problemanalyse dargestellt. In Österreich wurden bereits fassadenintegrierte Kollektoranlagen errichtet, die allerdings überwiegend hinterlüftet ausgeführt wurden. Es wurden 14 realisierte Fassadenkollektoranlagen unterschiedlicher Bauart dokumentiert und auf mögliche Schwachstellen hinsichtlich Bauphysik, bautechnische und architektonische Integration und Systemtechnik untersucht, um bei der Entwicklung des Fassadenkollektors ohne Hinterlüftung die bisher aufgetretenen Problempunkte identifizieren zu können.

Um das Anforderungsprofil an einen Fassadenkollektor von Seiten der Architekten zu klären, wurde eine Fragebogenerhebung und ein eintägiger Workshop unter Beiziehung von Architekten und Stadtplanern durchgeführt. Folgende Fragestellungen wurden durch die Fragebogenerhebung und den Workshop geklärt: Ästhetisch-funktionale Anforderungen, Möglichkeiten der Standardisierung hinsichtlich Abmessungen, Rastermaße, Anschlusstechnik an Fenster, Dach und die konventionelle Gebäudehülle.

Für die Erarbeitung der bauphysikalischen Grundlagen für die Konstruktion eines Fassadenkollektors wurden Wandaufbauten ausgewählt, welche die Grundlage für Berechnungen von Wasserdampfdiffusion und Wärmetransport darstellen. Erste Simulationen zum Wärmetransport wurden durchgeführt und zeigten, dass sich der fassadenintegrierte Kollektor im Winter positiv auf die Transmissionswärmeverluste auswirkt.

Für die Errichtung von Fassadenkollektoranlagen, insbesondere in mehrgeschossiger Ausführung gelten grundlegend andere bautechnische Anforderungen als bei der Aufdachmontage oder Dachintegration von thermischen Kollektoranlagen. Daher wurden alle für diesen Bauteil bzw. für Glasfassaden in Frage kommenden Bauvorschriften, Normen sowie Brand- und Schallschutzanforderungen erhoben auf ihre Anwendbarkeit auf Fassadenkollektoren überprüft und im ersten Zwischenbericht dokumentiert.

Anmerkung: Die in der Folge dargestellten Punkte dokumentiert die Arbeit im Projekt seit der Abgabe des 1.Zwischenberichts. Die Grundlagen, auf denen dieser 2.Zwischenbericht basiert, sind im 1.Zwischenbericht dargestellt.

4 Dimensionierung von Fassadenkollektoranlagen

4.1 Einstrahlungsprofil auf die Fassade

4.1.1 Angebot: Einstrahlung in die Fassade

Beim Fassadenkollektor steht dem energetischen Nachteil durch die geringere jährliche Globalstrahlungssumme im Vergleich zur Dachmontage ein gleichmäßiges Ertragsprofil und eine verbesserte Wärmedämmung sowohl des Kollektors, als auch des Gebäudes entgegen [Lit 3]. Die jährliche Globalstrahlungssumme in der Fassade ist um ca. 30% geringer als bei 45° geneigten Flächen.

Während bei geneigten Dachflächen in den Sommermonaten ein deutliches Maximum im Einstrahlungsprofil eintritt, weist die Einstrahlung in der Fassade in den Monaten März bis September ein sehr ausgeglichenes Profil mit nur geringfügigen Unterschieden auf (siehe Abbildung 4.1).

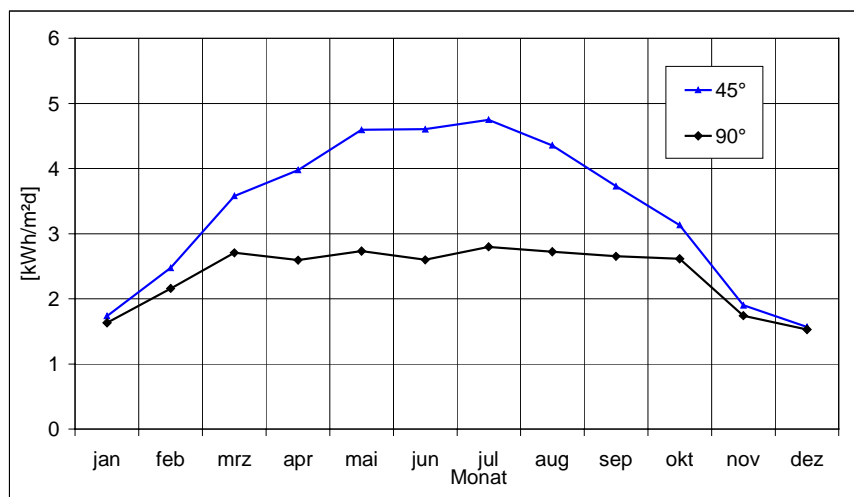


Abbildung 4.1: Jahreszeitlicher Verlauf der mittleren täglichen Strahlungssumme auf südorientierte Flächen mit 45° und 90° Neigung, Süd, Klimadaten Graz

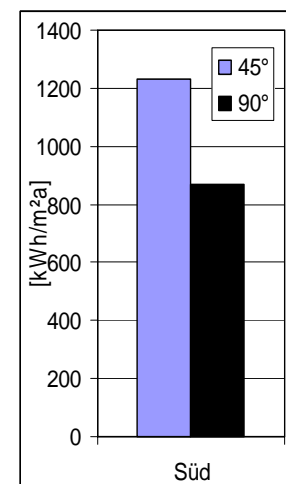


Abbildung 4.2: Jährliche Strahlungssumme auf südorientierte Flächen mit 45° und 90° Neigung (Graz)

Die gesamte auf die Fläche auftreffende Strahlung ergibt sich aus der Summe aus direkter Himmelsstrahlung, diffuser Himmelsstrahlung und Reflexionsstrahlung auf den Kollektor:

$$I_g = I_s \cdot R_s + I_d \cdot \frac{(1 + \cos S)}{2} + (I_s + I_d) \cdot \frac{(1 - \cos S)}{2} \cdot re$$

Gleichung 4.1

I_g	[W/m ²]	Gesamtstrahlung auf die Kollektorfläche
I_s	[W/m ²]	Direkte Einstrahlung auf die horizontale Fläche
R_s	[-]	Umrechnungsfaktor: direkte Einstrahlung von horizontaler auf geneigte Fläche
I_d	[W/m ²]	Diffusstrahlung auf die Kollektorfläche
S	[°]	Neigung der Fläche
re	[-]	Reflexionskoeffizient

4.1.1.1 Reflexionsstrahlung

Der dritte Term der obern genannten Gleichung stellt die Reflexionsstrahlung auf die betrachtete Fläche dar. Diese ist umso kleiner, je kleiner der Neigungswinkel der Fläche ist. Bei einer horizontalen Fläche wird die Reflexionsstrahlung Null. Für schneefreien Untergrund mit Gras oder Schotter (siehe Abbildung 4.3) beträgt der Reflexionsgrad 0,2.

Hier wird allerdings nicht berücksichtigt, dass bei einer geneigten Fläche am Dach in einigen Metern Höhe die reflektierende Fläche unendlich groß sein müsste, damit alle reflektierten Strahlen das Dach auch erreichen. Bei einem senkrechten Kollektor, der sich nur knapp über dem Boden befindet, reicht dagegen eine weitaus kleinere Fläche, um den Hauptteil der auftreffenden Strahlung auf den Kollektor zu reflektieren.

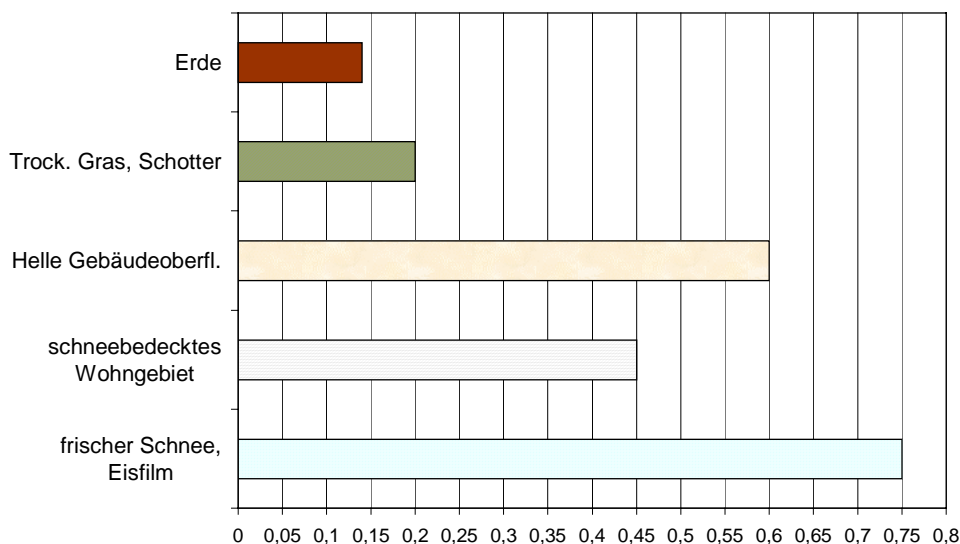


Abbildung 4.3: Reflexionsgrad in Abhängigkeit von der Umgebung (ÖNORM M7714)

Für die schneereichen Wintermonate kann ein Reflexionsgrad von 0,45 bis 0,75 eingesetzt werden.

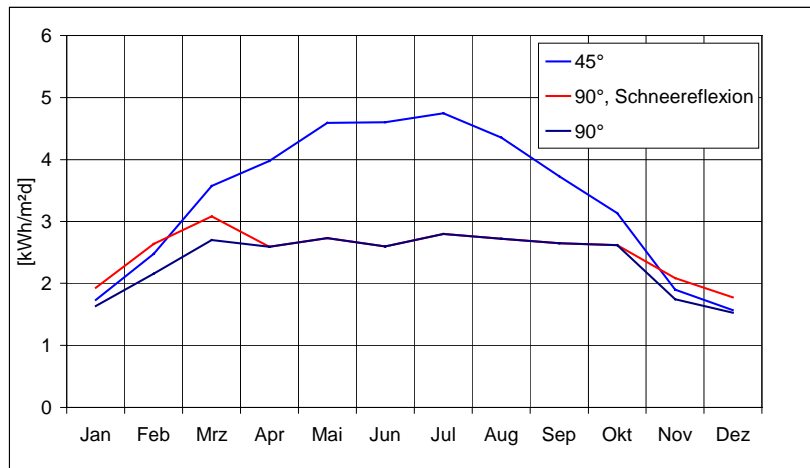


Abbildung 4.4: Jahreszeitlicher Verlauf der mittleren täglichen Strahlungssumme auf südorientierte Flächen mit 45° und 90° Neigung. (Klimadaten Graz)

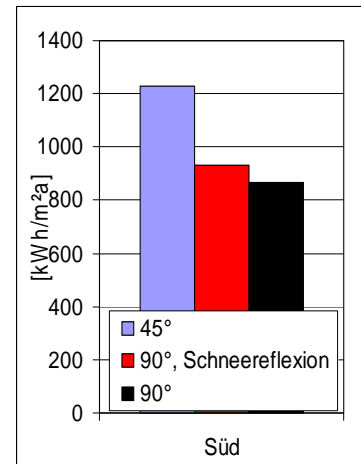


Abbildung 4.5: Jährliche Strahlungssumme auf südorientierte Flächen mit 45° und 90° Neigung (Graz)

Die Abbildung 4.4 und 4.5 zeigen die Unterschiede der Einstrahlung auf senkrechte südorientierte Flächen in Abhängigkeit von der Schneereflexion. Man sieht, dass in den Wintermonaten die Einstrahlung in die Fassade durch Schneereflexion erhöht wird. Dieser Vorteil der Fassadenkollektoren bleibt im Allgemeinen bei der Dimensionierung von Anlagen unberücksichtigt. Mit Berücksichtigung der Schneereflexion zeigt sich, dass die Globalstrahlungssumme auf die senkrechte Fläche lediglich um 24% geringer ist, als auf die 45° geneigte Fläche.

Weiters findet die Tatsache, dass Schnee unter einer gewissen Neigung nicht mehr abrutschen kann in den Simulationsprogrammen keine Berücksichtigung. Kollektoren werden durch Schnee abgedeckt und können keine Leistung mehr bringen. Kollektoren in der Fassade werden dagegen nicht durch Schnee abgedeckt, wie die Abbildung 4.6 eindrucksvoll zeigt.



Abbildung 4.6: Fassadenkollektoranlage, Arlberg, Foto: DOMA Solartechnik

4.1.1.2 Azimut

Durch die Berücksichtigung der Schneereflexion wird bei senkrechten Flächen eine Erhöhung der jährlichen Einstrahlung um 7% ermittelt (siehe Abbildung 4.7). Das gilt für die Südausrichtung und die Süd-West-Ausrichtung. Abweichungen von der optimalen Ausrichtung nach Süden nach Südwest (SW) oder Südost wirken sich bei der gesamten jährlichen Einstrahlung nur geringfügig aus.

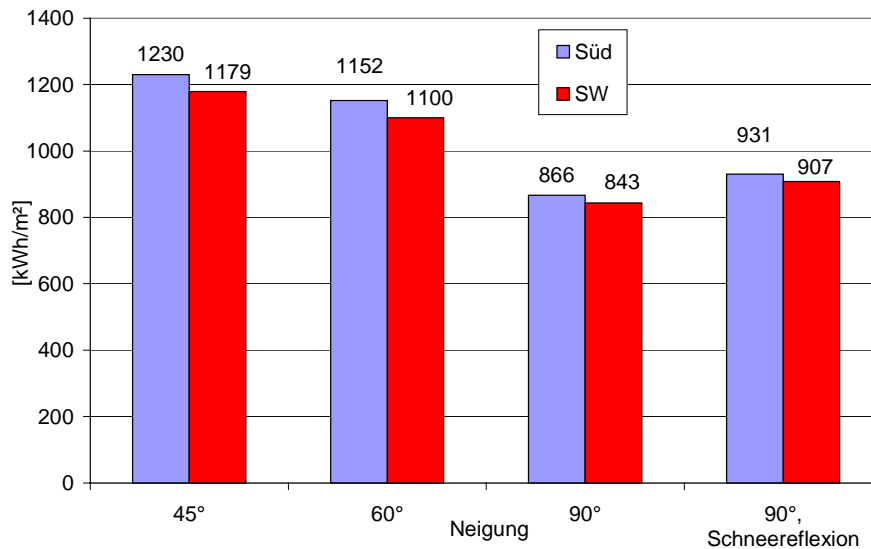


Abbildung 4.7: Jährliche Einstrahlung in Abhängigkeit von Neigung, Azimut und Reflexion (Klimadaten Graz)

Abbildung 4.8 zeigt allerdings, dass bei Südorientierung das Einstrahlungsprofil am gleichmäßigsten über das Jahr ist. Dies ist insbesondere für Anlagen zur Heizungsunterstützung von Vorteil. Abweichungen nach SW und SO wirken sich nur geringfügig aus, größere Abweichungen führen aber zu erheblichen Einbußen und sind daher zu vermeiden.

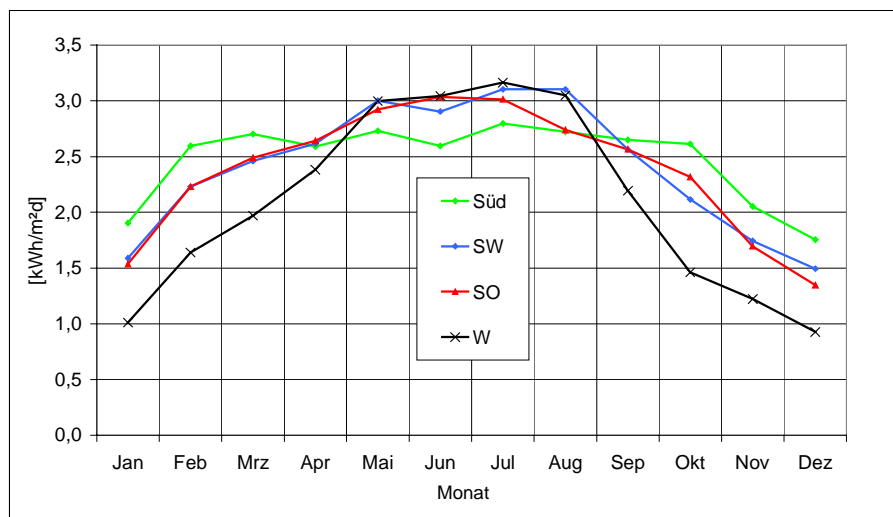


Abbildung 4.8: Mittlere tägliche Einstrahlung in Abhängigkeit vom Azimut bei 90° Neigung und bei Berücksichtigung der Schneereflexion (Klimadaten Graz)

4.1.2 Verbrauch: Warmwasser und Raumheizung

Der vorhandenen Einstrahlung steht nun der Energieverbrauch (Warmwasser, Heizenergie) gegenüber. Während der Warmwasserverbrauch über das Jahr annähernd konstant ist, unterliegt der Heizenergiebedarf jahreszeitlich bedingt starken Schwankungen.

Abbildung 4.9 zeigt die Verbrauchsdaten für ein Einfamilienhaus mit einem täglichen Warmwasserbedarf von 160 l/d bei 50°C und einer Heizlast von 8 kW (siehe auch Kapitel 4.2.1).

Weiters wird das Einstrahlungsprofil mit dem Verbrauchsprofil verglichen. Die Einstrahlung bezieht sich auf eine 25 m² große Kollektorfläche und wird für einen Fassadenkollektor und für einen 45° geneigten Kollektor angegeben. Für den Fassadenkollektor wird im Winter und in den Übergangszeiten Schneereflexion angenommen, wie in Kapitel 4.1.1.1 beschrieben.

Man erkennt, dass das Einstrahlungsprofil des Fassadenkollektors dem Verbrauchsprofil entgegenkommt, da er in verbrauchsarmen Zeiten kein Überangebot liefert. Dieses kann bei einer 45° geneigten Fläche, wenn keine Möglichkeit einer saisonalen Speicherung gegeben ist, zu Überhitzungsproblemen im Kollektor führen. Im Winter und in den Übergangszeiten können in der Fassade sogar höhere Einstrahlungen erzielt werden, als in der 45° geneigten Ebene.

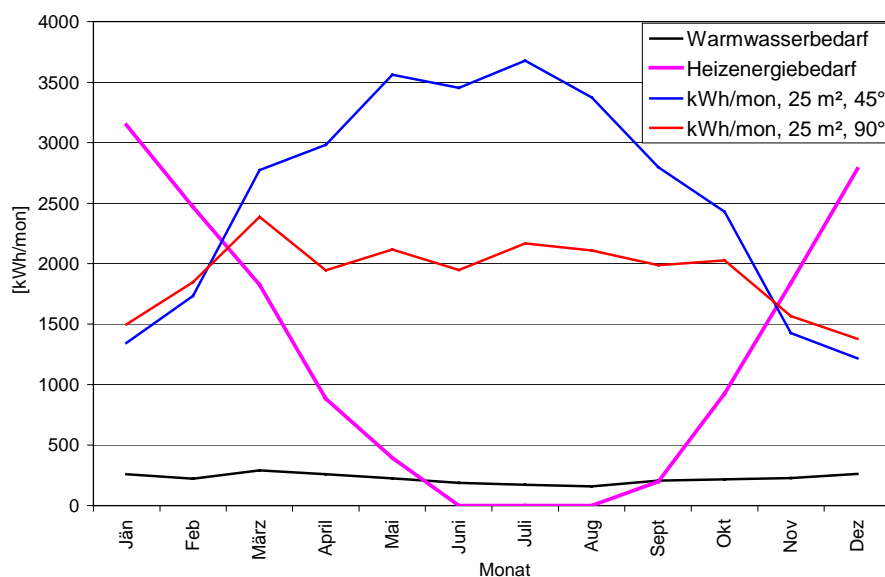


Abbildung 4.9: Vergleich von Einstrahlung und Verbrauch (Monatlicher Warmwasserverbrauch und Heizenergiebedarf eines Einfamilienhauses, 160 l/d und 50°C Warmwasserbedarf, 8 kW Heizlast)

4.1.3 Schlussfolgerungen

Thermische Solaranlagen in Fassaden bieten bei Kombianlagen zur Warmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung Vorteile. Diese liegen im Einstrahlungsprofil bei Flächen mit einer Neigung von 90°, das über das Jahr sehr ausgeglichen ist. Stagnationsprobleme im Sommer können so vermieden werden, dagegen wird in den Übergangszeiten und im Winter bei vorhandener Schneereflexion eine höhere Einstrahlung erzielt.

Die Warmwasserbereitung erfolgt bei Kombianlagen im Sommer problemlos, da ausreichend Kollektorfläche vorhanden ist. Anlagen zur reinen Warmwasserbereitung müssen in der Fassade entsprechend größer dimensioniert werden, um die verminderte Einstrahlung durch den großen Einstrahlungswinkel im Sommer auszugleichen.

4.2 Simulationen und Ertragsvorhersage

Um Dimensionierungsrichtlinien für thermische Solaranlagen in der Fassade geben zu können, wurden Simulationen durchgeführt [Lit 4]. Ausgangspunkt für die Simulationsrechnungen sind Basisvarianten, an denen verschiedene Parametervariationen durchgeführt werden. Das Ziel der Simulationen bestand darin, die nötige Kollektorfläche für Solaranlagen in der Fassade zu ermitteln, die den gleichen solaren Deckungsgrad wie eine Anlage mit Kollektoren mit einer Neigung von 45° hat.

4.2.1 Basisvarianten

Die Basisvarianten werden bei Anlagen zur Warmwasserbereitung durch die Kollektorfläche, das Speichervolumen und den Warmwasserbedarf definiert. Bei solarer Heizungseinbindung wurde zusätzlich der Heizenergiebedarf definiert. Ausgehend von diesen Basisvarianten wurde die Abhängigkeit des solaren Deckungsgrades von der Kollektorfläche und von der Neigung ermittelt. Außerdem wurde der Einfluss des Kollektortyps auf den solaren Deckungsgrad untersucht.

Es wurden Basisvarianten für Einfamilienhäuser (EFH) mit reiner Warmwasserbereitung (WW) und mit teilsolarer Raumheizung (RH) definiert. Für Mehrfamilienhäuser (MFH) wurden Anlagen zur Warmwasserbereitung (WW) simuliert. Die Auswahl der Basisvarianten und der Parameter erfolgte aufgrund der bisherigen Erfahrungen in der Auslegung von thermischen Solaranlagen für Ein- und Mehrfamilienhäuser der AEE.

Allen Simulationen liegen folgende Rahmenbedingungen zugrunde:

- Standort: Graz
- Orientierung der Kollektorfläche: Süd

Variiert wurden bei allen Basisvarianten:

- Neigung der Kollektorfläche: 45°, 90°
- Kollektortyp: Selektive Beschichtung, Solarlack
- Kollektorfläche [m²]

Alle Berechnungen wurden mit einem einheitlichen Reflexionsgrad 0,2 durchgeführt. Dieser Wert ist als Standardwert im verwendeten Simulationsprogramm enthalten [Lit 4].

Tabelle 4.1 zeigt die definierten Basisvarianten. Nummer 1 stellt eine typische Anlage für die Warmwasserbereitung im Einfamilienhausbereich mit mittlerem Warmwasserbedarf dar. Nummer 2 ist repräsentativ für Einfamilienhäuser mit erhöhtem Warmwasserbedarf, was hier durch die erhöhte Personenzahl ausgedrückt wird.

Tabelle 4.1: Definierte Basisvarianten

NR.			Kollektor- fläche	Speicher- volumen	WW-Bedarf	Personen	WW- Temperatur	Heiz- last
			[m ²]	[l]	[l/d,Person]	[-]	[°C]	[kW]
1	EFH	WW	6	300	40	4	50	-
2	EFH	WW	8	600	40	6	50	-
3	MFH	WW	30	2000	30	20	60	-
4	MFH	WW	100	6000	30	70	60	-
5	EFH	WW+ RH	25	2000+300	40	4	50	8
6	EFH	WW+ RH	25	5000+300	40	4	50	8

EFH Einfamilienhaus

MFH Mehrfamilienhaus

WW Warmwasserbereitung

RH Raumheizung

Für die Dimensionierung der Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung in Mehrfamilienhäusern wurde die Broschüre „Thermische Sonnenenergienutzung im Mehrfamilienwohnbau“ herangezogen [Lit 5]. Erfahrungen der Autoren haben gezeigt, dass durchschnittliche Zapfmengen von 25-30 l pro Bewohner und Tag auftreten. Die Warmwassertemperaturen betragen bei den MFH 60°C, da hier Verluste in den Zirkulationsleitungen berücksichtigt werden müssen [Lit 6]. Die Simulationen der Einfamilienhäuser werden mit einer Warmwassertemperatur von 50°C durchgeführt.

Die Basisvarianten 5 und 6 sind Beispiele für die solare Raumheizungsunterstützung. Die Dimensionierungsrichtlinien für solaren Heizungsanlagen können nicht so klar angegeben werden, wie bei den Brauchwasseranlagen [Lit 7]. Aus der Vielzahl der möglichen Randbedingungen wurden zwei typische Anlagen definiert. Diese erlauben prinzipielle Aussagen über thermische Solaranlagen in der Fassade zur Brauchwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung bei Einfamilienhäusern.

4.2.2 Der Solare Deckungsgrad

Der solare Deckungsgrad wird wie in Gleichung 4.2 dargestellt definiert:

$$\text{Deckungsanteil} = \frac{\text{dem Bereitschaftsspeicher vom Solarsystem zugeführte Energie}}{\text{Summe der dem Bereitschaftsspeicher gesamt zugeführte Energie}} \times 100\%$$

Gleichung 4.2

Die gesamt zugeführte Energie besteht aus der Energie, die vom Solarsystem erbracht wird, und der Nachheizung aus dem konventionellen Heizkessel.

4.2.3 Verbrauchsdaten

4.2.3.1 Warmwasserbedarf

Der Warmwasserbedarf variiert mit der Jahreszeit und abhängig vom Wochentag. Abbildung 4.10 zeigt den Warmwasserbedarf eines Einfamilienhauses und eines Mehrfamilienhauses über ein Jahr gewichtet [Lit 8]. Die jahreszeitlichen Schwankungen werden stark durch die Ferienzeiten beeinflusst, der Warmwasserverbrauch bei Mehrfamilienhäusern wird zusätzlich durch den Gleichzeitigkeitsfaktor bestimmt.

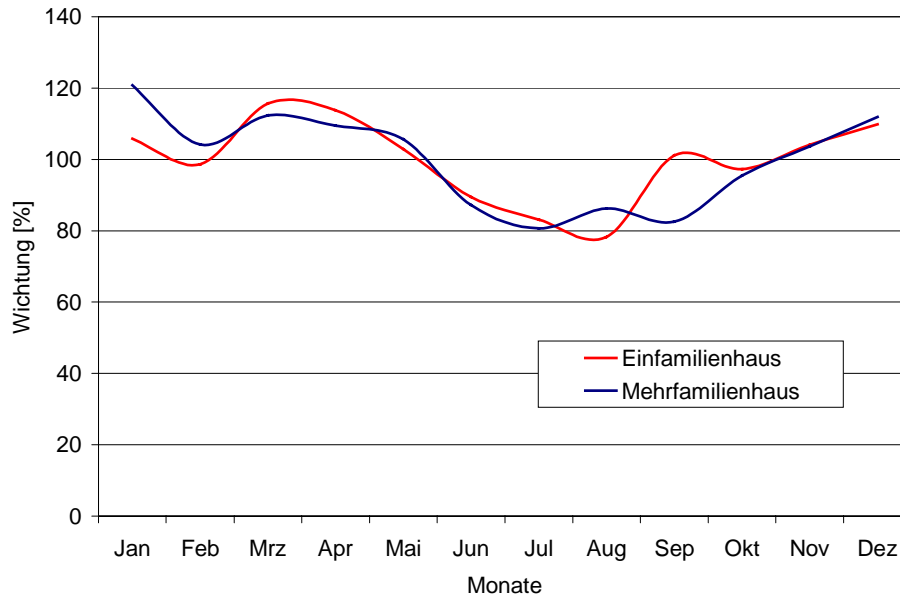


Abbildung 4.10: Wichtung des Warmwasserverbrauchs über das Jahr, Vergleich Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus

Abbildung 4.11 zeigt die Wichtung des Warmwasserverbrauchs für ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus über eine Woche. Der wöchentliche Verbrauch wird in [Lit 4] an Werktagen, Samstagen und schließlich Sonn- und Feiertagen unterschiedlich stark verteilt, das Zapfprofil kann aus Tabelle 4.2 entnommen werden.

Tabelle 4.2: Zapfprofil

Werktag	Samstag	Sonn- und Feiertag
07:00 – 08:30	08:00 – 09:30	09:00 – 10:00
12:00 – 13:30	14:00 – 16:00	13:00 – 14:00
18:00 – 20:00	19:30 – 20:30	17:30 – 20:00

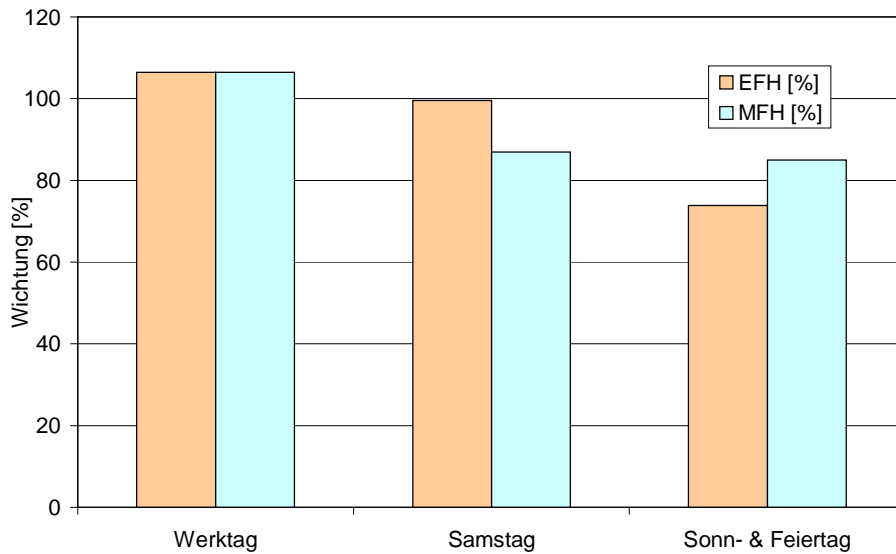


Abbildung 4.11: Wichtung des Warmwasserverbrauchs über eine Woche, Vergleich Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus

4.2.3.2 Heizenergiebedarf

Die Abbildung 4.12 zeigt den Heizenergiebedarf eines Einfamilienhauses (8 kW Heizlast) über ein Jahr im Vergleich zum Warmwasserbedarf. Der Heizenergiebedarf ist viel stärker den jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen.

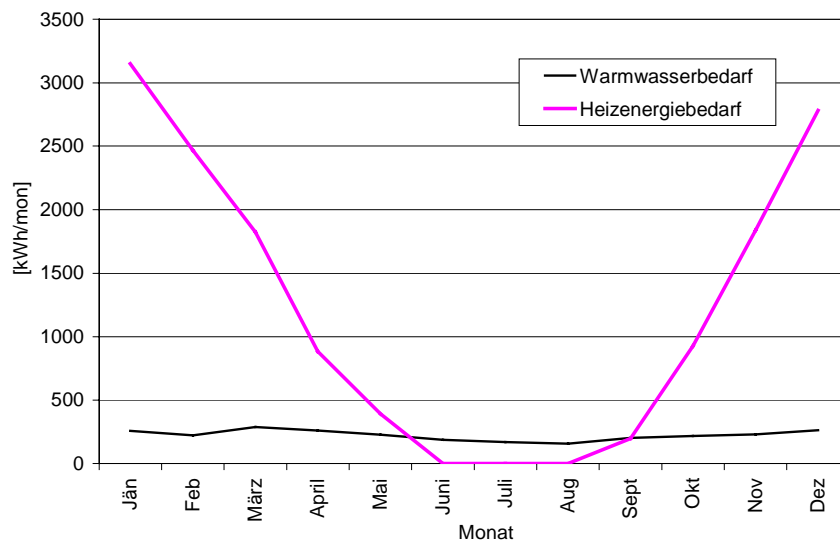


Abbildung 4.12: Warmwasserverbrauch und Heizenergiebedarf eines Einfamilienhauses (160 l/d und 50°C Warmwasserbedarf, 8 kW Heizlast)

4.2.4 Ergebnisse der Simulationen

4.2.4.1 Solaranlage zur Warmwasserbereitung, EFH

Die Basisvariante 1 wurde mit einem 300 Liter Brauchwasserspeicher und einer Kollektorfläche von 6 m² definiert. Der Warmwasserverbrauch beträgt 160 Liter je Tag mit 50°C, wobei vier Personen mit einem Verbrauch von je 40 Liter je Tag angenommen .

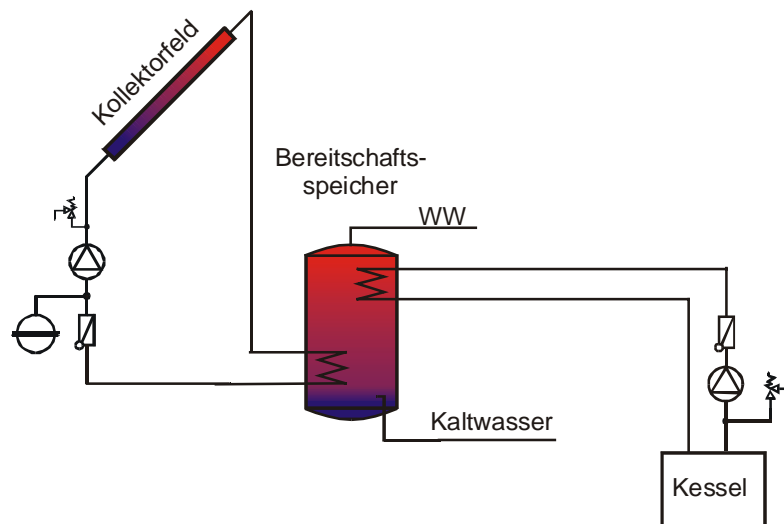


Abbildung 4.13: Hydraulisches Schaltschema der Solaranlage zur Warmwasserbereitung für ein Einfamilienhaus mit 300 l Brauchwasserspeicher

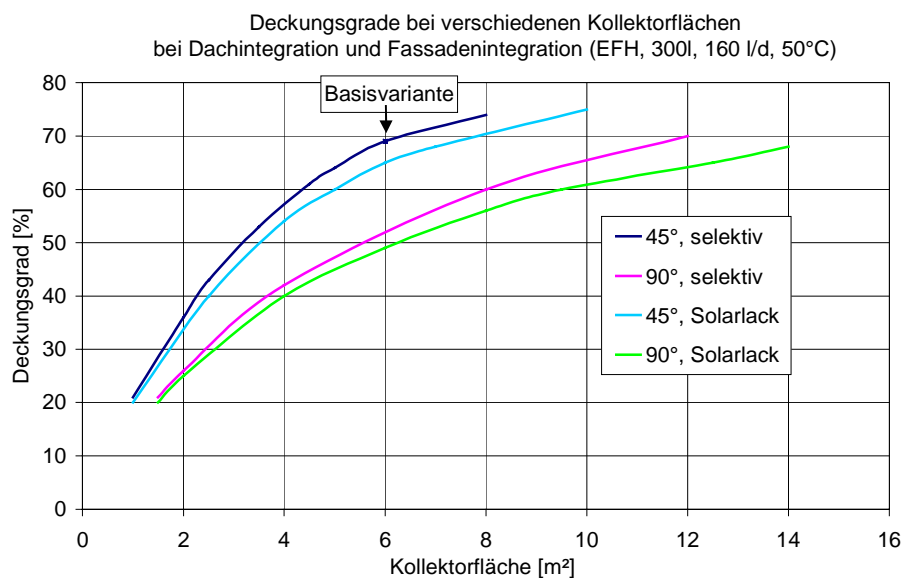


Abbildung 4.14: Vergleich der Deckungsgrade unter Variation von Kollektorfläche, Neigung und Kollektortyp (EFH, WW, 300 l)

Der Verlauf des Deckungsgrades über der aktiven Kollektorfläche zeigt in Bereichen höherer Deckung eine starke Abflachung. Die Kollektorfläche muss bei hoher solarer Deckung überproportional vergrößert werden, um noch eine Steigerung des Deckungsgrades zu erreichen. Dieser Effekt kommt bei Kollektoren in der Fassade deutlicher zum Tragen, als bei 45° geneigten, und bei Absorbern mit Solarlack deutlicher, als bei selektiv beschichteten Absorbern. Im Bereich 20% bis etwa 40% solarer Deckung besteht kaum ein Unterschied zwi-

schen selektiv beschichteten Absorbern und Absorbern mit Solarlack. Ab ca. 40% Deckung ist zu erkennen, dass der Verlauf der Deckung über der Kollektorfläche bei 90° Neigung stärker abflacht. Die Kollektorfläche muss nun noch mehr vergrößert werden, um den gleichen Deckungsgrad zu erreichen, wie die Anlage mit geneigtem Kollektor.

Abbildung 4.15 zeigt die erforderliche Vergrößerung der Kollektorfläche bei 90° Neigung bezogen auf die Fläche bei 45° Neigung bei verschiedenen Deckungsgraden. Der Deckungsgrad, der als Basisvariante definierten Fläche beträgt 69% und wird separat dargestellt.

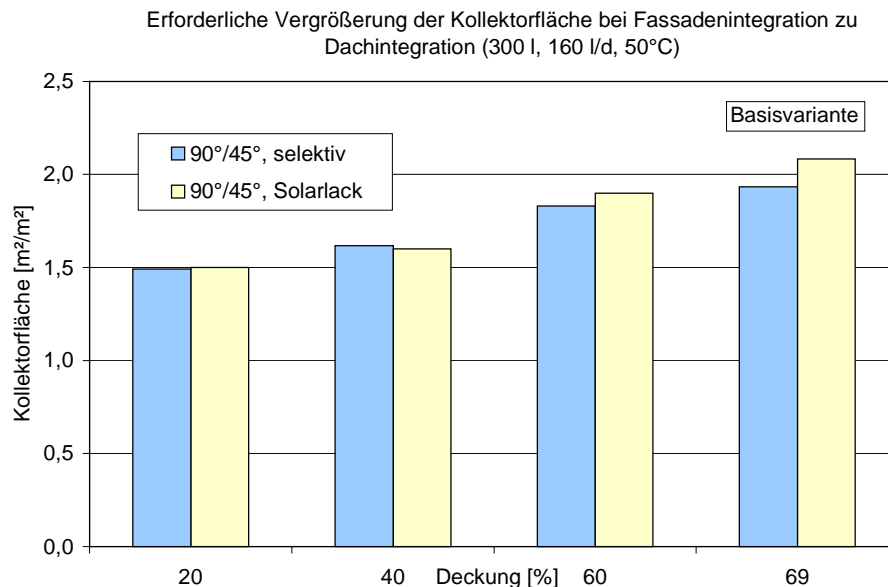


Abbildung 4.15: Erforderliche Vergrößerung der Kollektorfläche bei 90° Neigung im Vergleich zu 45° Neigung bei verschiedenen Deckungsgraden (EFH, WW, 300 l)

Bei 20% Deckung liegt das Verhältnis der aktiven Kollektorflächen bei selektiv beschichteten Absorbern und bei Absorbern mit Solarlack bei 1,5 und steigert sich nur unwesentlich bei 40% Deckung auf 1,6. Bei 60% Deckung ist jedoch ein deutlicher Anstieg des Verhältnisses zu erkennen. So müsste in der Fassade das 1,8-fache an Kollektorfläche installiert werden, bzw. das 1,9-fache bei Verwendung eines Absorbers mit Solarlack, im Vergleich zu einer Kollektorneigung von 45°. Dass dieses Verhältnis noch ansteigt, zeigt das Beispiel der Basisvariante, das eine Deckung von 69% bei einer Neigung von 45° aufweist. In der vertikalen Ebene müsste um den gleichen Deckungsgrad zu erreichen ca. die doppelte Fläche montiert werden.

4.2.4.2 Solaranlage zur Warmwasserbereitung bei hohem Verbrauch, EFH

Die Basisvariante 2 wurde mit einem 500 Liter Brauchwasserspeicher und einer Kollektorfläche von 8 m² definiert. Der Warmwasserverbrauch beträgt 240 Liter je Tag mit 50°C, was einen hohen Verbrauch darstellt. Es wurden sechs Personen mit einem Verbrauch von je 40 Liter je Tag angenommen (Hydraulisches Schaltschema wie in Abbildung 4.13).

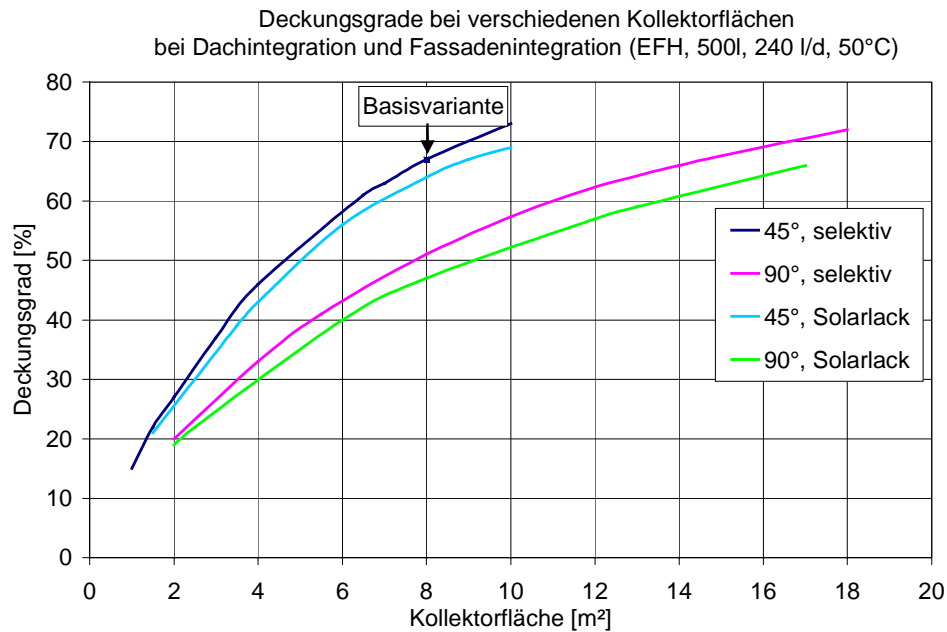


Abbildung 4.16: Vergleich der Deckungsgrade unter Variation von Kollektorfläche, Neigung und Kollektortyp (EFH, WW, 500 l)

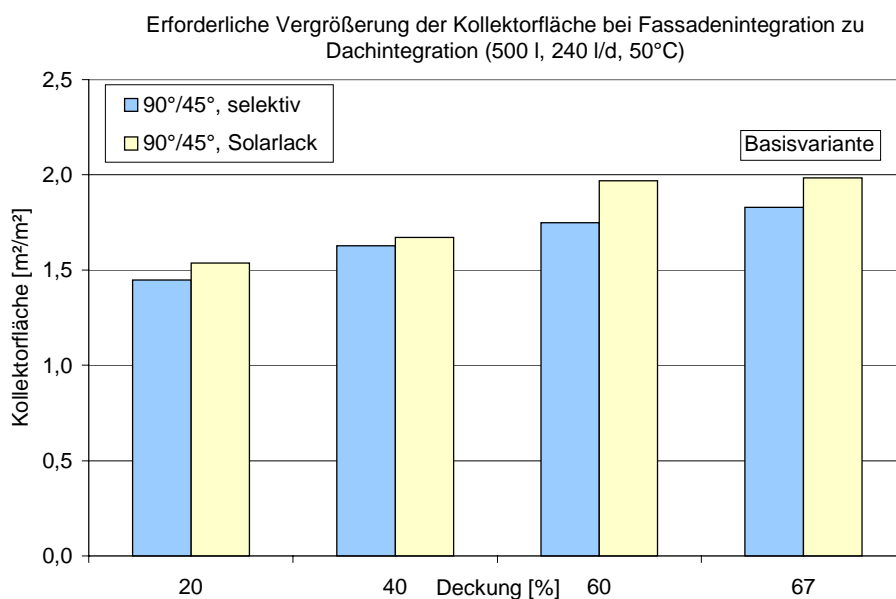


Abbildung 4.17: Erforderliche Vergrößerung der Kollektorfläche bei 90° Neigung im Vergleich zu 45° Neigung bei verschiedenen Deckungsgraden (EFH, WW, 500 l)

Der Verlauf des Deckungsgrades über der Kollektorfläche ist analog zu Variante 1 (siehe Abbildung 4.16). D.h. bei hoher Deckung muss die Kollektorfläche deutlich gesteigert werden, um eine Steigerung des Deckungsgrades zu bewirken. Dies ist wiederum bei 90° geneigten Flächen und bei Absorbern mit Solarlack stärker ausgeprägt, als bei 45° geneigten Flächen und selektiv beschichteten Absorbern.

Das Verhältnis der nötigen Fläche bei 90° geneigten zu 45° geneigten Flächen liegt bei 20% Deckung bei ca. 1,5 und unterscheidet sich hier kaum von Variante 1 (siehe Abbildung 4.17).

Es ist jedoch ein größerer Unterschied zwischen Absorbern mit Solarlack und selektiv beschichteten Absorbern zu erkennen, der wieder umso größer wird, je höher die Deckung ist.

4.2.4.3 Solaranlage zur Warmwasserbereitung, Mehrfamilienhaus

Als Beispiel für eine Anlage zur Warmwasserbereitung für ein Mehrfamilienhaus wurde eine Anlage mit Schichtspeicher, externem Wärmetauscher und Bereitschaftsspeicher gewählt (siehe Abbildung 4.18) [Lit 9].

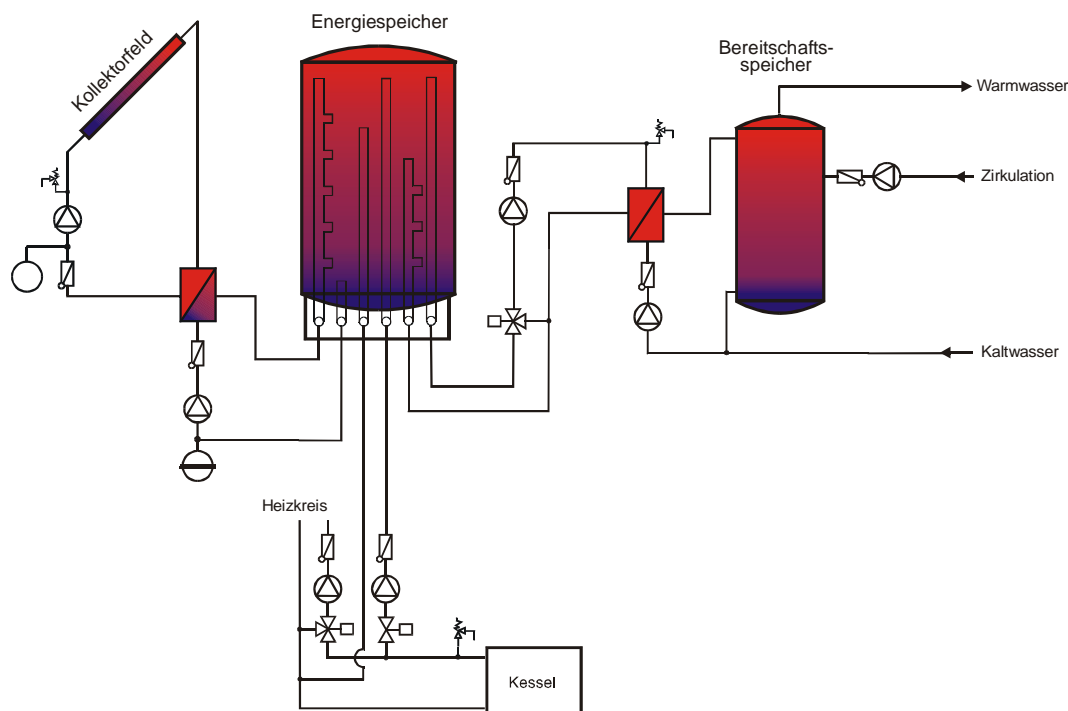


Abbildung 4.18: Hydraulikschema der Solaranlage zur für ein Mehrfamilienhaus mit 1500 l Energiespeicher und 500 l Bereitschaftsspeicher

Der Vergleich des Verlaufs des Deckungsgrades über der Kollektorfläche zeigt, dass bei höheren Deckungsgraden die Kollektorfläche stärker vergrößert werden muss, um eine Erhöhung des Deckungsgrades zu erreichen. Dies ist bei solarlackbeschichteten Absorbern stärker ausgeprägt, als bei selektiv beschichteten und bei 90° Neigung stärker, als bei 45°. Bei einer Neigung des Kollektors von 90° ist bis zu 30% Deckung kein Unterschied zwischen solarlackbeschichteten und selektiv beschichteten Absorbern zu erkennen.

Abbildung 4.19 zeigt, dass bei 20% Deckung das gleiche Flächenverhältnis erforderlich ist, wie bei den beiden Varianten 1 und 2 zur Warmwasserbereitung in Einfamilienhäusern. Bei 40% Deckung ist bereits ein deutlicher Anstieg des Verhältnisses der nötigen effektiven Kollektorfläche mit 90° Neigung zur Fläche mit 45° Neigung zu erkennen. Bei weiterer Erhöhung der Deckung auf 60% liegt das Flächenverhältnis bei selektiv beschichtetem Absorber bei 2 und bei einem Absorber mit Solarlack bereits bei 2,3.

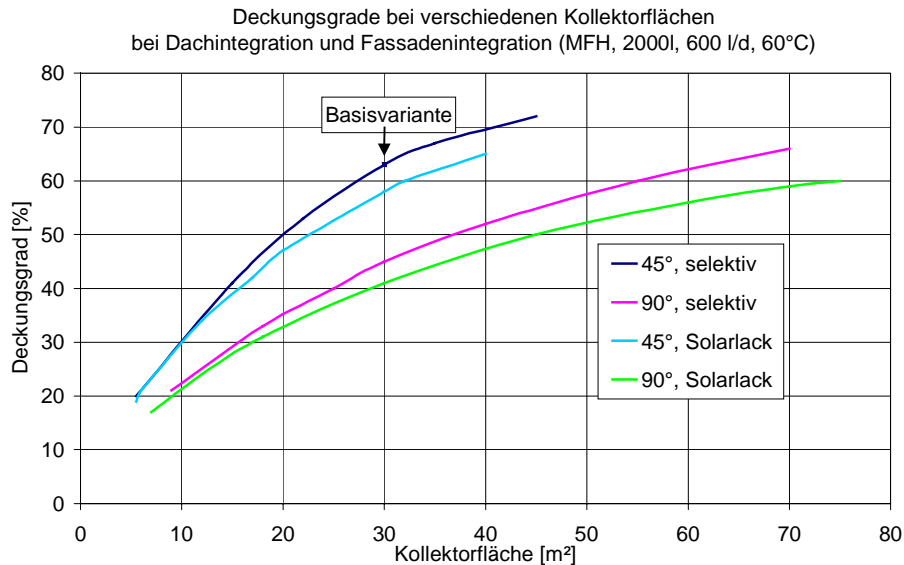


Abbildung 4.19: Vergleich der Deckungsgrade unter Variation von Kollektorfläche, Neigung und Kollektortyp (MFH, WW, 2000 l)

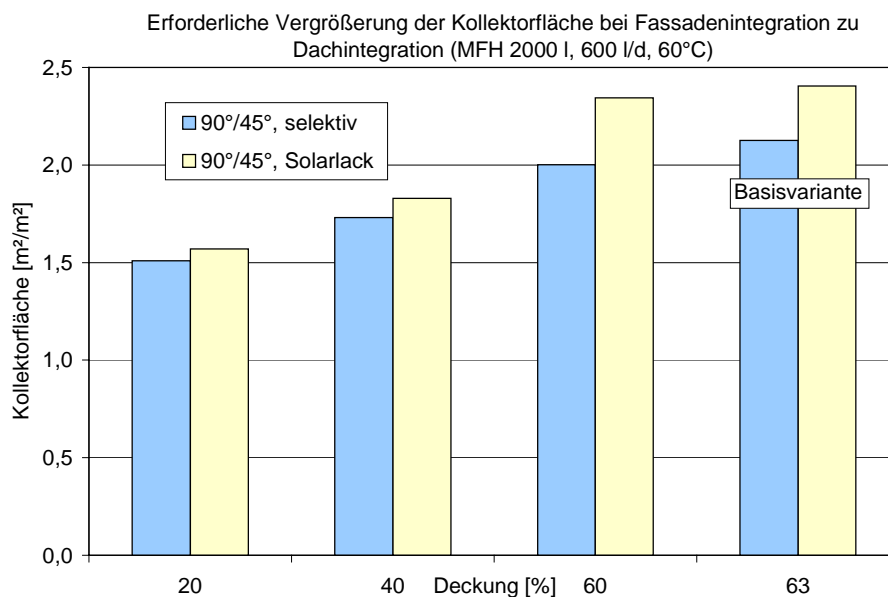


Abbildung 4.20: Erforderliche Vergrößerung der Kollektorfläche bei 90° Neigung im Vergleich zu 45° Neigung bei verschiedenen Deckungsgraden (MFH, WW, 2000 l)

4.2.4.4 Solaranlage zur Warmwasserbereitung bei hohem Verbrauch, MFH

Der Verlauf des Deckungsgrades über der Kollektorfläche bei einer Anlage mit 6000 Liter Speicher (4500 l Energiespeicher und 1500 l Bereitschaftsspeicher) und einem Warmwasserbedarf von 2100 l/d verläuft analog zu Variante 3 (Schaltschema siehe Abbildung 4.18). Bei den Verhältnissen der effektiven Kollektorfläche bei 90° zur Fläche bei 45° ist kein Unterschied zu Variante 3 zu erkennen (siehe Abbildung 4.21).

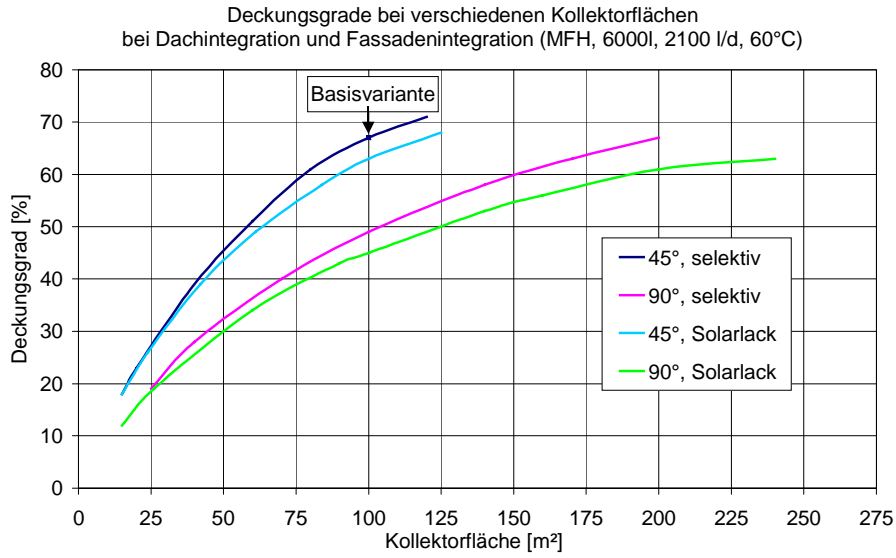


Abbildung 4.21: Vergleich der Deckungsgrade unter Variation von Kollektorfläche, Neigung und Kollektortyp (MFH, WW, 6000 l)

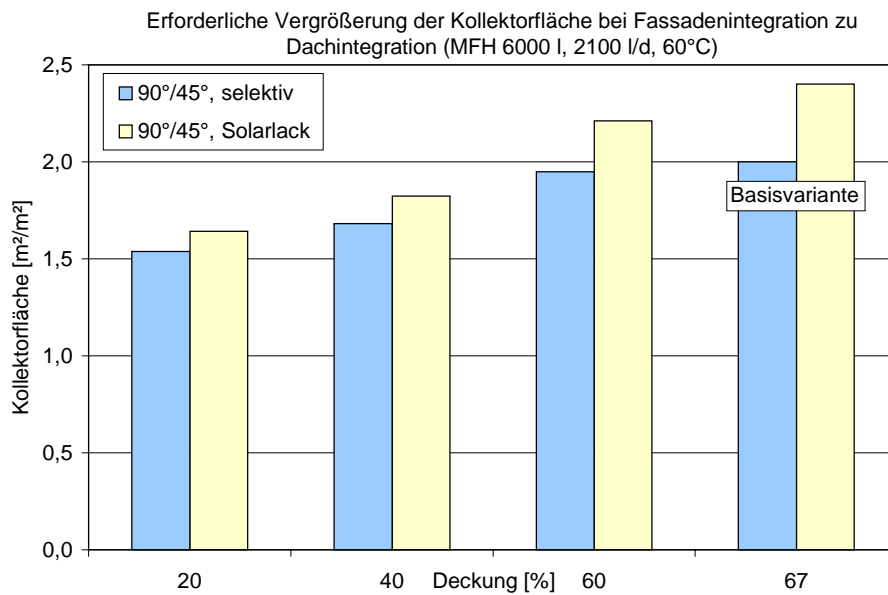


Abbildung 4.22: Erforderliche Vergrößerung der Kollektorfläche bei 90° Neigung im Vergleich zu 45° Neigung bei verschiedenen Deckungsgraden (MFH, WW, 6000 l)

4.2.4.5 Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Raumheizung, EFH

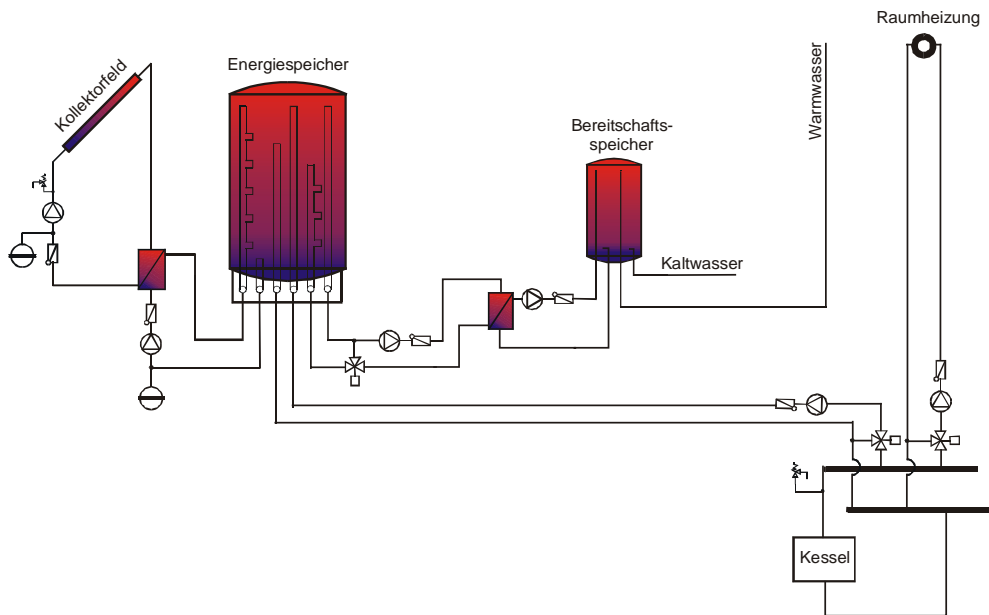


Abbildung 4.23: Hydraulikschema der Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Raumheizung für ein Einfamilienhaus

Variante 5 stellt ein Beispiel für die Warmwasserbereitung und Raumheizungsunterstützung mit thermischen Solaranlagen bei Einfamilienhäusern dar (siehe Abbildung 4.23). Der Energiespeicher (Pufferspeicher) hat ein Volumen von 2000 Liter und der Bereitschaftsspeicher (Boiler) fasst 300 Liter. Das Haus hat eine Heizlast von 8 kW. Beim Verlauf des Deckungsgrades über der effektiven Kollektorfläche ist zu erkennen, dass die Kurven nicht derart auseinanderdriften, wie bei den bisher betrachteten Varianten 1 bis 4 zur reinen Warmwasserbereitung (siehe Abbildung 4.24).

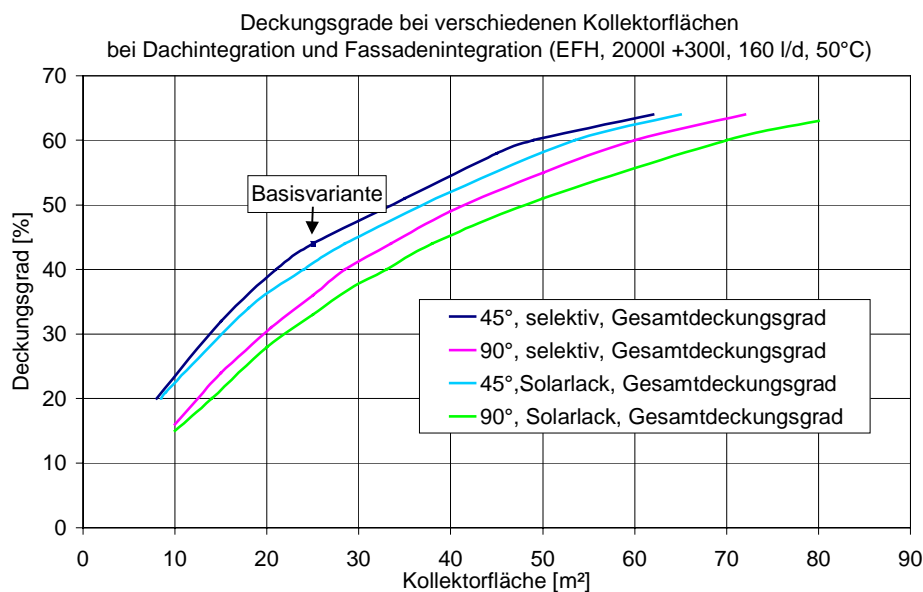


Abbildung 4.24: Vergleich der Deckungsgrade unter Variation von Kollektorfläche, Neigung und Kollektortyp (EFH, WW+RH, 2000 l+300 l)

Das Verhältnis der effektiven Kollektorfläche bei einer Neigung von 90° zu einer Neigung von 45° nimmt zu größeren Deckungsgraden hin ab (siehe Abbildung 4.25), was dadurch erklärbar ist, dass bei Raumheizungsanlagen die *möglichen* sommerlichen Erträge der 45° geneigten Kollektoren nicht zur Gänze genutzt werden können.

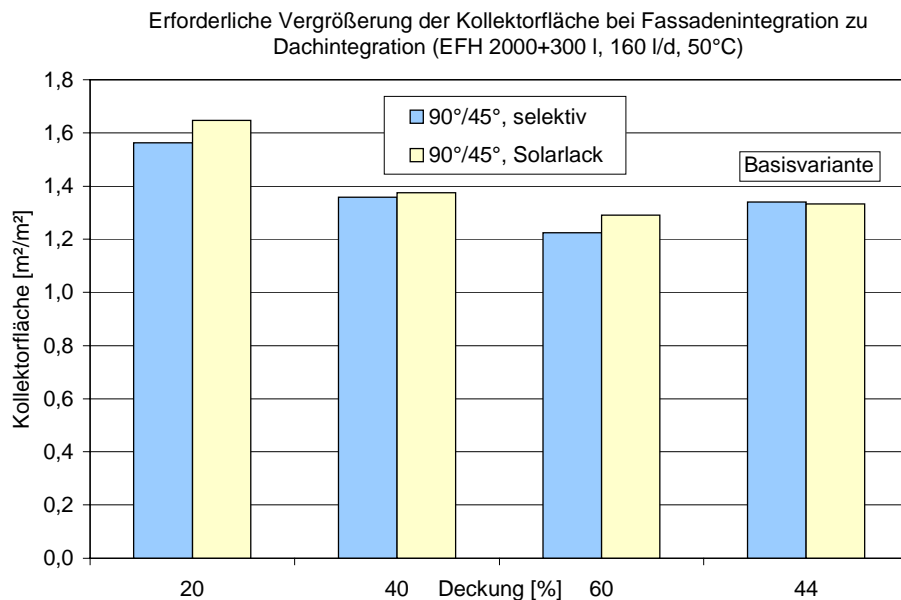


Abbildung 4.25: Erforderliche Vergrößerung der Kollektorfläche bei 90° Neigung im Vergleich zu 45° Neigung bei verschiedenen Deckungsgraden (EFH, WW+RH, 2000 l+300 l)

Der Verlauf des Gesamtdeckungsgrades ergibt sich aus dem Verlauf der Deckungsgrade des Warmwassers und der Heizung. Mit steigender Kollektorfläche steigt die Heizungsdeckung stärker an, als die Warmwasserdeckung (siehe Abbildung 4.26 und Abbildung 4.27). Von 20% auf 60% Gesamtdeckung steigt bei einem 45° geneigten selektiven Absorber die Warmwasserdeckung um das 1,5-fache an (Solarlack: 1,4-fach). Die Heizungsdeckung steigt dagegen für einen selektiv beschichteten Absorber und für einen Absorber mit Solarlack um das 4,5-fache. Bei einem 90° geneigten Absorber (selektive Beschichtung oder Solarlack) erhöht sich von 20% auf 60% Gesamtdeckung die Warmwasserdeckung um das 1,8-fache und die Heizungsdeckung um den Faktor 3,6. Bei 45° Neigung erhöht sich also die Heizungsdeckung um das Dreifache, bei 90° Neigung um das Doppelte im Vergleich zur Warmwasserdeckung.

Die Heizungsdeckung ist in der vertikalen Wand durchwegs höher als in der geneigten Fläche. Daraus lässt sich erklären, dass die Verläufe der Gesamtdeckung über der Kollektorfläche bei 45° und bei 90° Neigung auch bei größeren Flächen nicht auseinanderdriften.

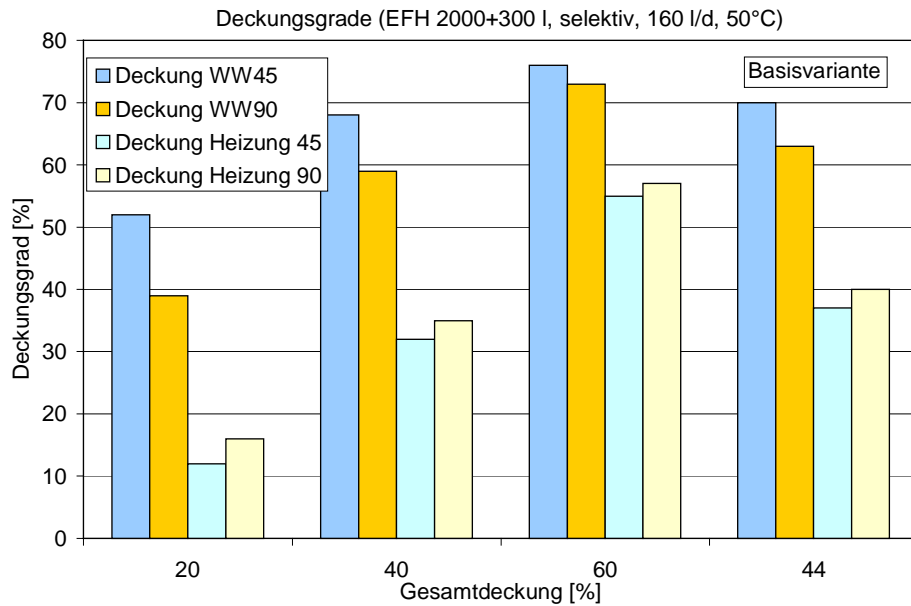


Abbildung 4.26: Vergleich der Deckungsgrade von Warmwasser und Heizung bei verschiedenen Gesamtdeckungsgraden (selektive Beschichtung)

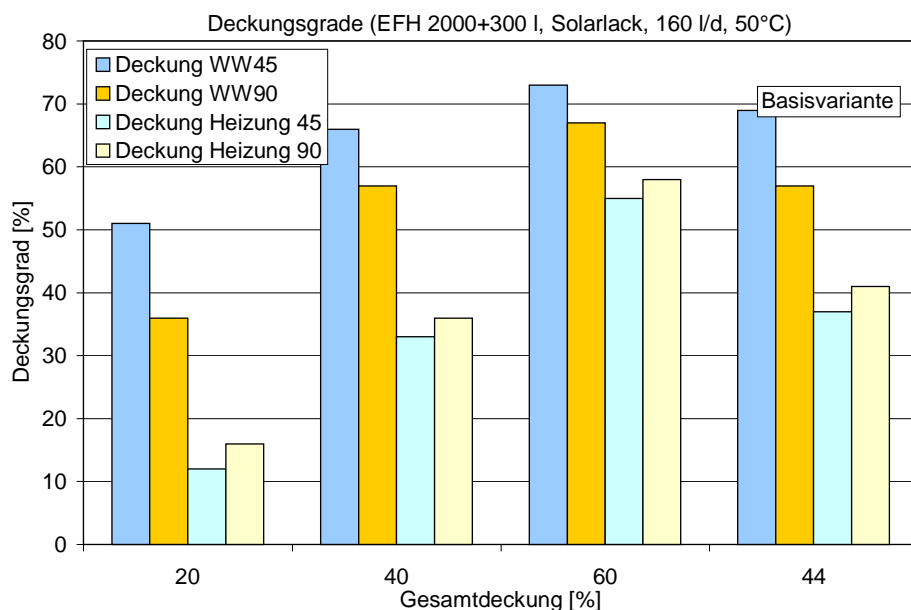


Abbildung 4.27: Vergleich der Deckungsgrade von Warmwasser und Heizung bei verschiedenen Gesamtdeckungsgraden (Solarlack)

4.2.4.6 Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Raumheizung mit großem Speicher, EFH

Das hydraulische Schaltschema dieser Anlage entspricht dem Schema, das in Abbildung 4.23 dargestellt ist. Die Anlage hat einen 5000 Liter Energiespeicher und einen 300 Liter Bereitschaftsspeicher. Der Verlauf des Deckungsgrades über die Kollektorfläche ist analog zu Variante 5 (siehe Abbildung 4.28). Daraus ergibt sich auch, dass die Verhältnisse der effektiven Kollektorflächen bei 90° und bei 45° Neigung in der gleichen Größenordnung liegen und die gleiche Tendenz zeigen (Abbildung 4.29).

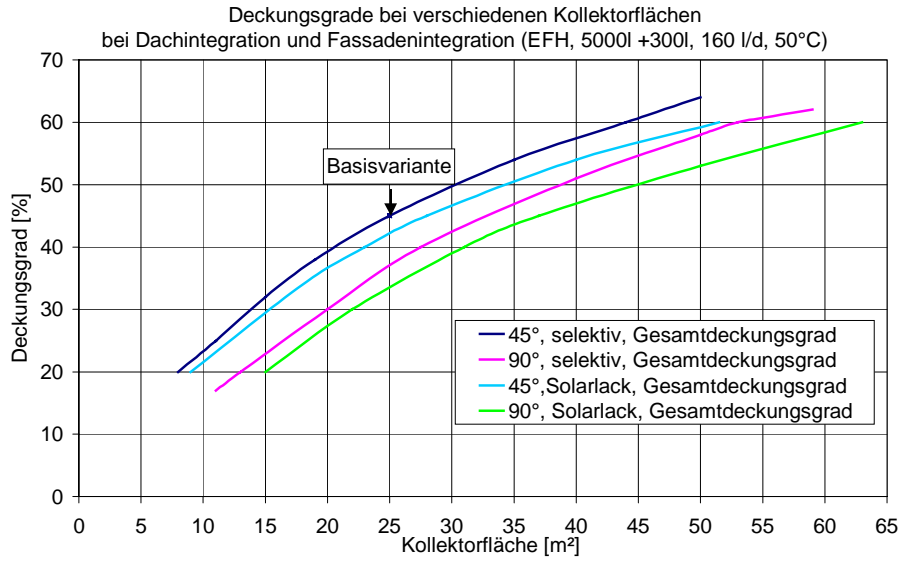


Abbildung 4.28: Vergleich der Deckungsgrade unter Variation von Kollektorfläche, Neigung und Kolleortyp (EFH, WW+RH, 5000 l+300 l)

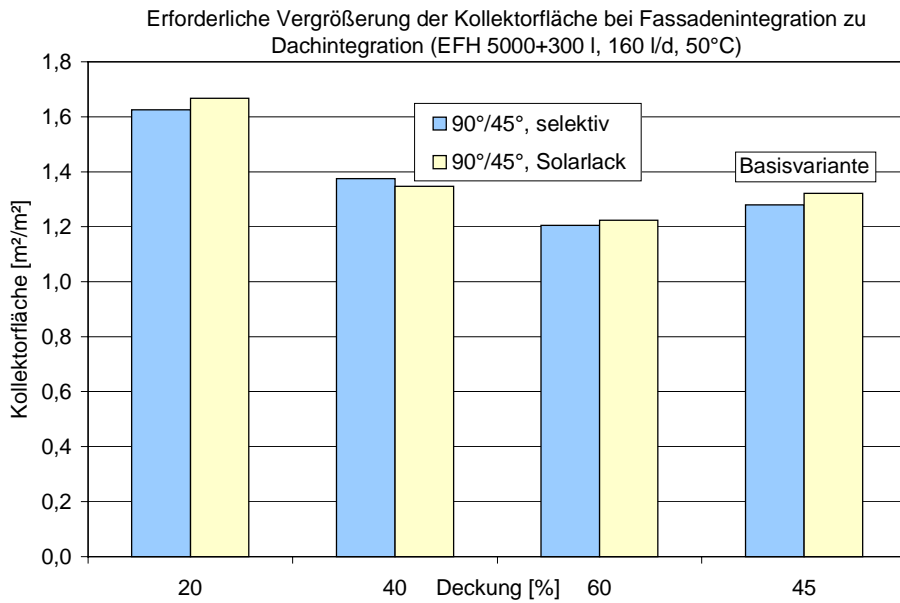


Abbildung 4.29: Kollektorfläche bei 90° Neigung zu 45° Neigung, verschiedene Deckungsgrade (EFH, WW+RH, 5000 l+300 l)

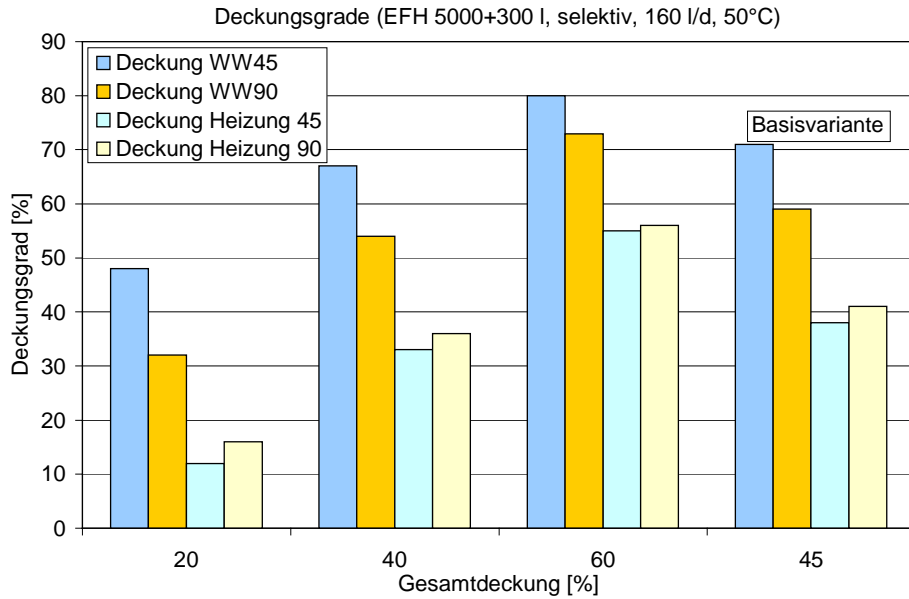


Abbildung 4.30: Vergleich der Deckungsgrade von Warmwasser und Heizung bei verschiedenen Gesamtdeckungsgraden (selektive Beschichtung)

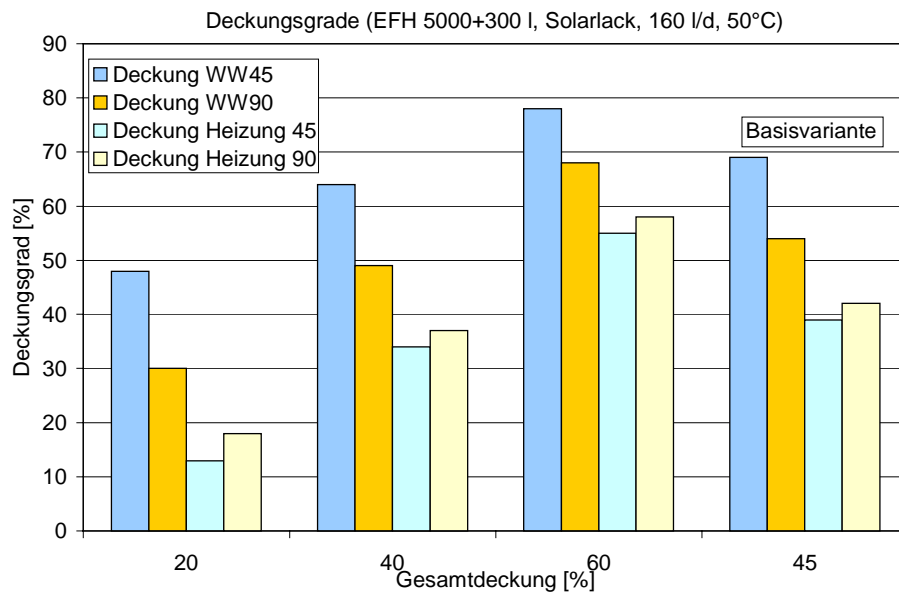


Abbildung 4.31: Vergleich der Deckungsgrade von Warmwasser und Heizung bei verschiedenen Gesamtdeckungsgraden (Solarlack)

4.2.5 Schlussfolgerungen

Für den Anwendungsfall der Solaranlage zur reinen Warmwasserbereitung im Einfamilienhausbereich mit mittlerem Warmwasserbedarf zeigen die Simulationen, dass bis ca. 40% solarer Deckung die Kollektorfläche in der Fassade um das 1,5-fache vergrößert werden muss, um den gleichen Deckungsgrad zu erreichen, wie in der 45° geneigten Ebene. Dieses Verhältnis ist für Absorber mit selektiver Beschichtung gleich wie bei Absorbern mit Solarlack. Will man den Deckungsgrad weiter erhöhen, steigt das Verhältnis der Kollektorflächen stärker an. Dieser Effekt ist bei Absorbern mit Solarlack stärker zu erkennen, als bei selektiv beschichteten Absorbern.

Für den Fall des erhöhten Warmwasserbedarfs im Einfamilienhaus gelten prinzipiell dieselben Erkenntnisse wie oben, wobei aber ein größerer Unterschied zwischen selektiv beschichteten Absorbern und Absorbern mit Solarlack festzustellen ist. Dieser ist umso größer, je höher die Deckung ist. Um denselben Deckungsgrad zu erreichen ist bei erhöhtem Warmwasserbedarf und einem größeren Speicher ist bereits eine größere Kollektorfläche nötig, als bei geringem Warmwasserbedarf und kleinerem Speicher.

Ähnlich gelagert liegt der Fall bei der Warmwasserbereitung bei Mehrfamilienhäusern. Im Bereich der 20%-igen Deckung liegt das Flächenverhältnis bei 1,5 und steigt zu höheren Deckungen an, allerdings stärker als bei den Varianten 1 und 2. Auch sind die Unterschiede der Kollektortypen bei höheren Deckungen stärker ausgeprägt.

Gänzlich anders zeigen sich die Ergebnisse aus der Simulation von Heizungseinbindungen. Je größer die Kollektorfläche ist (und damit der Gesamtdeckungsgrad), desto geringer wird das Verhältnis der Flächen bei 90° Neigung und bei 45° Neigung bei einem bestimmten Deckungsgrad. Bei näherer Betrachtung liegt das am Heizungsdeckungsgrad, der mit steigender Kollektorfläche bei 45° Neigung um das Dreifache, bei 90° Neigung um das Doppelte im Vergleich zur Warmwasserdeckungsgrad zunimmt.

Der Heizungsdeckungsgrad ist bei 90° Neigung höher, als bei 45° geneigter Fläche, was die Kurven noch weiter aneinander annähert. Für den Fall der Heizungseinbindung ist die Positionierung der Kollektoren in der Vertikalen also umso günstiger, je höher der Deckungsgrad der Anlage ist.

Die Berechnung der Deckungsgrade erfolgte für alle berücksichtigten Fälle mit einem einheitlichen Reflexionsgrad, da im verwendeten Simulationsprogramm [Lit 4] ein Standardwert vorgegeben wird. Prinzipiell wird die Einstrahlung in die Fassade durch Schneereflexion jedoch erhöht und somit auch der Gesamtdeckungsgrad einer Anlage mit Fassadenkollektor.

5 Bauphysikalische Aspekte

5.1 Wärmedurchgang

Um das dynamische Verhalten des Systems „Wand-Kollektor“ beurteilen zu können, wurden Wärmestromberechnungen für die 5 Wandaufbauten durchgeführt. Ziel dieser Berechnungen waren insbesondere die Identifikation von Überhitzungsproblemen bei starker Einstrahlung und die Definition von Mindestdämmstärken zur Vermeidung von Überhitzung. Weiters wurde der Einfluss der Solarerträge auch bei nicht durchströmtem Absorber auf die Transmissionswärmeverluste im Winter untersucht.

Um über das Ausmaß der sommerlichen Überhitzung bei nicht hinterlüfteten Fassadenkollektor eine Aussage treffen zu können, wurden typische Wandaufbauten ohne Kollektor zum Vergleich herangezogen (siehe Anhang 1).

Im Winter können am Absorber, auch bei geringer Einstrahlung, höhere Temperaturen auftreten als die vorhandenen Umgebungstemperaturen. Es wurden daher Simulationen durchgeführt, um zu zeigen, wie sich der fassadenintegrierte Kollektor auf die Transmissionswärmeverluste bzw. den effektiven U-Wert des untersuchten Wandabschnittes auswirkt.

In der Berechnung wurde numerisch die eindimensionale, instationäre Wärmeleitungsgleichung für vielschichtige Wandaufbauten gelöst. Jeder definierte Abschnitt ist in beliebig viele Schichten (für das numerische Rechenverfahren) unterteilbar. Für jede Wandschicht werden die Dicke und die Dichte, Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärme eingegeben. Die Ergebnisse der Berechnungen sind die zeitliche und räumliche Temperaturverteilung im gesamten Wandaufbau und deren zeitliche Mittelwerte der Periode. Diese wurden numerisch und graphisch dargestellt. Weiters wurde der effektive U-Wert (U_{eff}) der Periode ermittelt.

5.1.1 Wandaufbauten

Es wurden Wandaufbauten gewählt, wie sie typischerweise in Einfamilienhäusern und im Geschossbau verwendet werden ([Lit 10], [Lit 11]). Die Wandaufbauten wurden so bestimmt, dass sie den Wärmeschutzbestimmungen für Gebäude in österreichischen Bundesländern entsprechen (siehe Tabelle 5.1) [Lit 12]. Die Wandaufbauten wurden im ersten Zwischenbericht des vorliegenden Projekts dargestellt und sind im vorliegenden Bericht im Anhang 1 enthalten.

Tabelle 5.1: U-Wert [W/m^2K] Obergrenzen laut baugesetzlichen Wärmeschutzbestimmungen in österreichischen Bundesländern [Lit 12]

Stand:2/2000	B	K	N	O	S	St	T	V	W
Gültig seit/ab	98	97	96	95	91	97	98	96	93
Außenwand	0,45	0,4	0,4	0,5	0,47-0,56	MFH:0,5 EFH, ZFH:0,4	0,35	0,35	0,5

MFH: Mehrfamilienhaus

EFH: Einfamilienhaus

ZFH: Zweifamilienhaus

5.1.2 Absorbtemperatur

Um den Wärmedurchgang durch das Gesamtsystem „Kollektor-Wand“ für die ausgewählten fünf Wandaufbauten berechnen zu können, wurden zunächst die Absorbtemperaturer-

mittelt. Der Berechnungen der Absorbertemperaturen wurden die in Tabelle 5.2 dargestellten Randbedingungen sowie das in Abbildung 5.1 abgebildete Solarsystem zu Grunde gelegt.

Tabelle 5.2: Anlage zur Ermittlung der Absorbertemperatur für die Berechnung des Wärmedurchgangs durch die Wandaufbauten.

		Kollektorfläche	Speicher- volumen	WW-Bedarf	Personen	WW- Temperatur	Heizlast
		[m ²]	[l]	[l/d,Person]	[-]	[°C]	[kW]
EFH	WW+RH	25	2000+300	40	4	50	8

EFH Einfamilienhaus

WW Warmwasser

RH Raumheizung

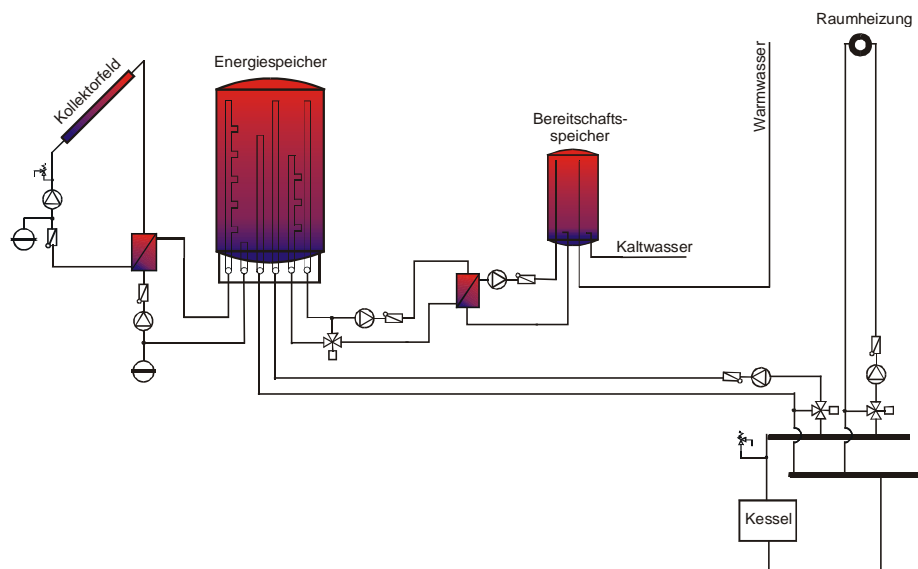


Abbildung 5.1: Hydraulisches Schaltschema der Anlage zur Ermittlung der Kollektortemperaturen für die Berechnung des Wärmedurchganges

Für die Ermittlung der Absorbertemperaturen wurde eine Kombianlage herangezogen, da aufgrund der Nutzung dieser Systeme (Warmwasserbereitung und Raumheizung) am ehesten mit hohen Absorbertemperaturen im Sommer zu rechnen ist. D.h. die getroffenen Annahmen stellen den „worst case“ bezüglich möglicher Überhitzungserscheinungen im dahinterliegenden Raum dar. Auf Basis der beschriebenen Annahmen erfolgte die Simulation der Temperaturen mit Hilfe des Simulationsprogramms T-Sol [Lit 4].

5.1.3 Sommerfall – Berechnung des Wärmedurchganges

Wie in der Einleitung des Kapitels 5.1 bereits beschrieben, war es das Ziel der Simulationen, festzustellen, ob und in welchem Ausmaß in sommerlichen Hitzeperioden durch die Direktintegration des Kollektors Überhitzung im Raum hinter der Wand mit dem Kollektor stattfindet. Basierend darauf sollten Mindestdämmstärken zur Vermeidung von Überhitzung definiert werden.

Die Berechnungen wurden mit Wetterdaten eines strahlungsintensiven Tages im Sommer durchgeführt. Die Klimadaten (Klimadaten Graz) sind in Tabelle 5.3 enthalten. Die Globalstrahlungssumme auf die Horizontale beträgt an diesem Tag 7273,6 Wh/m² in 24 Stunden,

die Strahlung in die Wandebene 3522,1 Wh/m². Die Ermittlung der Strahlung in die Wandebene erfolgt mit Hilfe der Gleichung 6.1 aus den Klimadaten. Der Tag wird 14 mal wiederholt, um eine Hitzeperiode zu simulieren. Die Leistung der Wand wird als Durchschnitt der letzten 24 Stunden angegeben.

Tabelle 5.3: Strahlungsintensiver Tag, Sommer, Klimadaten vom Standort Graz und ermittelte Strahlung in die Wandebene

Stunde	Umgebungstemperatur	Globalstrahlung	Diffusstrahlung	Strahlung in Wandebene
Nr.	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
1	15	0	0	0
2	14,8	0	0	0
3	14,6	0	0	0
4	14,6	0	0	0
5	15,7	26,11	23,89	14,56
6	16,1	127,50	67,78	46,64
7	16,5	232,78	152,78	99,67
8	17,6	403,89	185,28	133,03
9	18,7	497,78	280,83	235,35
10	19,4	683,06	248,33	338,04
11	22	777,50	298,06	420,51
12	23,3	877,50	270,28	486,99
13	24,3	845,56	325,00	473,31
14	25,7	744,72	316,94	405,42
15	26,6	675,83	255,83	335,40
16	26,7	491,11	286,39	234,27
17	26,1	406,11	186,11	133,67
18	25	277,50	123,89	89,69
19	24,7	167,22	79,44	56,44
20	23,7	39,44	30,28	19,08
21	21,6	0	0	0
22	20,8	0	0	0
23	19,6	0	0	0
24	18,4	0	0	0

Die Abbildungen 5.2 bis 5.6 geben die Ergebnisse der Berechnungen wieder. In den Diagrammen werden der statische U-Wert und die Dicke der Dämmung der Wandaufbauten angegeben. Schließlich wird die errechnete Leistung der Wand je Quadratmeter angegeben [W/m²]. Bei den Kollektoren wird zwischen selektiv beschichteten Kollektoren und Kollektoren mit Solarlack unterschieden.

Die Vergleichswand „Beton“ wurde mit zwei unterschiedlichen Dämmstärken berechnet. Dies hat den Grund, dass die Wärmeschutzbestimmungen für Gebäude in den verschiedenen österreichischen Bundesländern unterschiedlich sind (siehe Tabelle 5.1) [Lit 12]. Um den Verordnungen der Länder Tirol und Vorarlberg zu entsprechen (U-Wert Obergrenzen: 0,35 W/m²K), wurde die Dämmstärke des Vergleichswandaufbaus erhöht.

Die Wandaufbauten Ziegel (25er, 38er) und Beton mit Kollektor wurden mit 4 verschiedenen Dämmstärken (5, 8, 10 und 12 cm) berechnet. Bei der Holzriegelwand und der KLH-Wand wurden nur zwei verschiedene Dämmstärken (5 cm und 8 cm) variiert. Bei diesen beiden Wandaufbauten ist es das Ziel, den Kollektor so zu integrieren, dass er nicht über danebenstehende Wandelemente ohne Kollektor hinausragt. Der Kollektor wird also in die Holzrie-

gelwand integriert. Dies ist nur möglich, wenn die Dämmung des Kollektors entsprechend verringert werden kann.

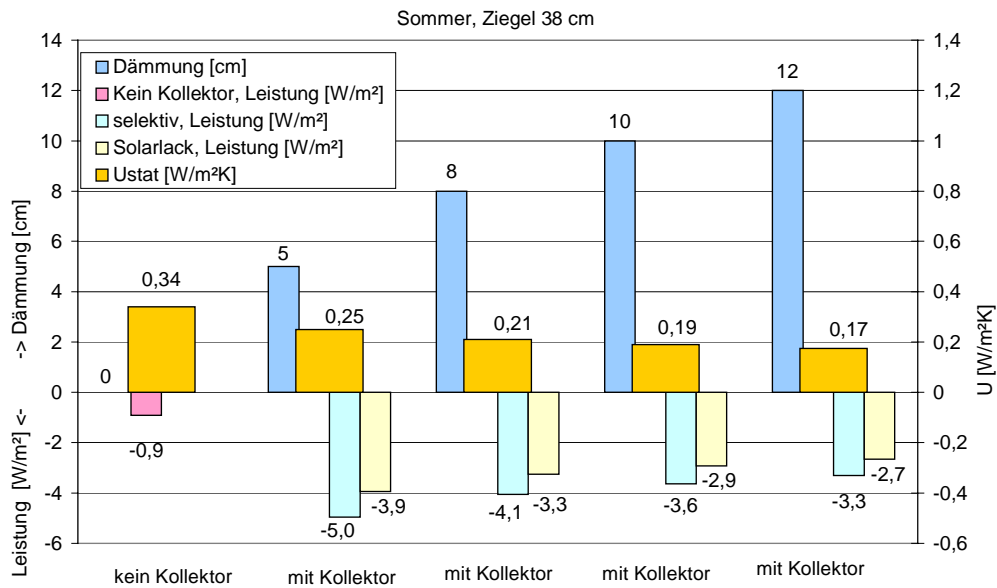


Abbildung 5.2: Ermittlung der Leistung der 38er Ziegelwand und der 38er Ziegelwand mit Kollektor (selektiv beschichtet oder Solarlack) mit unterschiedlichen Dämmstärken, Sommerfall

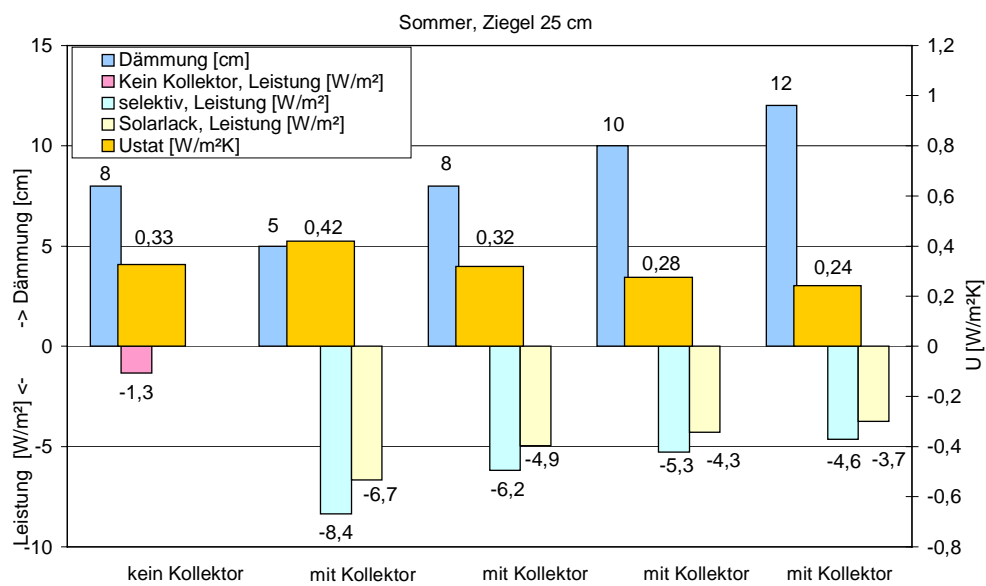


Abbildung 5.3: Ermittlung der Leistung der 25er Ziegelwand und der 25er Ziegelwand mit Kollektor (selektiv beschichtet oder Solarlack) mit unterschiedlichen Dämmstärken, Sommerfall

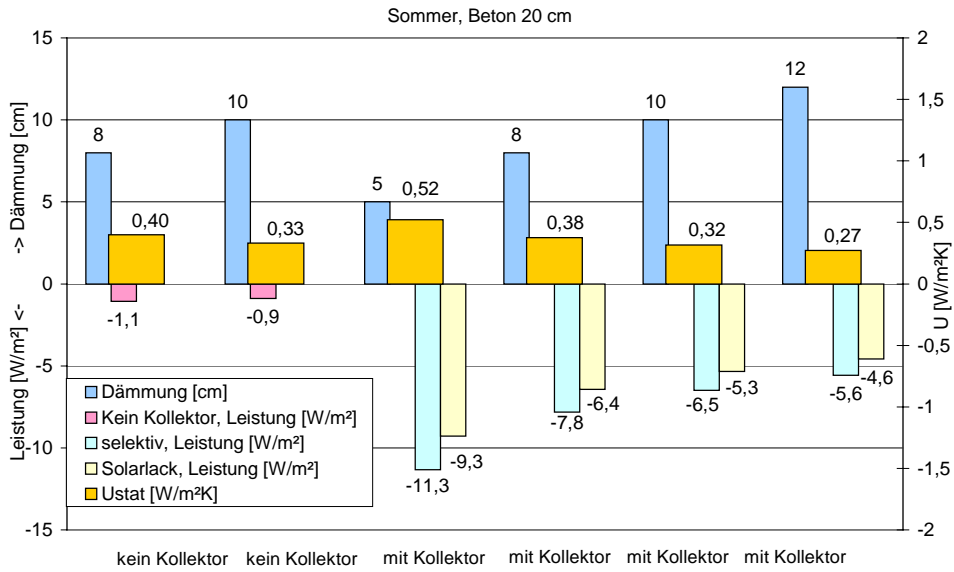


Abbildung 5.4 Ermittlung der Leistung der Betonwand und der Betonwand mit Kollektor (selektiv beschichtet oder Solarlack) mit unterschiedlichen Dämmstärken, Sommerfall

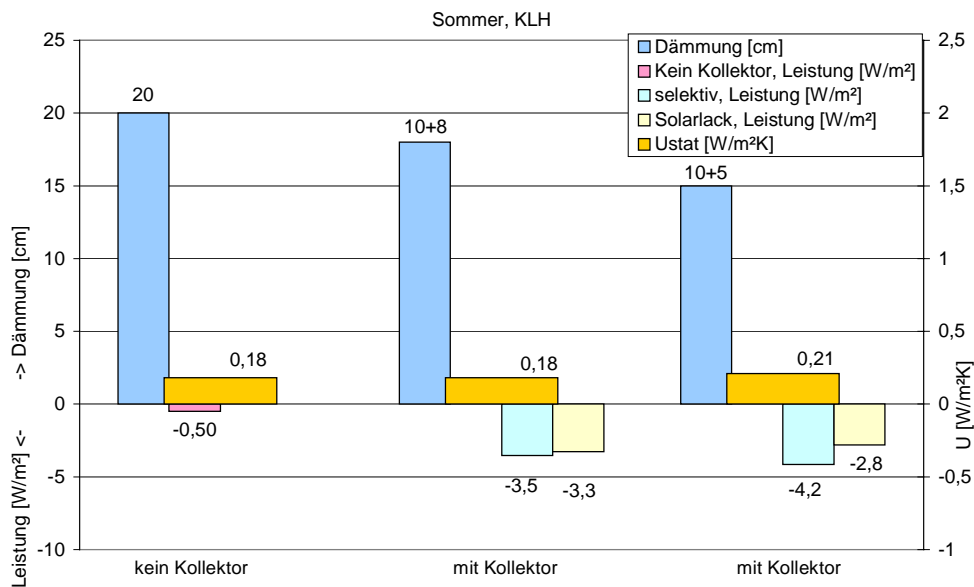


Abbildung 5.5: Ermittlung der Leistung der KLH-Wand und der KLH-Wand mit Kollektor (selektiv beschichtet oder Solarlack) mit unterschiedlichen Dämmstärken, Sommerfall

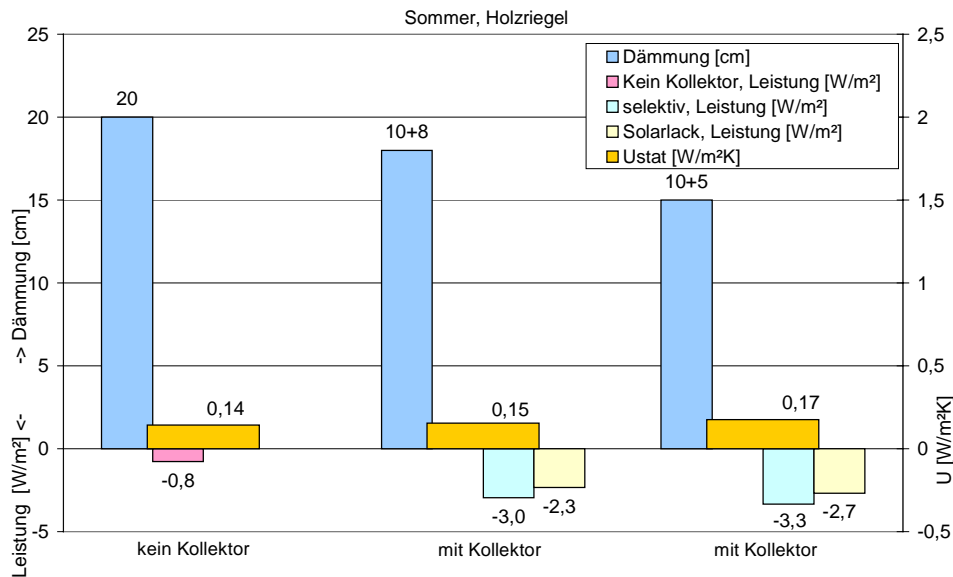


Abbildung 5.6: Ermittlung der Leistung der Holzriegelwand und der Holzriegelwand mit Kollektor (selektiv beschichtet oder Solarlack) mit unterschiedlichen Dämmstärken, Sommerfall

Die Ergebnisse der Berechnungen sind nun einerseits die statischen U-Werte der Wandaufbauten mit Kollektor. Diese müssen den jeweiligen baugesetzlichen Bestimmungen in den Bundesländern entsprechen.

Jede Wand hat entsprechend ihres Aufbaus (mit oder ohne Kollektor bzw. Stärke der Dämmung) eine bestimmte Wärmeabgabe in den Raum. Diese „Leistung“ wird in Watt je Quadratmeter angegeben. Es wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt, um eine Aussage darüber treffen zu können, wie sich die Leistung der Wand auf die Temperatur im Raum dahinter auswirkt (siehe Kapitel 5.1.3.3).

5.1.3.1 Temperatur- und Zeitprofil

Durch die Ermittlung des Wärmedurchgangs durch die Wand erhält man stündliche Temperaturprofile durch den gesamten Wandaufbau erhalten.

Abbildung 5.7 zeigt ein typisches Beispiel für den Temperaturverlauf bei starker Einstrahlung im Sommer in einer Massivwand (Ziegel, Beton) mit integriertem Kollektor. Der U-Wert des Wandaufbaus liegt bei 0,32 W/m²K.

Abbildung 5.8 zeigt den typischen Temperaturverlauf in einer Leichtbauwand (KLH-Wand oder Holzriegelwand) mit integriertem Kollektor, der U-Wert des Wandaufbaus liegt bei 0,21 W/m²K.

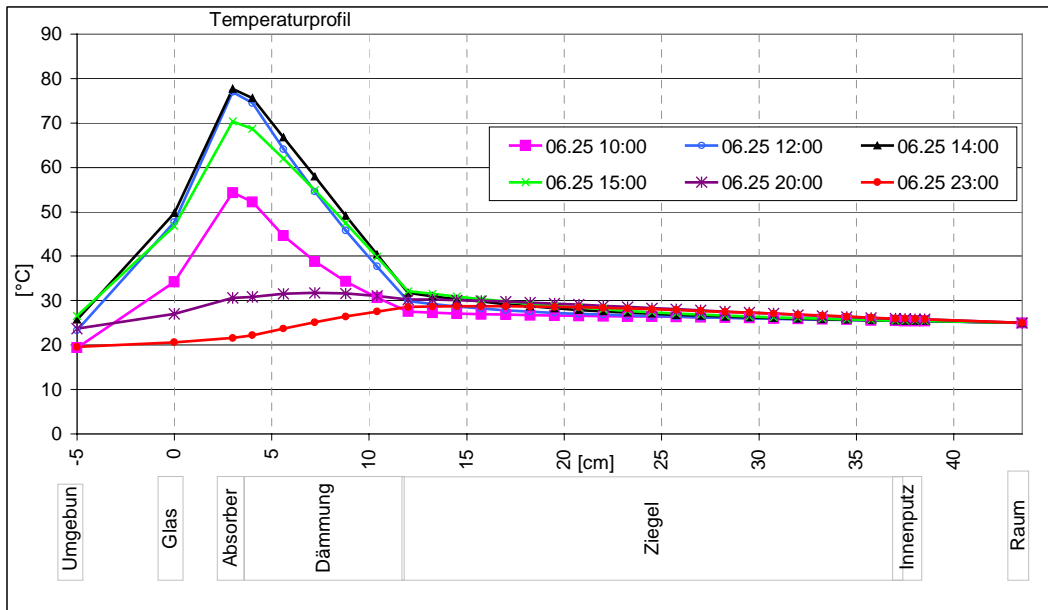


Abbildung 5.7: Temperaturverlauf im Wandaufbau mit Kollektor während 24 Stunden, typischer Verlauf in Massivwänden, Sommerfall

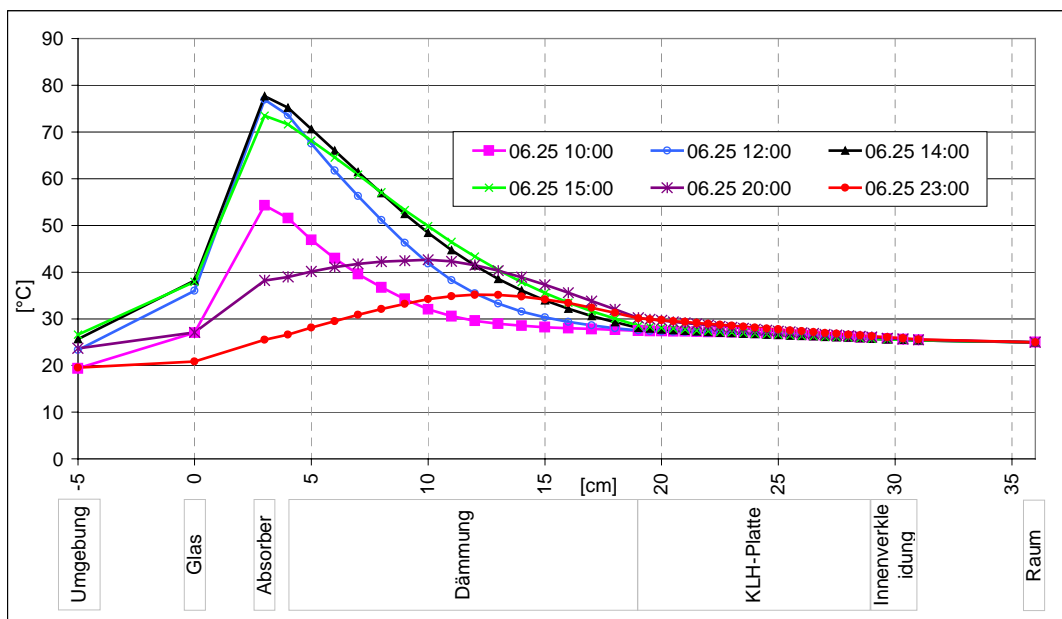


Abbildung 5.8: Temperaturverlauf im Wandaufbau mit Kollektor während 24 Stunden, typischer Verlauf in Leichtbauwänden, Sommerfall

Der durchströmte Absorber erreicht während des Tages Spitzentemperaturen von bis zu 80°C. In der Nacht kühlt der Absorber auf Umgebungstemperatur ab, dadurch kann auch die gespeicherte Wärme im Wandaufbau hinter dem Kollektor abgebaut werden. Dieser Effekt ist bei der Massivwand weniger stark zu erkennen, als bei der Leichtbauwand, da die Wärme in der Dämmschicht viel langsamer abgeleitet wird, als im Mauerwerk.

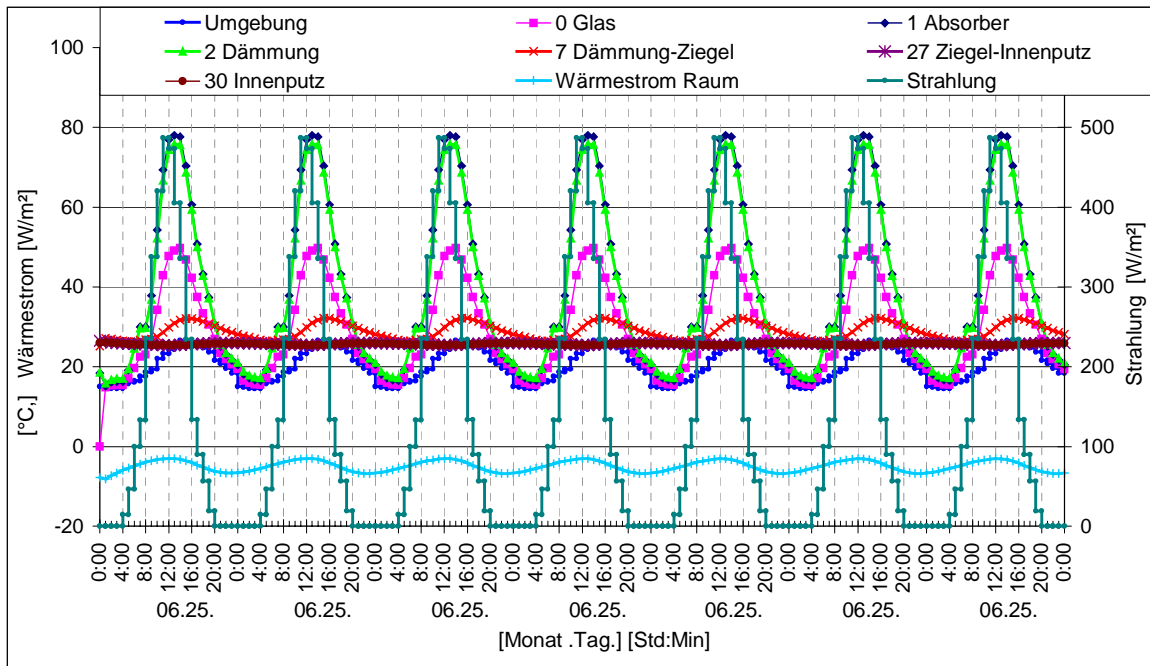


Abbildung 5.9: Verlauf von Temperatur und Strahlung während sieben Tagen, typischer Verlauf in Ziegel oder Betonwänden, Sommerfall

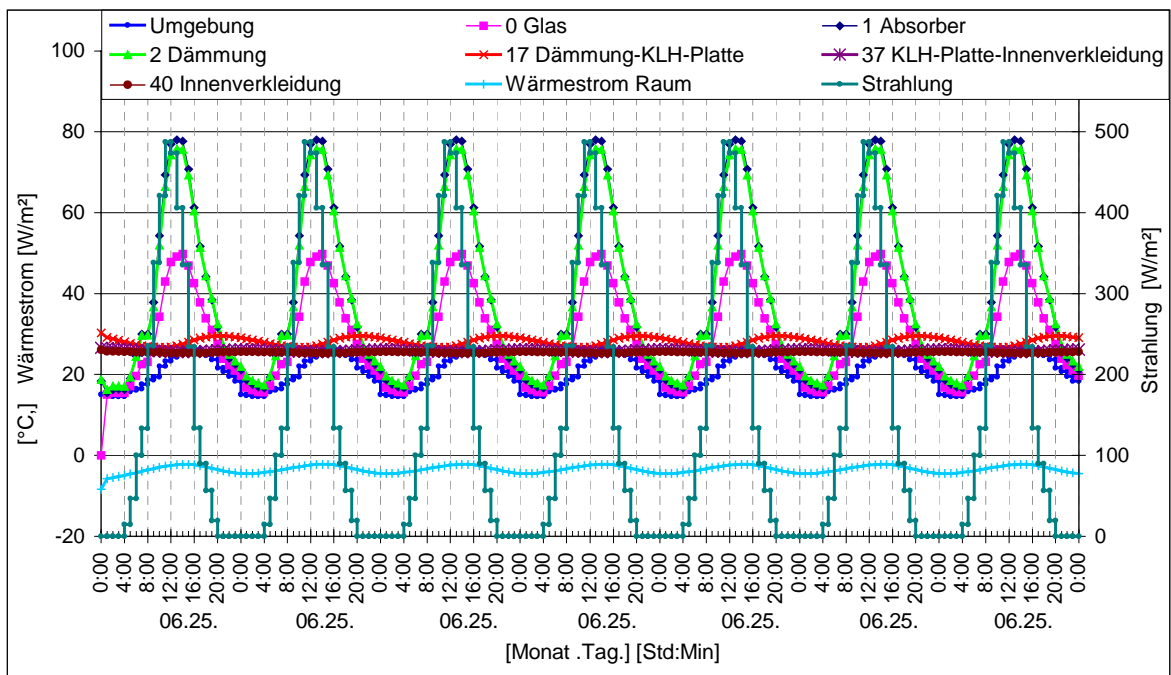


Abbildung 5.10: Verlauf von Temperatur und Strahlung während sieben Tagen, typischer Verlauf in KLH- oder Holzwänden, Sommerfall

Die hellblaue Kurve „Wärmestrom Raum“ in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 gibt die Leistung in Watt je Quadratmeter an, die von der Wand in den Raum abgegeben wird (negative Werte bedeuten einen Energieeintrag in den Raum). Die Kurve zeigt, dass die während des Tages gespeicherte Wärme durch die Trägheit der Wand in der Nacht verstärkt abgegeben wird.

Die hellgrüne Kurve zeigt den Temperaturverlauf in den äußersten Bereichen der Dämmung (die am Absorber anliegende Seite), die rote Kurve stellt die Temperaturen am Übergang von der Dämmung zum Ziegel dar. Während in den äußeren Bereichen das Temperaturmaximum bereits um zwölf Uhr erreicht wird, findet dies am Übergang von Dämmung zu Ziegel um zwei Stunden zeitversetzt statt. In der Zwischenzeit beginnen durch die verminderte Einstrahlung der Absorber und die äußeren Bereiche der Dämmung wieder abzukühlen.

5.1.3.2 Stagnationsfall

Die oben gezeigten Berechnungen gelten für den Kollektor im Betrieb. Vergleichsrechnungen mit einem Simulationsprogramm zur Auslegung von Solaranlagen [Lit 4] haben gezeigt, dass ein Kollektor in der Fassade aufgrund des flachen Einstrahlwinkels im Sommer üblicherweise nicht in Stagnation geht. Obwohl die Globalstrahlungssumme bei dem oben angeführten Beispielen sehr hoch ist (7273,6 Wh/m² in 24 Stunden) beträgt die Strahlung in die Wandebene nur 3522,1 Wh/m², also etwa die Hälfte (siehe Gleichung 4.1).

Es wurden Vergleichsrechnungen mit dem Wandaufbau „Ziegel 25“ mit Kollektor für einen strahlungsintensiven Tag im September durchgeführt. Die Globalstrahlungssumme beträgt an diesem Tag 6222,8 Wh/m² in 24 Stunden, die Strahlung in die Wandebene 5636,6 Wh/m², was annähernd 90% ausmacht. Dies ist durch den wesentlich flacheren Einfall der Sonnenstrahlung zu dieser Jahreszeit begründet. Kann an solch einem Tag der Kollektor keine Wärme abführen, so zeigen die Berechnungen, dass er bis zu 120°C erreicht (Abbildung 5.11).

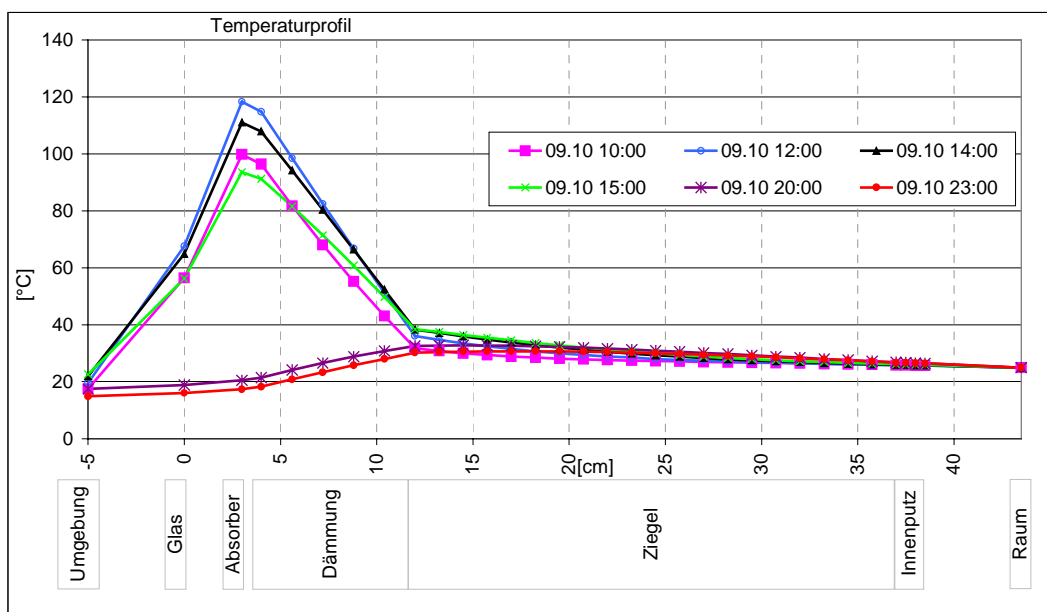


Abbildung 5.11: Temperaturverlauf im Wandaufbau, Stagnationsfall, Ziegel 25, 8 cm Dämmung

Die Leistung der Wand mit 8 cm Dämmung würde $-8,7 \text{ W/m}^2$ betragen, was für die definierten Vergleichsräume eine Temperaturerhöhung der Raumluft im dahinterliegenden Raum mit Kollektor gegenüber dem Raum ohne Kollektor von $1,3^\circ\text{C}$ ausmachen würde (siehe Kapitel 5.1.3.3). Da es sich hier um ein „worst case“ – Szenario handelt, kann die Überhitzungsproblematik durch Stagnation bei direkt integrierten Kollektoren als unkritisch angesehen werden.

5.1.3.3 Vergleichsrechnungen

5.1.3.3.1 Ziel der Simulation

Es sollte anhand von zwei Testräumen untersucht werden, wie sich die Raumtemperaturen in den Testräumen bzw. die jeweiligen Energieströme durch die Südfassade verhalten. Dazu wurde mit TRNSYS [Lit 13] ein Referenzgebäude modelliert, welches nachfolgend beschrieben wird. Für einen Testraum wurde ein Kollektor in die Südfassade integriert, der Vergleichsraum hat eine Fassade ohne Kollektor. Ausgabewerte der Simulation waren die jeweiligen Raumtemperaturen und der Energiestrom durch die Wand.

Als Ergebnis wurde ein Zusammenhang zwischen der Differenz der Leistung einer Wand mit Kollektor zu einer Wand ohne Kollektor und der Temperaturdifferenz der beiden Räume hinter den Wänden ermittelt.

5.1.3.3.2 Allgemeine Randbedingungen für die Simulation

Es wurde ein zweistöckiges Einfamilienhaus (Grundfläche 10 mal 7 Meter) mit einer nach Süden orientierten Fassade modelliert. Die Testräume mit 4 m x 3 m Südfassade und 3 m Raumtiefe wurden in der Mitte der Südfassade im Erdgeschoss bzw. im Obergeschoss jeweils im Osten und im Westen von einem Raum umgeben situiert. Als Nordbegrenzung wurde ein über die ganze Hausbreite gehender, über die zwei Stockwerke offener Raum festgelegt.

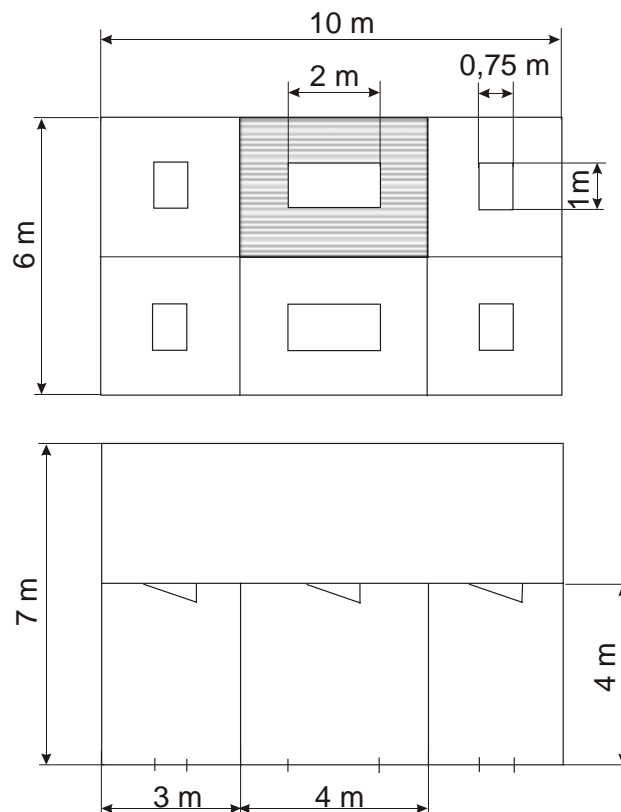


Abbildung 5.12: Grundriss und Aufriss der Südansicht des Testhauses, die Kollektorfläche ist schraffiert dargestellt

Das Haus wurde in die drei Zonen Testraum ohne Kollektor, Testraum mit Kollektor und das Resthaus aufgeteilt. Die Umgebungsparameter für die Testräume wurden folgendermaßen

festgelegt: Die Trennwände zu den östlichen bzw. westlichen Räumen wurden als Leichtbauwände, die Trennwände zum Resthaus als massive Innenwände ausgeführt. Der Luftwechsel zwischen Testraum und Resthaus findet durch die Zimmertüre statt, es gibt keine Verbindung zu den Nachbarräumen.

Die Südfassade der Testräume hat eine Fläche von 12 m², davon wurden 2 m² als Fenster definiert. Auf der Südfassade des Testraumes mit Kollektor wurde davon ausgegangen, dass die gesamte Restfläche von 10 m² mit einem Fassadenkollektor belegt ist.

5.1.3.3.3 Kollektortemperatur

Die Oberflächentemperatur des Absorbers wurde als Randbedingung für die Südfassade in Stundenwerten vorgegeben. Diese Stundenwerte wurden bei einer Kollektorsimulation bei ganztägig hoher Einstrahlung ermittelt. Die Ermittlung der Kollektortemperaturen wird in Kapitel 5.1.2 beschrieben.

5.1.3.3.4 Luftwechselraten

Die durch Undichtigkeiten bei den Türen, Fenstern, usw. auftretenden Luftwechsel wurden mit durchgehend 0,3 h⁻¹ angenommen. Durch das Öffnen der Zimmertüre entsteht ein konstanter Luftwechsel von 17,3 kg/h. Durch das Öffnen bzw. Kippen des Fensters entsteht ein zusätzlicher Luftwechsel nach außen der über die Zeit veränderlich folgendermaßen definiert wurde:

Tabelle 5.4: Festgesetzte Luftwechselraten

Zeit von - bis	Zeitdauer	Fensterzustand
00:00 bis 07:00 Uhr:	1,5 h ⁻¹	gekipptes Fenster
07:00 bis 09:00 Uhr:	3,0 h ⁻¹	geöffnetes Fenster
09:00 bis 20:00 Uhr:	0,0 h ⁻¹	geschlossenes Fenster
20:00 bis 23:00 Uhr:	1,5 h ⁻¹	gekipptes Fenster

5.1.3.3.5 Interne Lasten

Generell wurden keine internen Lasten durch Personen, Computer oder Beleuchtungen simuliert.

5.1.3.3.6 Kühlung

Es wurde keine Kühlung simuliert.

5.1.3.3.7 Wandaufbauten zur Beschreibung des Gebäudemodells

Als Fenster wurden 2-Scheibenwärmeschutzverglasungen mit einem U-Wert des Glases von 1,1 W/m²K bzw. einem g-Wert von 0,6 simuliert.

Untersucht wurde das Verhalten der Testräume in zwei verschiedenen Haustypen:

- Massivbauweise auf Basis eines 25er Hochlochziegel
- Leichtbau in Holzriegelbauweise

Die Abmessungen und Stoffdaten der simulierten Wandaufbauten sind im Anhang 2 enthalten.

5.1.3.3.8 Änderung der Raumtemperatur

Es wurde folgender Zusammenhang zwischen der Leistung der Wand und der Temperaturerhöhung in den definierten Vergleichsräumen ermittelt: Ist die Leistung der Wand mit Kollektor um 1 W/m^2 größer, als die Leistung der Wand ohne Kollektor, so ist die Lufttemperatur im oben definierten Testraum mit Kollektor um durchschnittlich $0,18^\circ\text{C}$ höher als im Vergleichsraum.

5.1.3.4 Sommerfall: Schlussfolgerungen, Ermittlung der Dämmstärke

Ziel der Berechnungen des Wärmestroms im Sommer in den ausgewählten Wandaufbauten mit integriertem Kollektor war, eventuelle Überhitzungsprobleme zu identifizieren und Mindestdämmstärken zu definieren.

Zur Ermittlung der Dämmstärken der Wandaufbauten mit Kollektor wurde ermittelt, wie groß die Differenz der Lufttemperaturen der Räume mit Fassadenkollektor und zu den Räumen ohne Fassadenkollektor ist. Dazu wurden die errechneten Leistungen der Wände (siehe Kapitel 5.1.3) mit Hilfe der Vergleichsrechnung (siehe Kapitel 5.1.3.3) umgerechnet auf Differenzen der Lufttemperaturen in den Testräumen.

Tabelle 5.5 enthält für sämtliche Wandaufbauten die ermittelten Leistungen und die Temperaturdifferenzen. Man erkennt in der

Tabelle 5.5, dass bei Wandaufbauten mit einem Absorber mit Solarlack die Temperaturdifferenz geringer ist, als bei Wandaufbauten mit selektiv beschichtetem Absorber. Dies ist darin begründet, dass ein Absorber mit einer Solarlackbeschichtung einen größeren Teil der Wärme, die an der Oberfläche des Absorbers entsteht, in Form von Wärmestrahlung wieder abgibt, als ein selektiv beschichteter Absorber. Bei Solarlackbeschichtung liegt der Emissionskoeffizient zwischen 0,86 und 0,88, bei selektiven Schichten liegt er dagegen um 0,1 [Lit 7].

Tabelle 5.5: Leistung der Wände und Temperaturdifferenz der Vergleichsräume

Wand	Absorber- beschichtung	Dämmung	U-Wert	Leistung	Temperatur- differenz
		[cm]	[W/m ² K]	[W/m ²]	[°C]
Ziegel 38	kein Kollektor	0	0,34	-0,9	-
	selektiv	5	0,25	-5,0	+0,73
	selektiv	8	0,21	-4,1	+0,57
	selektiv	10	0,19	-3,6	+0,49
	selektiv	12	0,17	-3,3	+0,43
	Solarlack	5	0,25	-3,9	+0,54
	Solarlack	8	0,21	-3,3	+0,42
	Solarlack	10	0,19	-2,9	+0,36
	Solarlack	12	0,17	-2,7	+0,31
Ziegel 25	kein Kollektor	8	0,33	-1,3	-
	selektiv	5	0,42	-8,4	+1,26
	selektiv	8	0,32	-6,2	+0,87
	selektiv	10	0,28	-5,3	+0,71
	selektiv	12	0,24	-4,6	+0,59
	Solarlack	5	0,42	-6,7	+0,96
	Solarlack	8	0,32	-4,9	+0,65
	Solarlack	10	0,28	-4,3	+0,53
	Solarlack	12	0,24	-3,7	+0,43
Beton	kein Kollektor	5	0,4	-1,1	-
	kein Kollektor	8	0,33	-0,9	-
	selektiv	5	0,52	-11,3	+1,85*
	selektiv	8	0,38	-7,8	+1,21*
	selektiv	10	0,32	-6,5	+0,98*
	selektiv	12	0,27	-5,6	+0,81*
	Solarlack	5	0,52	-9,3	+1,48*
	Solarlack	8	0,38	-6,4	+0,96*
	Solarlack	10	0,32	-5,3	+0,77*
					*Temperaturdifferenzen beziehen sich auf den Wandaufbau Beton mit 5 cm Dämmung
KLH	kein Kollektor	20	0,181	-0,5	-
	selektiv	18	0,182	-3,5	+0,55
	selektiv	15	0,21	-4,2	+0,66
	Solarlack	18	0,182	-2,8	+0,41
	Solarlack	15	0,21	-3,3	+0,50
Holzriegel	kein Kollektor	20	0,14	-0,8	-
	selektiv	18	0,15	-3,0	+0,40
	selektiv	15	0,17	-3,3	+0,46
	Solarlack	18	0,15	-2,3	+0,28
	Solarlack	15	0,17	-2,7	+0,35

Um die Dämmstärke für einen Wandaufbau mit fassadenintegriertem Kollektor auszuwählen, werden nun folgende Kriterien angewandt:

- Die statischen U-Werte der Wandaufbauten mit Kollektor müssen den jeweiligen baugesetzlichen Bestimmungen in den Bundesländern entsprechen [Lit 12].
- Die errechnete Temperaturdifferenz soll 1 K nicht überschreiten, um den Wärmeeintrag in den Raum so gering wie möglich zu halten.

Für die Wandaufbauten mit Kollektor wurden daher folgende Dämmstärken ermittelt, die in Tabelle 5.6 aufgelistet werden.

Tabelle 5.6. Erforderliche Dämmstärken für die Wandaufbauten mit Kollektor

Wand	Absorberbeschichtung	Dämmung [cm]	Anmerkung
Ziegel 38	selektiv	5	U-Wert kleiner als in allen Landesverordnungen vorgeschrieben
Ziegel 38	Solarlack	-"	-"
Ziegel 25	selektiv	8	U-Wert kleiner als in allen Landesverordnungen vorgeschrieben und die Temperaturdifferenz ist unter 1 K
Ziegel 25	Solarlack	8	U-Wert kleiner als in allen Landesverordnungen vorgeschrieben und die Temperaturdifferenz ist unter 1 K
Ziegel 25	Solarlack	5	Aufgrund des U-Werts nach den Landesverordnungen nur für Wien, Burgenland, Oberösterreich, Salzburg und Steiermark (nur MFH) möglich.
Beton	selektiv	10	U-Wert kleiner als in allen Landesverordnungen und die Temperaturdifferenz ist unter 1 K
Beton	Solarlack	10	U-Wert kleiner als in allen Landesverordnungen und die Temperaturdifferenz ist unter 1 K
	Solarlack	8	U-Wert kleiner als in allen Landesverordnungen außer Tirol und Vorarlberg
KLH	selektiv	5	Der Kollektor kann in das Wandelement „versenkt“ werden und schließt mit der anschließenden Wand eben ab.
KLH	Solarlack	-"	-"
Holzriegel	selektiv	5	Der Kollektor kann in das Wandelement „versenkt“ werden und schließt mit der anschließenden Wand eben ab.
Holzriegel	Solarlack	-"	-"

MFH Mehrfamilienhäuser

Man erkennt, dass abhängig vom Absorbertyp (selektive Beschichtung, Solarlack), bei den Wandaufbauten „Ziegel 25“ und „Beton“ unterschiedliche Dämmstärken ermittelt wurden, um eine sommerliche Überhitzung zu vermeiden. Weiters ergibt sich bei diesen beiden Wandaufbauten, dass man mit einer bestimmten Dämmstärke einige Landesverordnungen zwar erfüllt, andere aber nicht (siehe Tabelle 5.6). Es wird daher empfohlen, die jeweils größte

Dämmstärke für einen Wandaufbau zu wählen, da sonst viele Sonderfälle zu beachten sind, was sich in erhöhten Produktionskosten niederschlägt.

Bei den übrigen Wandaufbauten wurde kein Unterschied in der Dämmstärke ermittelt, da andere Faktoren als der Absorbentyp einen stärkeren Ausschlag gegeben haben.

Bei dem Wandaufbau „Ziegel 38“ hat die Wand selbst bereits einen so niedrigen U-Wert, dass jede zusätzliche Dämmung den Einfluss des Absorbentyps noch verringert.

Die Wände „KLH“ und „Holzriegel“ sind bereits sehr gut gedämmt und haben U-Werte, die bereits unter allen Landesverordnungen liegen. Es wurde mit dünneren Dämmstärken gerechnet, als der Wandaufbau ohne Kollektor hat. Dadurch ist es möglich, den Kollektor im Wandaufbau zu „versenken“ und ihn in einer Ebene mit den umgebenden Wandelementen (ohne Kollektor) abschließen zu lassen. Die eingesparten Kosten für die Dämmung können den Kollektor gut geschrieben werden.

5.1.4 Winterfall – Berechnung des effektiven U-Werts

Es war das Ziel der Untersuchungen, den Einfluss eines fassadenintegrierten Kollektors auf die Transmissionswärmeverluste einer Wand im Winter zu untersuchen. Am Absorber treten auch bei geringer Einstrahlung höhere Temperaturen auf, als in der Umgebung. Dadurch werden die Transmissionswärmeverluste des Wandabschnittes mit Kollektor vermindert, dies findet in einer Herabsetzung des U-Werts seinen Ausdruck. Dieser U-Wert, der aus den tatsächlichen Gegebenheiten von Innen- und Außentemperaturen errechnet wird, wird effektiver U-Wert (U_{eff}) genannt.

Der effektive U-Wert ist im Gegensatz zum statischen U-Wert ein Momentanwert. Er wird aus dem aktuell vorhandenen Temperaturen innerhalb und außerhalb des betrachteten Wandabschnittes ermittelt. Der effektive U-Wert ist ein Maß für den Wärmestrom, der zu einem bestimmten Zeitpunkt in eine bestimmte Richtung durch den Wandabschnitt fließt. Eine Erwärmung des Kollektors bewirkt einen geringeren effektiven U-Wert.

Die Berechnungen wurden mit Wetterdaten eines strahlungsintensiven und eines strahlungsarmen Tages im Winter durchgeführt. Der Tag wird 14 mal wiederholt, um eine stabile Periode zu simulieren. Die Klimadaten (Klimadaten Graz, Einstrahlung, Temperatur) sind in Tabelle 5.7 und Tabelle 5.8 enthalten.

Die Globalstrahlungssumme auf die Horizontale beträgt am strahlungsintensiven Tag 2153,3 Wh/m² in 24 Stunden, die Strahlung in die Wandebene 4814,3 Wh/m². Am strahlungsarmen Tag beträgt die Globalstrahlungssumme 457,2 Wh/m² in 24 Stunden, die Strahlung in die Wandebene 434 Wh/m². Der Anteil der Diffusstrahlung an der Globalstrahlung beträgt an diesem Tag 100%.

Die Strahlung in die Wandebene wurde mit Hilfe der Gleichung 6.1 aus den Klimadaten ermittelt.

Tabelle 5.7: Strahlungsintensiver Tag im Winter, Klimadaten vom Standort Graz und ermittelte Strahlung in die Wandebene

Stunde	Umgebungs- temperatur	Globalstrahlung	Diffusstrahlung	Strahlung in Wandebene
Nr.	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
1	-5,9	0	0	0
2	-5,6	0	0	0
3	-6,2	0	0	0
4	-6,5	0	0	0
5	-5,8	0	0	0
6	-5,7	0	0	0
7	-5,9	0	0	0
8	-5,4	0	0	0
9	-5,3	91,11	41,11	282,66
10	-4,8	218,61	60,83	565,79
11	-3,5	333,61	70,00	793,10
12	-2,3	424,44	116,39	903,23
13	-1,6	385,00	117,78	792,12
14	-0,2	305,28	115,56	611,32
15	0,2	224,17	102,78	456,99
16	0,6	149,17	67,50	390,41
17	0,7	21,94	21,94	18,65
18	-0,3	0	0	0
19	-2	0	0	0
20	-3,3	0	0	0
21	-3,7	0	0	0
22	-4	0	0	0
23	-4	0	0	0
24	-1,8	0	0	0

Tabelle 5.8: Strahlungsarmer Tag im Winter, Klimadaten vom Standort Graz und ermittelte Strahlung in die Wandebene

Stunde	Umgebungs- temperatur	Globalstrahlung	Diffusstrahlung	Strahlung in Wandebene
Nr.	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
1	-6,5	0	0	0
2	-6,5	0	0	0
3	-5,6	0	0	0
4	-5,3	0	0	0
5	-5,2	0	0	0
6	-5,3	0	0	0
7	-5,4	0	0	0
8	-5,5	0	0	0
9	-5,7	1,11	1,11	0,94
10	-6,2	39,72	39,72	33,76
11	-6,4	53,06	53,06	45,10
12	-5,8	86,11	86,11	73,19
13	-5,5	104,17	104,17	88,54
14	-5,5	141,39	123,06	165,51
15	-4,7	24,72	24,72	21,01
16	-4,7	6,94	6,94	5,90
17	-5	0,00	0	0
18	-5,8	0	0	0
19	-5,1	0	0	0
20	-5,2	0	0	0
21	-5,7	0	0	0
22	-6,6	0	0	0
23	-6,3	0	0	0
24	-6,4	0	0	0

Der U-Wert wird durch die Erwärmung des Kollektors herabgesetzt. Am strahlungsintensiven Tag wurden für die simulierten Wandaufbauten U-Werte zwischen 0,02 und 0,1 W/m²K ermittelt (Abbildung 5.13 bis Abbildung 5.17, hellgelbe Balken). Diese werden durch die Dämmstärke und die Art des Absorbers beeinflusst.

Den stärksten Einfluss auf den effektiven U-Wert bei einem strahlungsintensiven Tag hat der Absorbertyp. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass bei den Wandaufbauten mit Kollektor und selektiver Beschichtung des Absorbers die effektiven U-Werte durchwegs niedriger sind, als bei den Wandaufbauten mit Kollektoren mit solarlackbeschichteten Absorbern.

Dies liegt daran, dass ein Absorber mit selektiver Beschichtung einen geringeren Emissionskoeffizienten hat, als ein Absorber mit Solarlack. Daher strahlt er weniger Wärme wieder ab.

Auch an strahlungsarmen Tagen erwärmt sich der Absorber, wenn auch geringer als an strahlungsreichen Tagen. Dennoch bewirkt das eine Herabsetzung des effektiven U-Werts. Selbst bei geringster Einstrahlung, wenn sich der Kollektor so wenig erwärmt, dass er keine Wärme in den Speicher liefern kann, d.h. wenn er nicht durchströmt wird, findet eine Herab-

setzung des U-Wertes statt, da der Kollektor sich gegenüber der Umgebung deutlich erwärmt (siehe auch Kapitel 5.1.4.1).

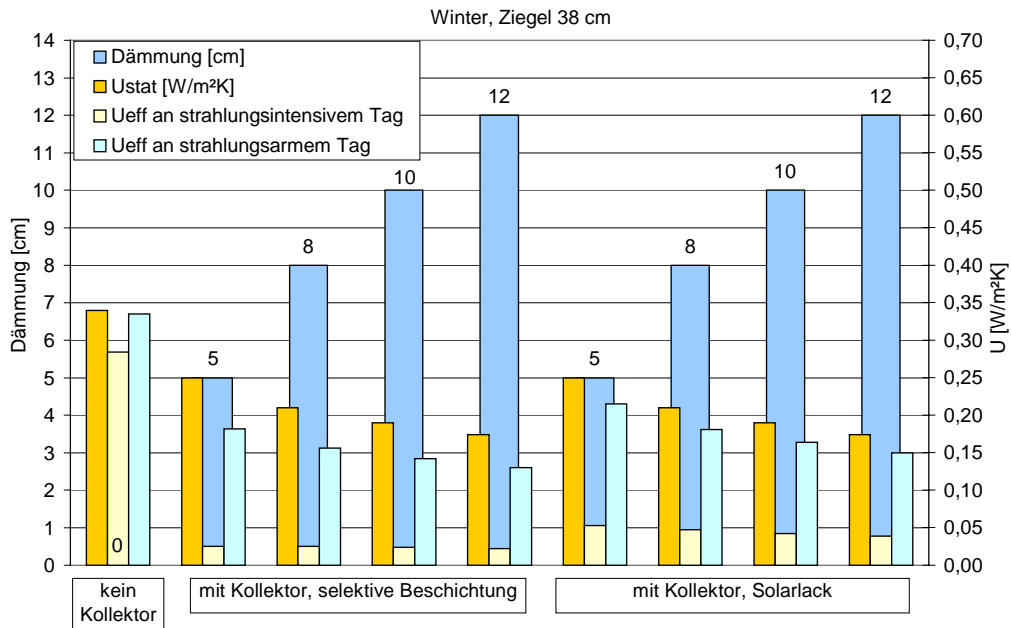


Abbildung 5.13: Ermittlung des effektiven U-Werts an strahlungsintensiven und strahlungsarmen Wintertagen. Ziegel 38, unterschiedliche Dämmstärken

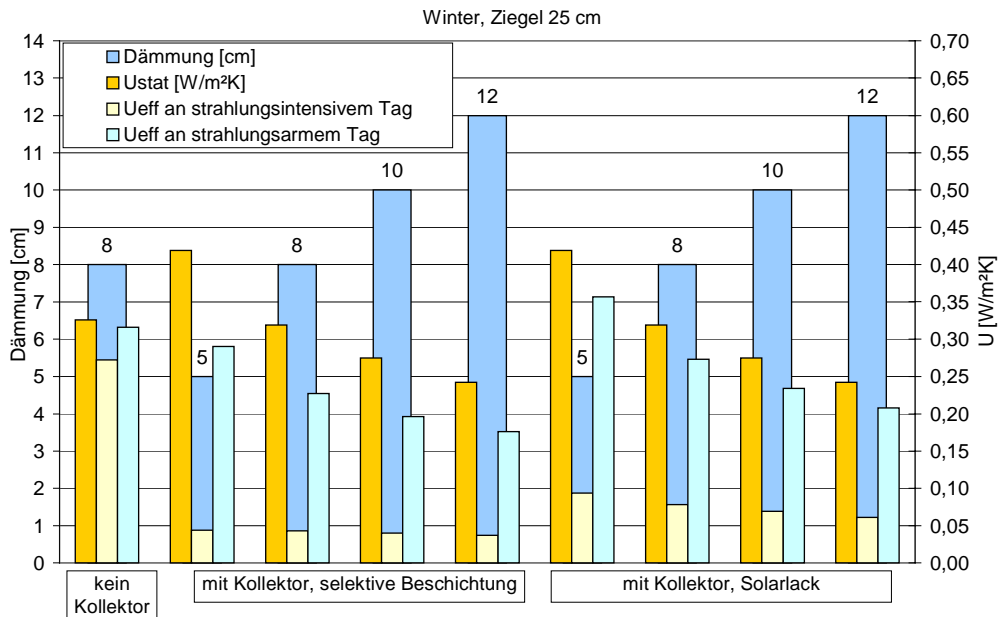


Abbildung 5.14: Ermittlung des effektiven U-Werts an strahlungsintensiven und strahlungsarmen Wintertagen. Ziegel 25, unterschiedliche Dämmstärken

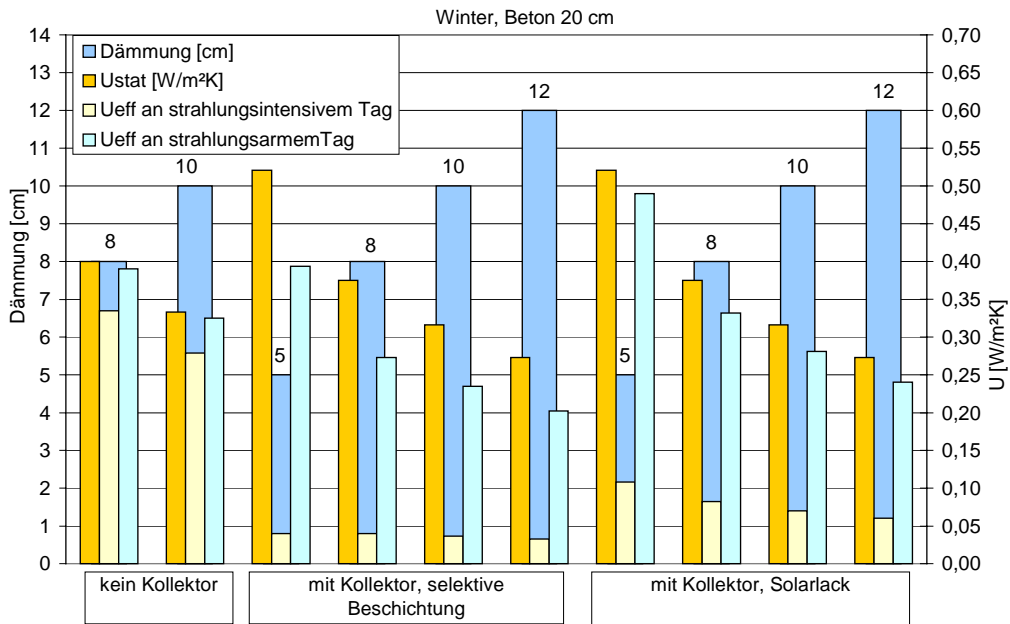


Abbildung 5.15: Ermittlung des effektiven U-Werts an strahlungsintensiven und strahlungsarmen Wintertagen. Beton, unterschiedliche Dämmstärken

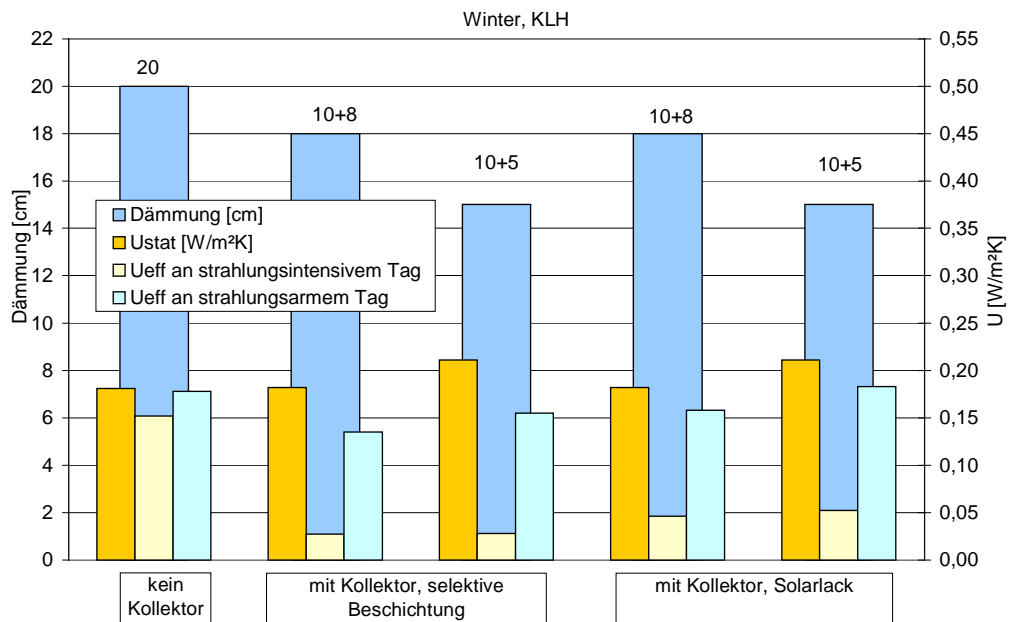


Abbildung 5.16: Ermittlung des effektiven U-Werts an strahlungsintensiven und strahlungsarmen Wintertagen. KLH-Wand, unterschiedliche Dämmstärken

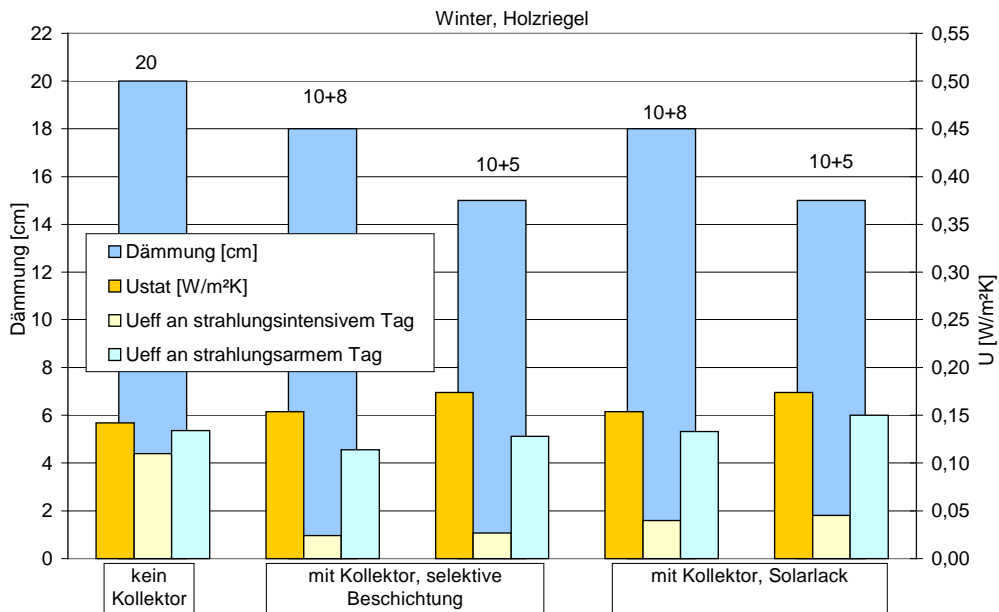


Abbildung 5.17: Ermittlung des effektiven U-Werts an strahlungsintensiven und strahlungsarmen Wintertagen, Holzriegel-Wand, unterschiedliche Dämmstärken

5.1.4.1 Temperaturprofil

Abbildung 5.18 zeigt ein typisches Beispiel für den Temperaturverlauf bei schwacher Einstrahlung im Winter in einer Massivwand (Ziegel, Beton) mit integriertem Kollektor (hier solarlackbeschichtet). Der Kollektor erwärmt sich bei einer Außentemperatur von unter -5°C auf über 10°C . Dies erreicht er allein durch die diffuse Strahlung, die an diesem Tag vorhanden ist. Dadurch wird der U-Wert herabgesetzt.

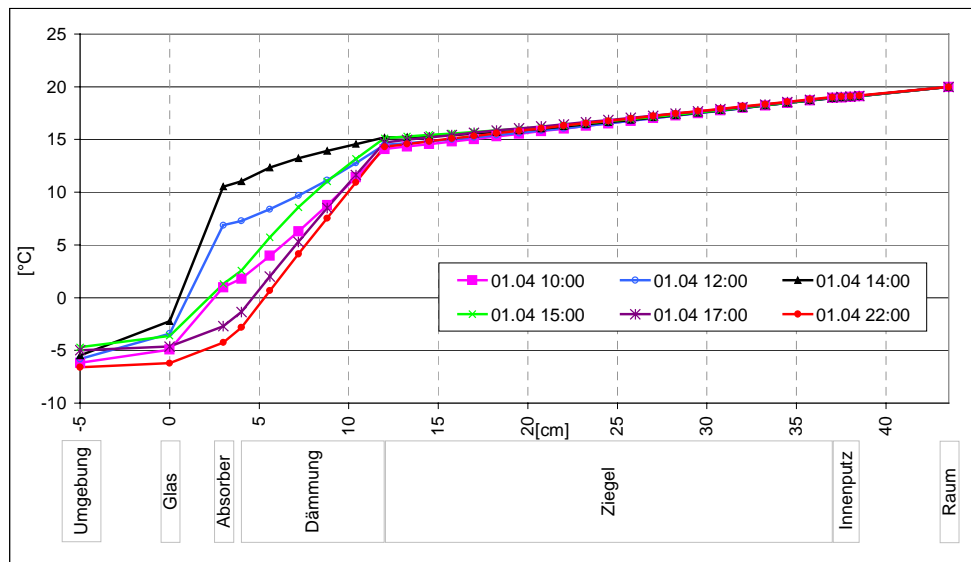


Abbildung 5.18: Temperaturverlauf im Wandaufbau, Ziegel 25, 8 cm Dämmung, strahlungsarmer Wintertag

Abbildung 5.19 zeigt ein typisches Beispiel für den Temperaturverlauf bei schwacher Einstrahlung im Winter in einer Leichtbauwand (KLH-Wand oder Holzriegelwand) mit integriertem Kollektor (hier Solarlack).

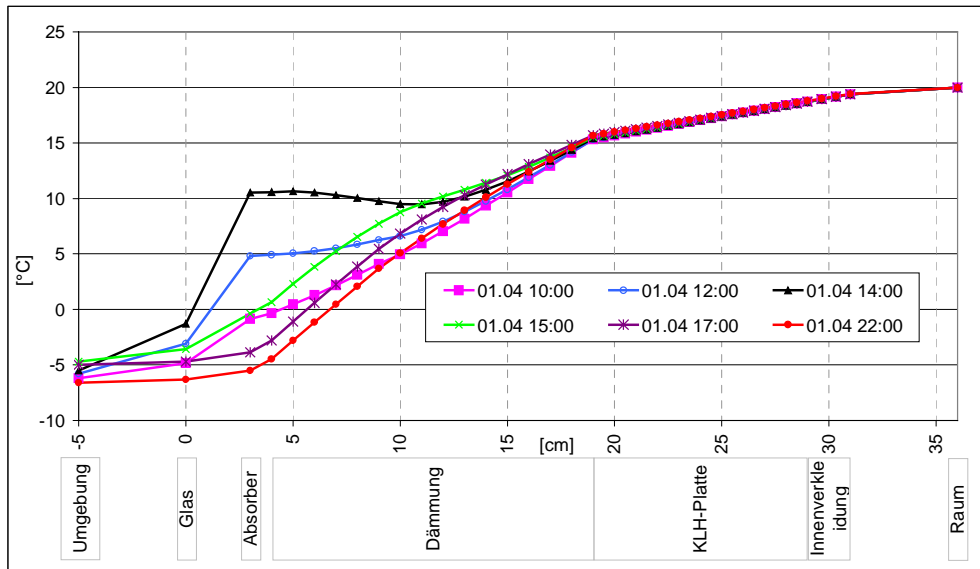


Abbildung 5.19: Temperaturverlauf im Wandaufbau, KLH-Wand, 10+5 cm Dämmung, strahlungsarmer Wintertag

Abbildung 5.20 und Abbildung 5.21 zeigen typische Temperaturverläufe in einer Massivwand und in einer Leichtbauwand mit integriertem Kollektor an einem strahlungsintensiven Tag. Man erkennt, dass der Absorber (hier solarlackbeschichtet) tagsüber maximale Temperaturen bis 60°C erreicht. Dadurch werden sehr niedrige effektive U-Werte erreicht und die Transmissionswärmeverlust signifikant verringert (siehe Tabelle 5.9).

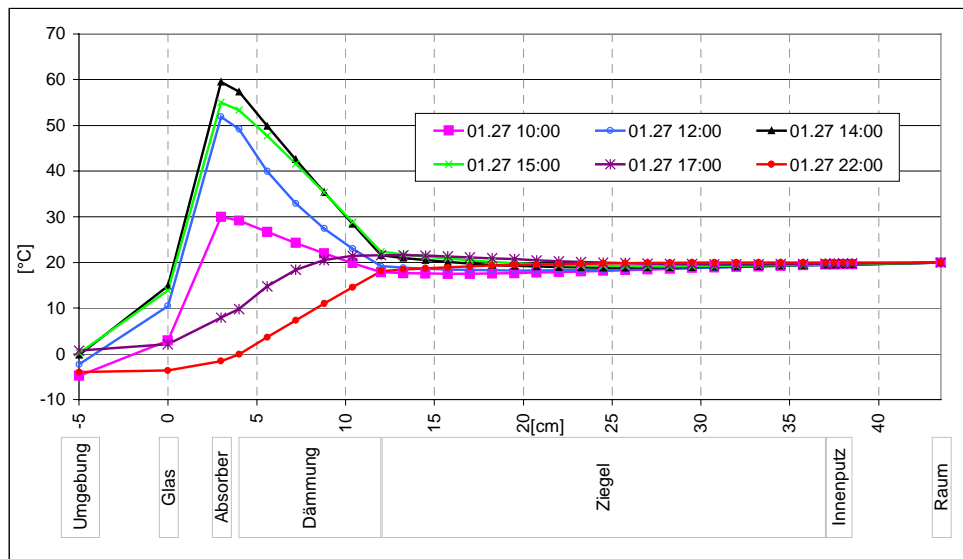


Abbildung 5.20: Temperaturverlauf im Wandaufbau, Ziegel 25, 8 cm Dämmung, strahlungsintensiver Wintertag

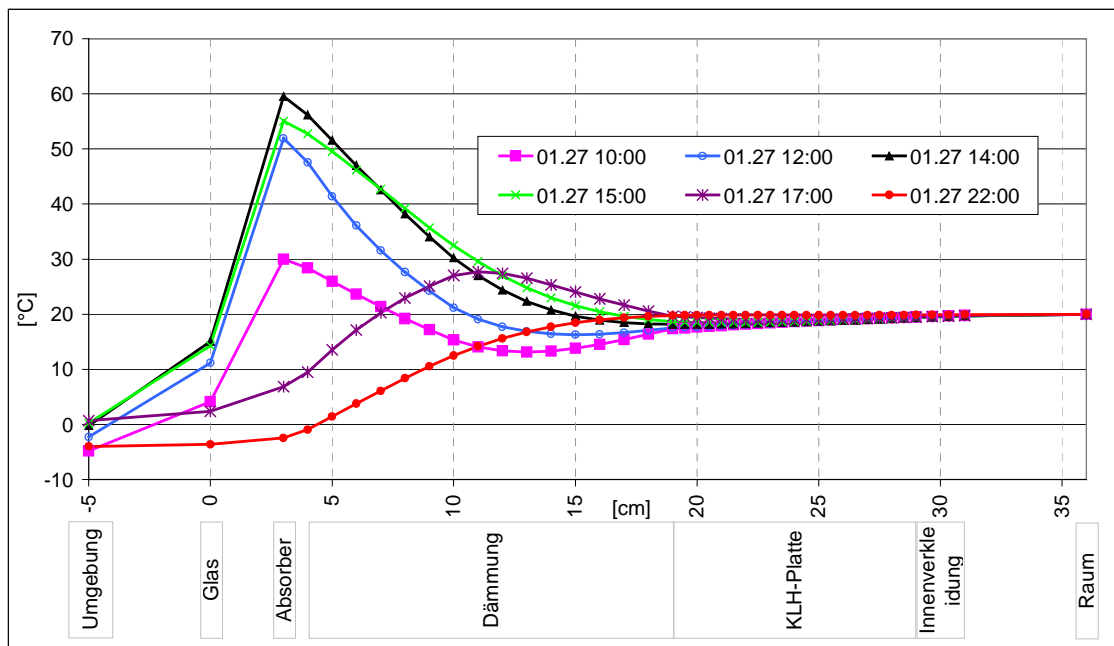


Abbildung 5.21: Temperaturverlauf im Wandaufbau, KLH, 10+5 cm Dämmung, strahlungsintensiver Wintertag

5.1.4.2 Negative effektive U-Werte

Der effektive U-Wert wurde in der bisherigen Darstellung als Mittelwert von 24 Stunden angegeben, um die Ergebnisse der Berechnungen vergleichen zu können. Tatsächlich kann er aber für jeden Zeitpunkt angegeben werden, da er sich ständig mit den sich ändernden Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Gebäudeinnentemperaturen verändert.

Für einen strahlungsreichen Wintertag liegt der mittlere effektive U-Wert des Wandaufbaus Ziegel 25 mit Kollektor (Solarlack) bei einer Dämmstärke von 8 cm bei $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Kurve „Wärmestrom Raum“ in Abbildung 5.22 gibt die Watt je Quadratmeter an, die von der Wand abgegeben werden. Negative Werte bedeuten Energiegewinn für den Raum, positive Werte bedeuten einen Energieverlust des Raumes. Der effektive U-Wert schwingt proportional mit dem Wärmestrom mit. Die Innentemperaturen werden bei 20°C konstant gehalten, die Außentemperaturen schwanken im betrachteten Fall zwischen $-6,5^\circ\text{C}$ in der Nacht und $+0,7^\circ\text{C}$ am Tag.

Die Wärme, welche die Wand während des Tages „von der Abwärme“ des Kollektors gespeichert hat, wird in der Nacht abgegeben. Kurzzeitig wird der Wärmestrom während der Nacht negativ, das bedeutet einen Wärmestrom in den Raum. Der effektive U-Wert wird ebenfalls kurzzeitig negativ.

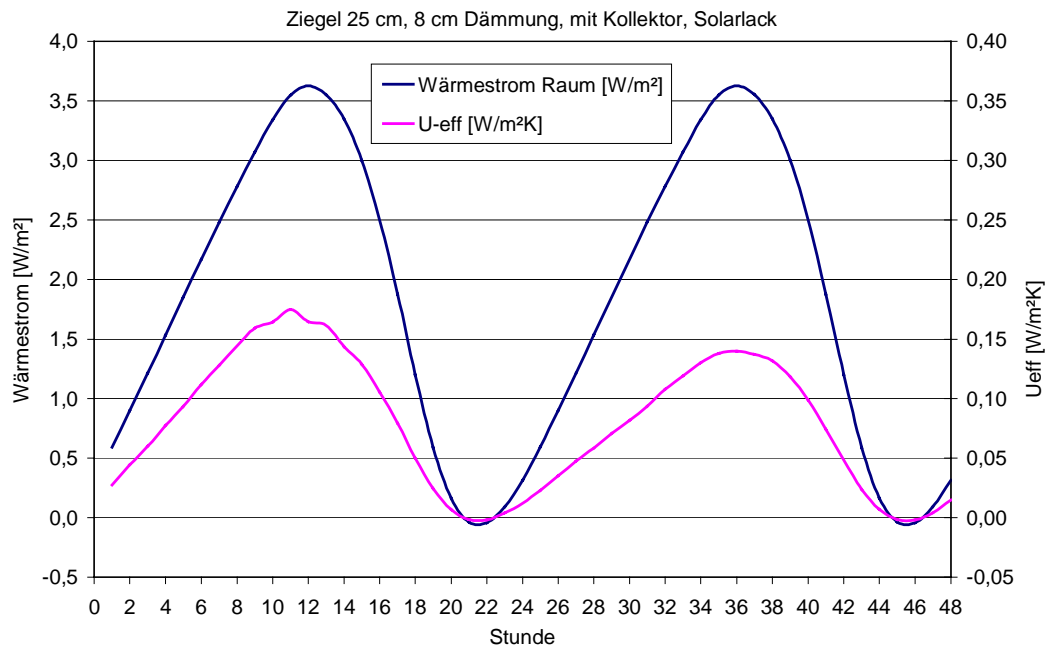


Abbildung 5.22: Verlauf des effektiven U-Werts im Wandaufbau „Ziegel 25“ mit 8 cm Dämmung und Kollektor (Solarlack) während 48 Stunden, strahlungsintensiver Tag, Winter

Die Verringerung der Transmissionswärmeverluste bewirkt, dass auch der Heizenergiebedarf des Raumes sinkt, der sich hinter dem Kollektor befindet. Die durch den Kollektor verursachte Reduktion der Transmissionswärmeverluste während der Heizsaison wird im weiteren Verlauf des Projektes ermittelt.

5.1.4.3 Winterfall: Schlussfolgerungen

Das Ziel der Berechnungen des Wärmedurchgangs durch die Wandaufbauten im Winter war, die Auswirkung des fassadenintegrierten Kollektors auf die Transmissionswärmeverluste zu ermitteln. Dies kann durch den effektiven U-Wert (U_{eff}) angegeben werden. Ein niedrigerer effektiver U-Wert bedeutet geringere Transmissionswärmeverluste für das Gebäude. Tabelle 5.9 gibt sämtliche ermittelten effektiven U-Werte für einen strahlungsintensiven und einen strahlungsarmen Wintertag an.

Für die Ermittlung der Dämmstärke der ausgewählten Wandaufbauten mit Kollektor hat der Winterfall keine Relevanz. In jedem Fall findet durch die Direktintegration des Kollektors eine Verbesserung des U-Wertes statt, was die Transmissionswärmeverluste der Wand herabsetzt. Als Kriterium für die Auswahl sind daher die sommerliche Überhitzung und die Wärmeschutzbestimmungen für Gebäude in österreichischen Bundesländern heranzuziehen (siehe Kapitel 5.1.3.4).

Für strahlungsintensive Wintertage wurden je nach Dämmstärke und Absorbentyp effektive U-Werte von 0,02 bis 0,1 W/m²K ermittelt. Zieht man die statischen U-Werte der Vergleichswände ohne Kollektor heran (siehe Kapitel 5.1.3.4), so ergeben sich Verminderungen des effektiven U-Werts zwischen 60% und 90%. Der effektive U-Wert wird als Durchschnitt von 24 Stunden angegeben. Bei Betrachtung des Verlaufs des U-Wert stellt man fest, dass an strahlungsintensiven Tagen im Winter auch negative U-Werte erreicht werden. Diese treten während der Nacht auf, da Wärme, die während des Tages gespeichert wird, in der Nacht an den Raum abgegeben wird (siehe Abbildung 5.22).

Tabelle 5.9: Effektive U-Werte an strahlungsintensiven und strahlungsarmen Wintertagen

Wand	Absorber- beschichtung	Dämmung	U_{stat}	U_{eff} strahlungs- intensiver Tag	U_{eff} strahlungs- armer Tag
		[cm]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Ziegel 38	kein Kollektor	0	0,340	0,284	0,335
	selektiv	5	0,250	0,025	0,182
	selektiv	8	0,210	0,025	0,156
	selektiv	10	0,190	0,024	0,142
	selektiv	12	0,174	0,022	0,130
	Solarlack	5	0,250	0,053	0,215
	Solarlack	8	0,210	0,047	0,181
	Solarlack	10	0,190	0,042	0,164
	Solarlack	12	0,174	0,039	0,150
Ziegel 25	kein Kollektor	8	0,326	0,272	0,316
	selektiv	5	0,419	0,044	0,290
	selektiv	8	0,319	0,043	0,227
	selektiv	10	0,275	0,040	0,196
	selektiv	12	0,242	0,037	0,176
	Solarlack	5	0,419	0,094	0,357
	Solarlack	8	0,319	0,078	0,273
	Solarlack	10	0,275	0,069	0,234
	Solarlack	12	0,242	0,061	0,208
Beton	kein Kollektor	8	0,400	0,335	0,390
	kein Kollektor	10	0,333	0,279	0,325
	selektiv	5	0,521	0,040	0,394
	selektiv	8	0,375	0,040	0,273
	selektiv	10	0,316	0,037	0,235
	selektiv	12	0,273	0,033	0,202
	Solarlack	5	0,521	0,108	0,490
	Solarlack	8	0,375	0,082	0,332
	Solarlack	10	0,316	0,070	0,281
KLH	kein Kollektor	20	0,181	0,152	0,178
	selektiv	18	0,182	0,027	0,135
	selektiv	15	0,211	0,028	0,155
	Solarlack	18	0,182	0,046	0,158
	Solarlack	15	0,211	0,052	0,183
Holzriegel	kein Kollektor	20	0,142	0,110	0,134
	selektiv	18	0,154	0,024	0,114
	selektiv	15	0,174	0,027	0,128
	Solarlack	18	0,154	0,040	0,133
	Solarlack	15	0,174	0,045	0,150

5.1.5 Schlussfolgerung aus den Wärmestromberechnungen

Ziele dieser Berechnungen des Wärmestroms durch ausgewählte Wandaufbauten mit Kollektor waren insbesondere die Identifikation von Überhitzungsproblemen bei starker Einstrahlung und die Definition von Mindestdämmstärken zur Vermeidung von Überhitzung im Sommer. Weiters wurde der Einfluss der Solarerträge auch bei nicht durchströmtem Absorber auf die Transmissionswärmeverluste im Winter untersucht.

Für die Ermittlung der optimalen Dämmstärke eines Wandaufbaus mit fassadenintegriertem Kollektor ist das Verhalten im Sommer im Bezug auf Überhitzung entscheidend. Für den Sommerfall wurde die Wärmeabgabe in W/m^2 der Wände mit und ohne Kollektor an den dahinterliegenden Raum ermittelt. Davon abgeleitet konnte die Temperaturerhöhung im Vergleich zu einem Raum ohne Kollektor ermittelt werden. Als Kriterium zur Ermittlung der Dämmstärken für die Wandaufbauten mit Kollektor wurde festgelegt, dass eine Temperaturerhöhung von 1 K im Vergleich zu einem Raum ohne Kollektor nicht überschritten werden soll. Die Auswahl der Dämmstärke zielt bei diesen Wänden darauf ab, das Kollektorelement in den Wandaufbau versenkbar zu gestalten. Daher wurde bei diesen Wandaufbauten mit Kollektor weniger Dämmstärke ermittelt, als bei den Vergleichswänden ohne Kollektor. Dieses Ersparnis kann vom wirtschaftlichen Standpunkt dem Kollektor gutgeschrieben werden.

Tabelle 5.6 enthält die ausgewählten Dämmstärken für die berechneten Wandaufbauten mit Kollektor. Die Differenzen der Temperaturen in den Räumen mit und ohne Fassadenkollektor davor liegen für die Wandaufbauten mit den ausgewählten Dämmstärken zwischen 0,28 und 0,98 K. Somit sind sie unkritisch in Bezug auf sommerliche Überhitzung!

Vergleichsrechnungen mit einem Simulationsprogramm zur Auslegung von Solaranlagen haben gezeigt, dass Fassadenkollektoren im Sommer üblicherweise nicht in Stagnation gehen, da der Sonneneinstrahlungswinkel zu dieser Jahreszeit zu steil ist. Daher wurde der Stagnationsfall für die Übergangszeit (Sommer/Winter) berechnet, wenn die Einstrahlung in die Vertikale durch den flachen Einfallswinkel der Sonne bereits stark erhöht ist, jedoch noch (fast) keine Heizenergie aus dem Energiespeicher benötigt wird (siehe Tabelle 5.2). Nach zweiwöchigem Stillstand wurde eine Kollektortemperatur von 120°C ermittelt. Für eine 25er Ziegelwand mit 8 cm Dämmung und Kollektor wurde eine Temperaturerhöhung der Luft im Raum mit Kollektor gegenüber dem Raum ohne Kollektor von 1,3 K ermittelt. Da es sich hier um ein „worst case“ – Szenario handelt, kann die Überhitzungsproblematik durch Stagnation bei direkt integrierten Kollektoren als unkritisch angesehen werden.

Für den Winterfall konnte in jedem betrachteten Fall eine Verbesserung des U-Werts gegenüber einem Wandaufbau ohne Kollektor ermittelt werden (siehe Tabelle 5.9). Selbst wenn die Einstrahlung sehr gering ist (nur Diffusstrahlung), verbessert sich der U-Wert im Durchschnitt um ca. 20% für die Wandaufbauten mit den ausgewählten Dämmstärken! Bei starker Einstrahlung wurden mittlere effektive U-Werte abhängig vom Wandaufbau von lediglich 0,06 bis 0,094 $\text{W/m}^2\text{K}$ ermittelt. Zeitweise wird der mittlere effektive U-Wert negativ, wenn in der Nacht die gespeicherte Wärme des Tages an den dahinter liegenden Raum abgegeben wird. Das bedeutet nicht nur eine Herabsetzung der Wärmeverluste des Hauses durch Transmission, sondern sogar einen geringen Energiegewinn!

Durch direkt integrierte Fassadenkollektoren sind keine negativen Auswirkungen auf das Raumklima bzw. den Komfort in den Räumen „hinter“ einem Fassadenkollektor durch eine Überhitzung zu erwarten.

5.2 Wasserdampfdiffusion

5.2.1 Aufgabenstellung

In diesem Kapitel werden die Verhältnisse des Feuchtetransportes auf Basis der Wasserdampfdiffusion innerhalb der verschiedenen Wandaufbauten dargestellt. Im Mittelpunkt des Interesses ist dabei, ob es zu schädlichen Kondensationen im Inneren des Bauteiles kommt. Weiters wurde untersucht, inwieweit es durch den Feuchtigkeitstransport zu einer Kondensation an der Glasabdeckung des Kollektors kommt. Kondensationen im Bereich der Glasabdeckung wirken sich negativ auf den optischen Eindruck der Fassade aus und sollen nach Möglichkeit unterbunden bzw. minimiert werden.

Um die Kondensation an der Glasabdeckung zu minimieren, wurde jeder Aufbau zusätzlich mit einer Dampfsperre im Inneren des Bauteiles berechnet. Durch diese Maßnahme wird der Feuchtigkeitseintrag aus dem Inneren des Wohnraumes in den Luftraum des Kollektors verhindert. Allfällige Kondensationen an der Glasabdeckung sind in diesen Bauteilen durch den Temperaturverlauf und den Luftaustausch des Kollektors mit der Umgebung „Atmung des Kollektors“ verursacht.

Für die Lösung der Aufgabenstellung wurde ein Programm erstellt, welches den Bauteil in 5 mm starke Schichten zerlegt und den Verlauf des Wasserdampfpartialdruckes sowie der Kondensation im Bauteilinneren in Abhängigkeit von der Zeit, auf Basis des Fickschen Gesetzes für die Diffusion, erfasst.

5.2.2 Physikalisches Modell

Wandaufbauten werden im Detail noch diskutiert, es sind grundsätzlich 3 massive Wandaufbauten und 2 Holzbaukonstruktionen in die Betrachtung einbezogen worden.

Innenraumbedingungen gemäß ON B 8110 Teil 2 (VN) „Wärmeschutz im Hochbau - Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz“ vom 1. Dezember 1995. Die Innenraumtemperatur wurde mit 20°C und die relative Luftfeuchte mit 65 % angenommen. Für Außentemperaturen unter 0°C wurde die relative Luftfeuchte des Raumes entsprechend der o.a. geführten Norm gemindert.

Außenlufttemperaturen (Stundenmittelwerte) wurden aus Klimadaten für den Standort Graz entnommen. Die relative Feuchte der Außenluft wurde konstant mit 80% angenommen.

Absorbtemperaturen (Stundenmittelwerte) wurden für eine definierte Anlagenkonfiguration und dem Standort Graz ermittelt (siehe Kapitel 5.1.2). Für die weitere Berechnung wurden die in diesem Programm definierten „mittleren Absorbtemperaturen“ verwendet. Sofern es erforderlich war, wurden zusätzliche Temperaturen durch lineare Interpolation ermittelt.

Für die Berechnung der Wasserdampfdiffusion wurde die Gültigkeit des Fickschen Gesetzes, wonach als Ursache des Wasserdampftransportes (verallgemeinerte Kraft) der Konzentrationsgradient bzw. der Gradient des Wasserdampfpartialdruckes maßgebend ist, vorausgesetzt. Während die Innenraumbedingungen wie oben beschrieben vorausgesetzt wurden, wurde im Luftraum des Kollektors eine Anreicherung der Wasserdampfkonzentration und deren Einfluss auf den Transportvorgang berücksichtigt. Die Glasabdeckung wurde als diffusionsdicht angenommen. Um die „Atmung“ des Kollektors zu berücksichtigen, wurde ein Luftwechsel von 30% des Volumens Absorber zu Glasabdeckung pro Tag angenommen. Dieser Wert ist eine Abschätzung und wird in einer späteren Projektphase überprüft.

Auf Basis der vorgegebenen Stundenmittelwerte wurde die Berechnung für 24 Stunden eines Tages durchgeführt. Sofern es erforderlich war, wurden die Stundenintervalle zusätzlich unterteilt. Die Zwischenwerte der Temperaturen wurden dabei durch lineare Interpolation ermittelt. Innerhalb der einzelnen Zeitintervalle wurde ein stationärer thermischer Zustand angenommen. Für jeden Monat wurden 2 Tage berechnet, sodass damit eine Übersicht über das Verhalten des Bauteils erhalten wurde. Der Bauteil wurde für die Berechnung in Schichten von 5 mm Stärke unterteilt.

5.2.3 Beurteilungskriterien

Durch den Feuchtetransport kann es zu Kondensationen im Wandaufbau kommen. Neben der Kondensation kommt es aber auch zu einer Verdunstung der kondensierten Menge Wasser. Schädlich ist eine Kondensation insbesondere dann, wenn die Kondensatmenge größer als das Verdunstungspotential ist.

Bei der Berechnung des Verdunstungspotentials wurde nur jener Anteil berücksichtigt, der einer Verdunstung in das Rauminnere entspricht. Im Gegensatz zu Wandaufbauten bei denen an der Außenseite der Wand kein Kollektor existiert, kommt es im gegenständlichen Fall bei Sonneneinstrahlung täglich zu einer wesentlichen Erwärmung des Absorbers und damit zu einem Feuchtetransport in das Innere der Räume. Verdunstungen sind daher bei diesem Wandaufbau täglich möglich.

Der Feuchtetransport bewirkt außerdem in Abhängigkeit von der Absorber- und Außenlufttemperatur eine Anreicherung von Wasserdampf im Luftraum zwischen Absorber und Glasabdeckung. Hier kommt es durch den Wasserdampf zu Kondensationen, die vornehmlich aufgrund des Temperaturgradienten im Bereich der Glasplatte auftreten werden. Weiters zu berücksichtigen ist, dass der Temperaturunterschied zwischen Außenluft und Kollektorinnenraum einen Luftaustausch bewirkt (siehe oben).

Als Beurteilungskriterien für die Tauglichkeit der Wandaufbauten wurde

- das Verhältnis Kondensatmenge zu Verdunstungspotential und
- die Kondensatmenge an der Glasabdeckung des Kollektors

herangezogen.

5.2.4 Wandaufbauten

Im folgenden werden die einzelnen Wandaufbauten dargestellt. Der Schichtenaufbau und die bauphysikalischen Parameter der Schichten werden in Tabellen dargestellt. In diesen Tabellen werden jedoch die Schichten nur bis zum Absorber behandelt. Der weitere Aufbau (Absorber, Luftzwischenraum und Glasabdeckung) ist für alle Bauteile identisch. Die Abbildungen der Wandaufbauten sind in Anhang 1 dargestellt.

Tabelle 5.10: Bauphysikalische Parameter des Wandaufbaus „Ziegel 38“

Nr.	Schichte	Abmessung	Wärmeleitfähigkeit	Dampfdiffusionswiderstand μ	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D
		[mm]	[W/(m*K)]	[-]	[m]
1	Innenputz	15	0,700	10	0,15
2	Ziegel	380	0,167	8	3,04
3	Steinwolle	80	0,040	1	0,08
	Summe	475			3,27

Tabelle 5.11: Bauphysikalische Parameter des Wandaufbaus „Ziegel 25“

Nr.	Schichte	Abmessung	Wärmeleitfähigkeit	Dampfdiffusionswiderstand μ	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D
		[mm]	[W/(m*K)]	[-]	[m]
1	Innenputz	15	0,700	10	0,15
2	Ziegel	250	0,378	8	2,00
3	Steinwolle	80	0,040	1	0,08
	Summe	335			2,23

Tabelle 5.12: Bauphysikalische Parameter des Wandaufbaus „Beton“

Nr.	Schichte	Abmessung	Wärmeleitfähigkeit	Dampfdiffusionswiderstand μ	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D
		[mm]	[W/(m*K)]	[-]	[m]
1	Innenputz	15	0,700	10	0,15
2	Stahlbeton	200	2,300	150	30,00
3	Ausgleichspachtelung	10	0,700	20	0,20
4	Steinwolle	80	0,040	1	0,08
	Summe	305			30,43

Tabelle 5.13: Bauphysikalische Parameter des Wandaufbaus „KLH Holzwand“

Nr.	Schichte	Abmessung	Wärmeleitfähigkeit	Dampfdiffusionswiderstand μ	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D
		[mm]	[W/(m*K)]	[-]	[m]
1	Innenverkleidung	20	0,150	50	1,00
2	KLH-Platte	100	0,150	50	5,00
3	Steinwolle	100	0,040	1	0,10
4	Steinwolle	080	0,040	1	0,08
	Summe	300			6,18

Tabelle 5.14: Bauphysikalische Parameter des Wandaufbaus „Holzriegelwand“

Nr.	Schichte	Abmessung	Wärmeleitfähigkeit	Dampfdiffusionswiderstand μ	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D
		[mm]	[W/(m*K)]	[-]	[m]
1	Innenverkleidung	20	0,150	50	1,00
2	Steinwolle	50	0,040	1	0,05
3	Vollschalung, Holz	25	0,150	50	1,25
4	Dampfbremse				*
5	Holzriegel	-	-	-	-
6	Steinwolle	100	0,040	1	0,10
7	Steinwolle	50	0,040	1	0,08
	Summe	300			2,48

*Anm: Der s_D Wert der Dampfbremse wird in weiterer Folge näher erläutert, in Tabelle 5.14 ist daher dieser Wert nicht berücksichtigt.

5.2.5 Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D

Als Maß für die Durchlässigkeit eines Baustoffes für Wasserdampf vergleicht man die Durchlässigkeit einer 1 m dicken Schicht aus diesem Baustoff mit einer gleich dicken Schicht aus Luft (s_D). Der Quotient aus diesen beiden Werten ergibt den Dampfdiffusionswiderstand μ [Lit 10]. Zur besseren Beurteilung der Rechenergebnisse wird die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_D Wert) einiger Stoffe in Tabelle 5.15 angeführt.

Tabelle 5.15: Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_D Wert) ausgewählter Stoffe

Stoff		s_D Wert
Gipskartonplatte	130 [mm]	0,1 [m]
Mineralwolle	200 [mm]	0,2 [m]
Hochlochziegel	250 [mm]	2 [m]
Bitumierte Pappe	2 [mm]	4 [m]
EPS	200 [mm]	20 [m]
Aluminium Folie	ab 125 [g/m ²]	dampfdicht
Schaumglas	-	dampfdicht

Es ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass der s_D Wert kein Qualitätskriterium in dem Sinne ist, dass Produkte mit höherem s_D Wert qualitativ hochwertiger sind. Es ist vielmehr aufgrund der vorliegenden Verhältnisse jenes Produkt auszuwählen, welches den für den spezifischen Anwendungsfall geeignetsten s_D Wert aufweist.

5.2.6 Kondensationsmengen

5.2.6.1 Kondensation im Wandaufbau

Auf Basis der o.a. Wandaufbauten und der dargestellten bauphysikalischen Parameter wurden die Kondensationsmengen und das Verdunstungspotential für den Zeitraum eines Jahres berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.23 dargestellt.

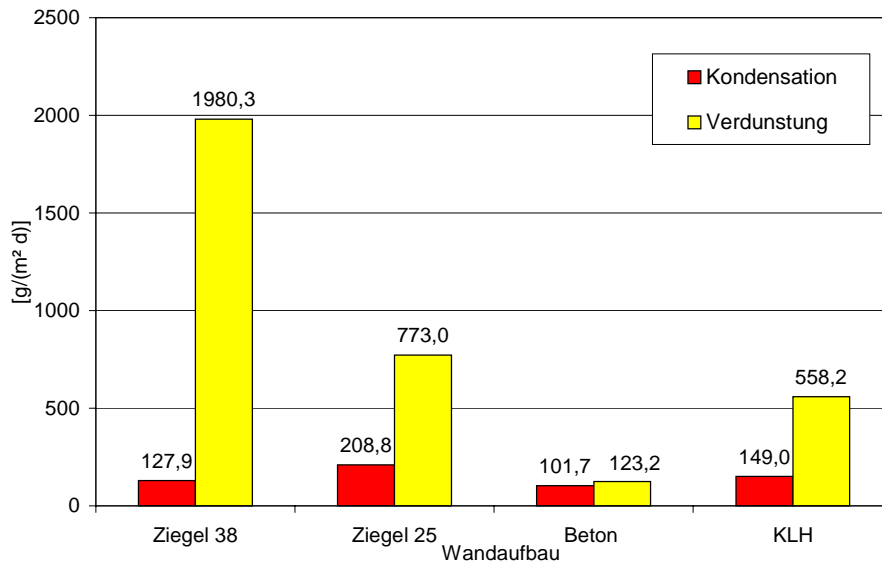


Abbildung 5.23: Kondensat- und Verdunstungspotential für die einzelnen Wandaufbauten [g/(m²*d)]

Die Berechnung ergibt, dass der Bauteil „Holzriegelwand“ eine Dampfbremse mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke (s_D Wert) wesentlich größer als 20 m erfordert, da es sonst zu mehreren Kondensationsebenen kommt und der Bauteil daher nicht geeignet ist. Aus diesem Grund wird dieser Bauteil erst in Kapitel 5.2.7 näher behandelt.

Wie aus Abbildung 5.23 zu ersehen ist, liegt die Kondensationsmenge in allen angeführten Fällen unter den Werten für das Verdunstungspotential. Aus Sicht der Kondensation im Bauteilinneren sind daher alle in dieser Abbildung angeführten Bauteile geeignet.

Das Verdunstungspotential für die Wandaufbauten „Ziegel 25“ und „KLH“ ist 3,7 bzw. 3,9 mal höher als die Kondensationsmenge. Für den Wandaufbau „Ziegel 38“ ist das Verdunstungspotential 15,5 höher als die Kondensation. Lediglich beim Wandaufbau „Beton“ ist die Verdunstung 1,2 mal größer als die Kondensation. Der Grund liegt darin, dass beim Wandaufbau „Beton“ der Betonkörper insgesamt einen relativ hohen s_D Wert von 30 m aufweist und dieser hohe s_D Wert begrenzt das Verdunstungspotential, wodurch es in diesem Fall lediglich 20% über der Kondensationsmenge liegt.

Die Lage der Kondensationszonen hängt vom Bauteil und der betrachteten Temperatur ab. Generell kann jedoch festgestellt werden, dass die Kondensationen im Übergangsbereich massiver Bauteil/Wärmedämmung und in der Wärmedämmung selbst erfolgen. Die Kondensationen reichen generell nur sehr begrenzt in den massiven Bauteil hinein.

5.2.6.2 Kondensationsmengen im Luftraum zwischen Absorber und Glasabdeckung des Kollektors

Die Gründe für Kondensationen im Luftraum zwischen Absorber und Glasabdeckung sind bei der Diskussion der Beurteilungskriterien bereits erwähnt worden. In weiterer Folge wird auf diese Problematik näher eingegangen.

Durch die Temperaturdifferenz und dadurch bedingt durch die Differenz des Wasserdampfpartialdruckes zwischen dem Kollektor und dem Inneren des Gebäudes kommt es insbesondere in den Nachtstunden zu einem Feuchtetransport in Richtung Glasabdeckung des Kollektors. Durch diesen Feuchtetransport ist es möglich, dass die Sättigungskapazität der Luft überschritten wird und sich Kondensat bildet. Die Kondensation wird vornehmlich an der Glasabdeckung und hier in den Ecken erfolgen.

Dieser Feuchtetransport in das Kollektorinnere kann durch die Installation einer Dampfsperre verhindert werden. Dabei ist aber zu beachten, dass es durch die Dampfsperre zu keiner schädlichen Kondensation im Bauteilinneren kommt. Diese Problematik wird im nächsten Abschnitt behandelt.

Ein weiterer Grund für die Kondensation im Luftraum zwischen Absorber und Glasabdeckung liegt darin, dass durch das Atmen des Kollektors Außenluft in das Innere des Kollektors angesaugt wird (Annahme: Luftwechsel von 30% des Volumens Absorber zu Glasabdeckung pro Tag). Weist diese Außenluft eine hohe relative Luftfeuchte auf, wie es etwa im Zuge eines Niederschlages der Fall sein kann, so ergeben sich in der darauf folgenden weiteren nächtlichen Abkühlung Kondensationen. Diese Kondensationen sind vom Wandaufbau unabhängig und stellen ein allgemeines Problem von thermischen Kollektoren dar.

Liegen geringe Einstrahlungen vor, so kommt es zu keiner wesentlichen Temperaturerhöhung im Kollektor und dadurch zu einem Feuchtetransport in Richtung Glasabdeckung. Dauert diese Wetterperiode mehrere Tage, Nebelperioden von 2 bis 3 Wochen sind im Winter insbesondere in Beckenlagen durchaus üblich, so kommt es in dieser Zeit zu einer kontinuierlichen Anreicherung von Kondensat im Luftraum des Kollektors. Dies kann dazu führen, dass es in dieser Periode zu Kondensationen an der Glasabdeckung des Kollektors kommt, was wiederum zu einer optischen Beeinflussung der Fassade führt.

Es wurde aus den Klimadaten Graz ein Tag mit diesen charakteristischen Verhältnissen einer geringen Einstrahlung ausgewählt (2. Dezember). In Abbildung 5.25 wird der tägliche Eintrag an Feuchtigkeit in Abhängigkeit vom Wandaufbau dargestellt.

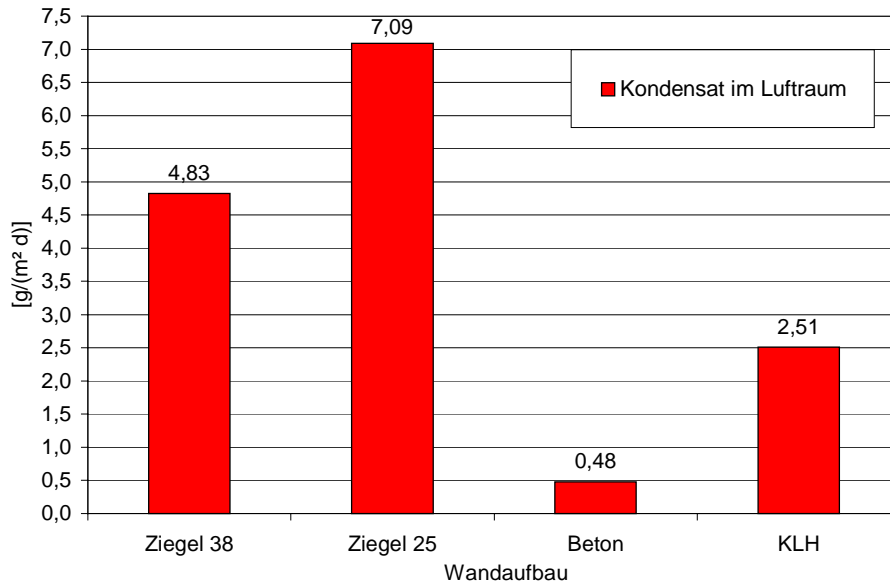


Abbildung 5.24: Täglicher Eintrag an Feuchte in den Luftraum Absorber und Glasabdeckung Kollektor für einen strahlungsarmen Tag im Dezember [g/(m²*d)]

Wie aus der Abbildung 5.24 ersichtlich ist, erreicht der tägliche Eintrag an Feuchte bei jenen Konstruktionen, die einen relativ geringen s_D Wert aufweisen, sehr große Werte. Der Wandaufbau „Beton“ weist dem entsprechend den geringsten Wert an Kondensat auf. Geht man von einer Schlechtwetterperiode von 3 Wochen aus, so sammeln sich im Luftraum des Kollektors bei allen betrachteten Wandaufbauten größere Mengen an Kondensat.

In weiterer Folge wird in der Tabelle 5.16 für jede Jahreszeit exemplarisch für je einen Tag angegeben, ab welchem Zeitpunkt die relative Feuchtigkeit im Luftraum des Kollektors unter der Sättigungsgrenze liegt. An den beiden berechneten Sommertagen lag die Feuchte im Kollektor immer unter der Sättigungsgrenze.

Tabelle 5.16: Zeitpunkt, ab welchem kein Kondensat mehr an der Glasabdeckung sichtbar ist (relative Feuchtigkeit liegt im Luftraum des Kollektor unter der Sättigungsgrenze)

Jahreszeit (Tag)	Einstrahlung	Ziegel 38	Ziegel 25	Beton	KLH Wand
		s_D : 3,27 [m]	s_D : 2,23 [m]	s_D : 30,43 [m]	s_D : 6,18 [m]
Winter (1.1)	strahlungsarm	11:15	11:15	09:30	10:15
Winter (15.1.)	strahlungsintensiv	10:30	11:00	09:00	09:30
Frühling (15.4.)	strahlungsarm	12:30	13:30	09:00	11:00
Frühling (1.4.)	strahlungsintensiv	08:30	08:30	07:00	08:00
Sommer (11.7.)	strahlungsarm	-	-	-	-
Sommer (15.7.)	strahlungsintensiv	-	-	-	-
Herbst (15.10.)	strahlungsarm	09:30	10:00	08:15	08:30
Herbst (1.10.)	strahlungsintensiv	08:00	08:00	07:00	07:30

Wie aus Tabelle 5.16 zu erkennen ist, hängt dieser Zeitpunkt vom s_D Wert des Wandaufbaues ab. Je höher der s_D Wert der Konstruktion ist, desto früher kommt es im Luftraum zu einer Unterschreitung der Sättigungskonzentration.

5.2.7 Wandaufbauten mit Dampfsperre

Die bisherigen Diskussionen haben ergeben, dass es insbesondere aus der Sicht der Kondensation im Bauteilinneren möglich ist, Fassadenkollektoren ohne Hinterlüftung zu installieren.

Bei Schlechtwetterperioden, also Perioden mit geringer Einstrahlung, könnte sich jedoch eine Ansammlung des Kondensats im Kollektor ergeben. Diese Ansammlung kann jedoch reduziert werden, wenn im Bauteilinneren eine Dampfsperre montiert wird, die eine Wasserdampfdiffusion in den Kollektor vermindert. Rechnerisch wird von einem s_D Wert der Dampfsperre von 10.000 m (z.B. Metallplatte, Schaumglas, Alufolie ab 125 g/m²) ausgegangen, um den Extremfall einer absolut dichten Dampfsperre zu simulieren.

Die Dampfsperre ist beim Ziegelmauerwerk zwischen Ziegel (Schicht Nr.2) und Wärmedämmung (Schicht Nr.3), bei der Betonwand zwischen Ausgleichspachtelung (Schicht Nr.3) und Wärmedämmung (Schicht Nr.4), bei der KLH Wand zwischen der KLH-Platte (Schicht Nr.2) und der Wärmedämmung (Schicht Nr.3) und bei der Holzriegelwand nach der Vollschalung Holz als Schicht Nr. 4 angeordnet (siehe Anhang 1).

In Abbildung 5.25 wird die Kondensatmenge und das Verdunstungspotential für alle Wandaufbauten dargestellt.

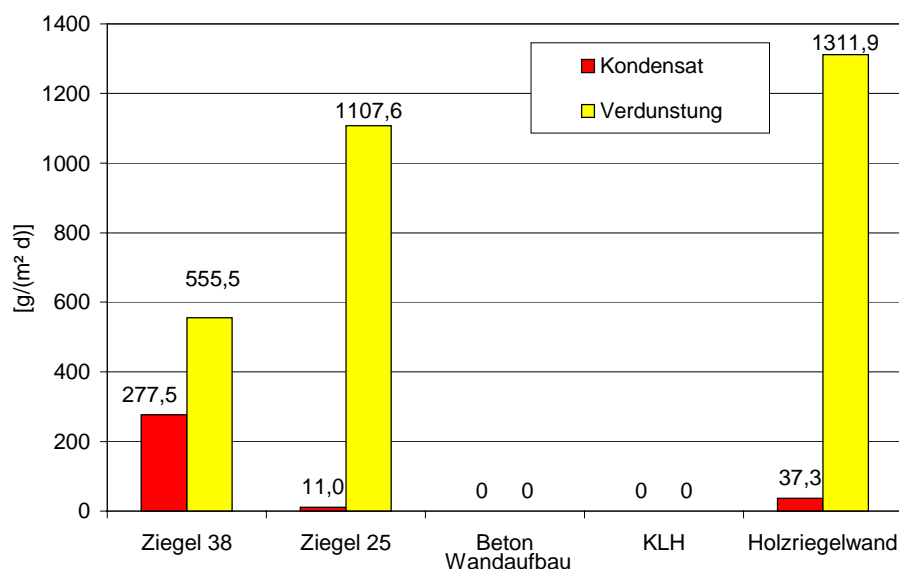


Abbildung 5.25: Kondensatmenge und Verdunstungspotential [g/(m²*d)] im Wandaufbau für alle Wandaufbauten mit Dampfbremse, dampfdicht

Wie aus der Abbildung 5.25 ersichtlich ist, wird durch die Anordnung einer absolut dichten Dampfsperre erreicht, dass bei allen Bauteilen das Verdunstungspotential größer als die Kondensationsmenge ist. Dies ist für die Wandaufbauten Ziegel 38, Ziegel 25, Beton und

KLH auch ohne Dampfsperre erreicht, wie in Kapitel 5.2.6.1 gezeigt wurde. Für den Wandaufbau „Holzriegelwand“ ist auf jeden Fall eine Dampfbremse vorzusehen. Die Berechnungen zeigten, dass eine Dampfbremse mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von mehr als 20 m erforderlich ist (siehe Kapitel 5.2.6.1).

5.2.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden 5 Wandaufbauten hinsichtlich ihrer Eignung bezüglich des Einsatzes von nicht hinterlüfteten Fassadenkollektoren untersucht. Die Berechnungen für den Standort Graz ergaben, dass es unter Zugrundelegung der o.a. Aufbauten im Betriebsfall zu keinen schädlichen Kondensationen kommt. Bei dem Wandaufbau Holzriegelwand ist eine Dampfbremse mit einem s_D Wert von mindestens 20 m vorzusehen, da es aufgrund der Schichtanordnung zu mehreren Kondensationszonen kommt.

Die weitere Betrachtung zeigte, dass der Feuchteeintrag in den Kollektor zu Kondensationen insbesondere an der Glasabdeckung des Kollektor und damit zu einer optischen Beeinträchtigung der Fassade führt. Diese Kondensationen können in strahlungsarmen Schlechtwetterperioden (z.B. Nebel während mehrerer Wochen) im Kollektor kumulieren.

In einer weiteren Betrachtung wurde jeder Wandaufbau mit einer Dampfsperre versehen. Mit dieser Maßnahme soll verhindert werden, dass Feuchtigkeit aus dem Gebäudeinneren in den Luftraum zwischen Absorber und Glasabdeckung gelangt. Die Berechnung zeigt, dass mit dieser Maßnahme auch keine schädlichen Kondensationen im Inneren des Wandaufbaues erfolgen.

Die hier angeführten Ergebnisse zur Wasserdampfdiffusion in Wandaufbauten mit integrierten Sonnenkollektoren stellen den vorläufigen Stand der Untersuchungen dar und werden in weiterer Folge auf ihre Richtigkeit geprüft und gegebenenfalls ergänzt. Die angenommenen Randbedingungen werden in einer nächsten Projektphase überprüft.

6 Solartechnische und systemtechnische Aspekte

6.1 Betriebsarten von Solaranlagen

[Lit 7]

6.1.1 Low Flow und High Flow Anlagen

„Konventionell“ betriebene Solaranlagen werden mit spezifischen Kollektormassenströmen von 35 – 70 kg/m²h betrieben (High Flow Anlagen). Die Temperaturdifferenz zwischen Kollektorvorlauf und Kollektorrücklauf liegt dabei unter 15 K. Die Speichertemperatur wird, gleichmäßige Einstrahlung vorausgesetzt, bei jedem Kollektordurchlauf etwas erhöht. Das erwünschte Temperaturniveau wird relativ langsam erreicht.

Durch die Kollektoren von Low Flow Anlagen fließen wesentlich geringere spezifische Kollektormassenströme von etwa 8 – 18 kg/m²h. Dadurch wird ein deutlich größerer Temperatursprung zwischen Kollektorvorlauf und Kollektorrücklauf erreicht. Das mit diesem geringeren Durchfluss erreichte Temperaturniveau soll sofort Nutztemperatur haben und für den Verbraucher unmittelbar zur Verfügung stehen. Um diese rasche Verfügbarkeit der Energie zu erhalten, ist es notwendig, in Low Flow Anlagen die Speicher temperaturorientiert zu beladen.

Folgende Vorteile können durch Low Flow bei entsprechender Hydraulik und richtig dimensionierten Anlagenkomponenten erwartet werden:

1. Bei Low Flow Anlagen ergibt sich aufgrund der vergleichsweise geringeren Volumenströme ein geringerer Verrohrungsaufwand und damit niedrigere Kosten.
2. Die thermischen Rohrleitungsverluste fallen durch die Verwendung dünnerer Rohre mit spezifisch kleinerer Oberfläche geringer aus.
3. Eine Einsparung ergibt sich auch durch kleinere elektrische Pumpleistungen.
4. Die Systemtechnik, kann durch die Verwendung von selbstregelnden, temperaturorientierten Speicherladesystemen, sehr einfach gehalten werden.
5. Durch das dynamische Verhalten von richtig dimensionierten Low Flow Anlagen verringert sich der Nachheizbedarf.

Häufig werden Low Flow Systemen im Vergleich zu High Flow Systemen höhere Kollektormitteltemperaturen und somit geringere Kollektorwirkungsgrade berechtigt nachgesagt. Betrachtet man eine überdimensionierte Low Flow Anlage, bei der die aus dem Speicher entnommene Wärmemenge im täglichen Durchschnitt kleiner als der Gesamtdurchsatz durch den Kollektor ist, kann dessen Rücklauftemperatur nicht niedrig genug gehalten werden, der Kollektorwirkungsgrad sinkt und liegt unter dem einer vergleichbaren High Flow Anlage. Ebenso tritt eine Kollektorwirkungsgradminderung bei reinen, Low Flow betriebenen Vorwärmanlagen (geringer solarer Deckungsgrad, hoher spezifischer Kollektorsertrag) auf. Der Kollektorrücklauf der vergleichbaren High Flow Anlage erhält durch ständige Entnahmen aus dem Speicher immer kaltes Medium, erreicht dadurch aufgrund der geringeren Temperaturhöhe kleinere Kollektormitteltemperaturen und somit einen höheren Kollektorwirkungsgrad als eine Low Flow Anlage.

Diese Beispiele zeigen deutlich, dass Ertragsvorteile von Low Flow Systemen durch besseres Speichermanagement und geringere Rohrleitungsverluste durch einen durchschnittlich geringeren Kollektorwirkungsgrad, hervorgerufen durch falsche Dimensionierung und Hydraulik, sogar zu Ertragsnachteilen führen kann.

M. Mack und C. Fünfgeld [Lit 14] formulieren zum Vergleich des Kollektorwirkungsgrades für stationäre Zustände einen recht übersichtlichen Ansatz, der in Abbildung 6.1 dargestellt wird.

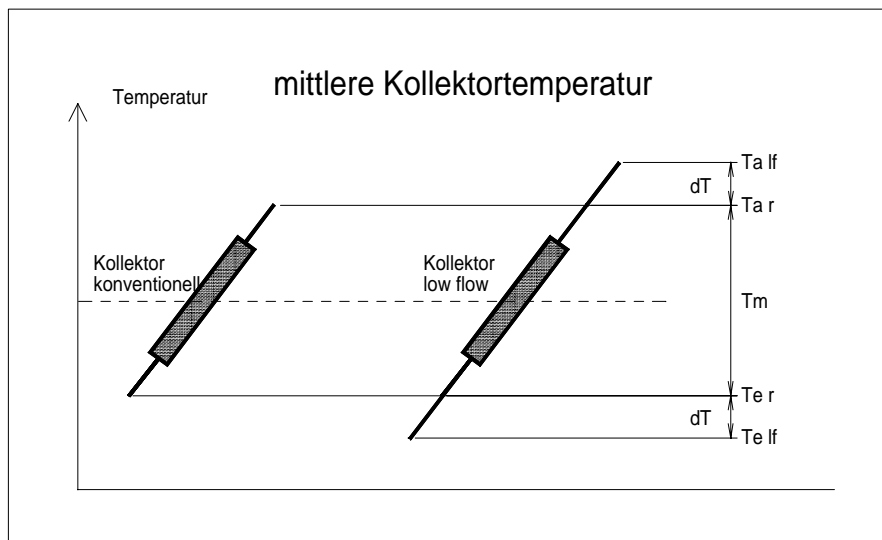


Abbildung 6.1: Darstellung der mittleren Kollektortemperatur

$$dT = \frac{T_{a,r} - T_{e,r}}{2} \cdot \left| \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_f} - 1 \right| = \frac{1}{2} \cdot \frac{\xi_r}{\dot{m}_r \cdot c_p} \cdot \left(\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_f} - 1 \right)$$

Gleichung 6.1

darin bedeuten:

dT	erforderlicher Temperatursprung für vergleichbare mittlere Kollektortemperatur
$T_{a,r}$	Austrittstemperatur des Referenzkollektors (konventionell betrieben)
$T_{e,r}$	Eintrittstemperatur des Referenzkollektors (konventionell betrieben)
$T_{a,if}$	Austrittstemperatur des im Low Flow betriebenen Kollektors
$T_{e,if}$	Eintrittstemperatur des im Low Flow betriebenen Kollektors
T_m	mittlere Kollektortemperatur
$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_f}$	Verhältnis der jeweiligen Massenflüsse
$\frac{\xi_r}{\dot{m}_r \cdot c_p}$	Verhältnis Leistung zu Wasserwert des Referenzkollektors

dT ist die Temperaturdifferenz, um die der Rücklauf des Low Flow Kollektors tiefer liegen muss als die des konventionellen Kollektors, damit die mittlere Kollektortemperatur, also auch der Wirkungsgrad des Kollektors, vergleichbar hoch ist. Wenn man davon ausgeht, dass die Speicher am Morgen unter gleichen Ausgangsbedingungen betrachtet werden, ist der Low Flow Kollektor im Wirkungsgradnachteil bis der High Flow Kollektor die mittlere

Speichertemperatur um dT angehoben hat. Ab diesem Zeitpunkt ist der Low Flow Kollektor im Vorteil, bis der Speicher voll durchgeladen ist.

Unter den Vorteilen von Low Flow kann die Möglichkeit der Senkung der Installationskosten durch den geringen Verrohrungsaufwand und der reduzierten Pumpleistung bei Anlagengrößen durchschnittlicher Raumheizungsanlagen als wesentlichster Vorteil gegenüber High Flow gesehen werden.

6.1.2 Matched Flow

Sogenannte Matched Flow Systeme kombinieren die Vorteile von High Flow und Low Flow Systemen. Dabei wird der Massenstrom über eine Drehzahlregelung entsprechend Strahlungsangebot, Energieinhalt des Speichers und Verbrauchsanforderungen definiert. Um den günstigsten Betriebszustand zu definieren, spielt bei einigen am Markt angebotenen Systemen der erreichte Kollektorwirkungsgrad als Regelgröße eine wichtige Rolle. Durch solche, meist aufwendige Regelungen ist man in der Lage, ein nahezu optimales Speichermanagement unter ständiger Berücksichtigung des Kollektorwirkungsgrades zu betreiben, d.h. mit Low Flow auf Temperatur, mit High Flow auf Energie.

Tabelle 6.1 zeigt die Überlagerung von Matched Flow mit den üblichen High Flow und Low Flow Massenströmen.

Tabelle 6.1: Spezifische Massenströme für High-, Low- und Matched Flow Systeme

Bezeichnung	spez. Massenstrom
High Flow	35 - 70 kg/m ² h
Matched Flow	8 - 70 kg/m ² h
Low Flow	8 - 18 kg/m ² h

6.2 Hydraulische Verschaltung von Kollektorfeldern

[Lit 7]

Die hydraulische Verschaltung eines Kollektorfeldes unterliegt, egal ob Low Flow oder High Flow - nicht nur dem Gesichtspunkt eines möglichst guten Wärmeüberganges zwischen Absorber und Wärmeträger, sondern auch den entstehenden Druckverlusten.

Da die Wärmeübergangszahl, für welche die Nußeltzahl maßgebend ist, im laminaren Strömungszustand um etwa eine Größenordnung kleiner ist als im turbulenten, sollte bei der Erstellung des Verrohrungs- und Durchströmungsplanes ein möglichst häufig turbulenter Strömungszustand über den Betriebsbereich des Kollektors angestrebt werden. Der Strömungszustand, ausgedrückt durch die Reynoldszahl, wird als Verhältnis von Trägheitskräften des Mediums zu Zähigkeitskräften desselben wie folgt definiert:

$$Re = \frac{c \cdot L}{\nu}$$

Gleichung 6.2

Re	Reynoldszahl (laminare Strömung $Re < 2320 < Re$ turbulente Strömung)	
c	Strömungsgeschwindigkeit im Kanal	[m/s]
L	Charakteristische Länge In Strömungskanälen wird die charakteristische Länge vom hydraulischen	[m]

Durchmesser dargestellt. Dieser ist bei kreisrunden Kanälen der Innendurchmesser, bei nicht kreisrunden Kanälen ein Verhältnis aus Kanalquerschnitt zum Kanalumfang und kann wie folgt ermittelt werden:

$d_h = \frac{4 \cdot A}{U}$	Hydraulischer Durchmesser bei nicht kreisrunden Strömungskanälen	[m]
A	Querschnitt des durchströmten Kanals	[m ²]
U	Umfang des durchströmten Kanals	[m]
$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	Kinematische Zähigkeit	[m ² /s]
η	Dynamische Zähigkeit	[kg/ms]
ρ	Dichte des Mediums	[kg/m ³]

Aufgrund der im turbulenten Strömungszustand auftretenden Querbewegungen der Mediumsteilchen ist der Druckverlust höher als im laminaren Strömungszustand. Zusätzlich ist die Zähigkeit stark temperaturabhängig und wird bei Flüssigkeiten, im Gegensatz zu Gasen, bei steigender Temperatur kleiner. Dadurch kann im allgemeinen ein turbulenter Strömungszustand bei tiefen Kollektortemperaturen nur in Verbindung mit sehr großen Druckverlusten erreicht werden.

Nachfolgend werden für ein dachintegriertes Kollektorfeld mit ca. 40 m² Bruttokollektorfläche in Abbildung 6.2 und Abbildung 6.4, eine High- bzw. eine Low Flow Hydraulikvariante, und damit die wesentlichen hydraulischen Unterschiede, gezeigt. Um die Arbeiten auf der Baustelle zu vereinfachen und die Montagezeiten gering zu halten, werden vielfach von den Anbietern vorgefertigte Absorberelemente in fixen Abmessungen angeboten. Durch die Verwendung solcher Bausätze können die Kollektorkosten reduziert werden.

Durch die verwendeten Absorberelemente ergibt sich in diesem Beispiel eine Nettoabsorberfläche von 37,03 m². Das Abdeckscheibenformat wurde hier mit 2x1 m festgelegt. Mit dem Simulationsprogramm zur Optimierung von Solarsystemen, Kollektor/Speicher/Rohrnetz, (Hausner, 1994) wurde für beide Verschaltungen der Kollektorwirkungsgradverlauf über der mittleren Fluidtemperatur ermittelt. Um die Ergebnisse der beiden Verschaltungsvarianten trotz der unterschiedlichen Hydrauliksituationen miteinander vergleichen zu können, wurden gleiche mittlere Kollektortemperaturen angestrebt.

Folgende Parameter wurden der Simulation zugrunde gelegt:

- Kollektortestergebnis des zugrundegelegten, konventionellen Flachkollektors mit selektiven Absorbern, Finnenbreite 143 mm, Rohrinnendurchmesser 8,25 mm

$$c_0 = 0,739$$

$$c_1 = 3,45 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$c_2 = 0,0115 \quad [\text{W/m}^2\text{K}^2]$$

Die Kollektorprüfung erfolgte bei sehr niedrigen Reynoldszahlen, also im laminaren Strömungszustand.

- Idente Einbausituation und identes Absorberelement für die beiden neu definierten Kollektorverschaltungen wie beim Prüfkollektor
- Eine Umgebungstemperatur von 20°C
- Eine Einstrahlung von 800 W/m²

- Eine spezifische Durchflussmenge von 15 kg/m²h für Low Flow und 55 kg/m²h für High Flow
- 35% Ethylenglykol im Wärmeträger

6.2.1 High Flow Kollektorverschaltung

Kennzeichnend für eine High Flow Verschaltung sind angepasst an die Absorbergeometrie, eine geringe thermische Länge (gesamtdurchströmte serielle Länge einer Absorberbahn) sowie eine große Anzahl paralleler Stränge. Daraus resultiert in Kombination mit den für High Flow üblichen hohen Massenströmen ein geringer Temperaturhub innerhalb eines Kollektordurchlaufs.

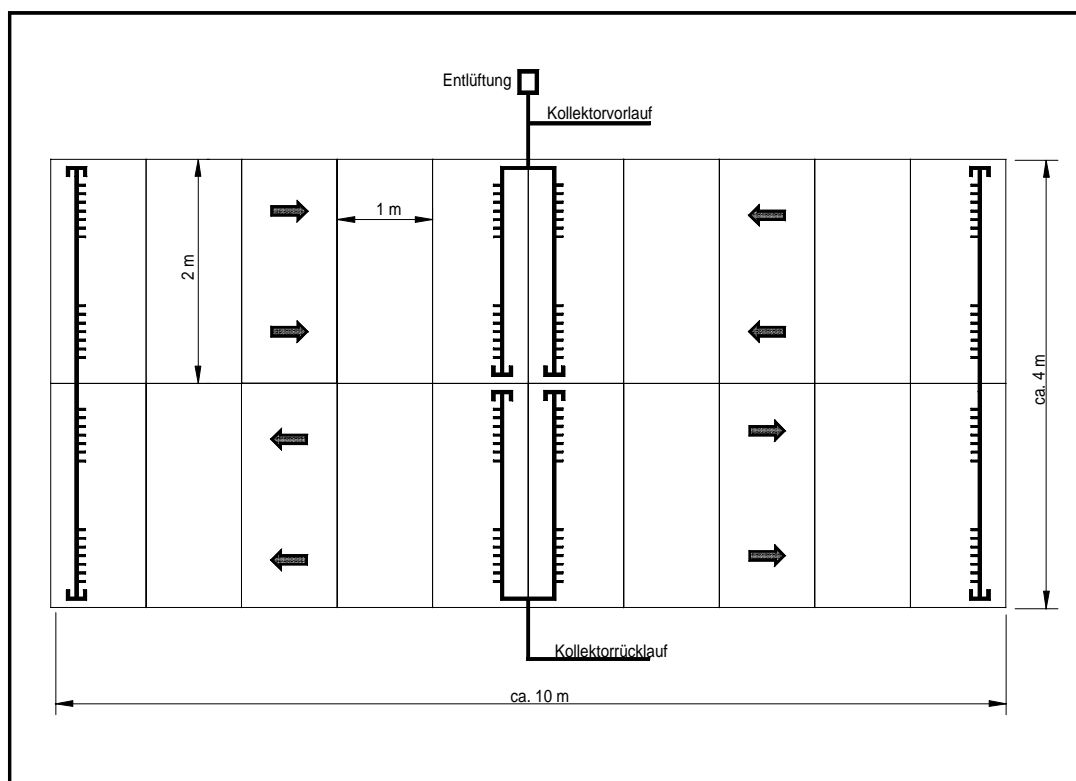


Abbildung 6.2: Beispiel einer typischen High Flow Verschaltung mit marktüblichen Absorbern

Abbildung 6.3 zeigt die Wirkungsgradkennlinie des Prüfkollektors (tiefer liegende Kennlinie) und die durch Zugrundlegung der Messergebnisse errechnete Kollektorwirkungsgradlinie speziell für obige Verschaltung. Deutlich zu erkennen ist die theoretische Wirkungsgradsteigerung für die neu definierte Kollektorverschaltung infolge des Umschlags zwischen laminarer und turbulenter Strömung bei ca. 51°C.

Die Nachrechnung des Prüfkollektors dieses Beispiels zeigte, dass während des Prüfvorganges über den gesamten Temperaturbereich ausschließlich laminarer Strömungszustand vorherrschte. Auch eine Vielzahl anderer marktüblicher Kollektoren werden mit strömungstechnisch nicht optimierten Verschaltungen betrieben und somit der turbulente Strömungszustand nicht erreicht. Durch Optimierung der hydraulischen Verschaltung und Anpassung des Massenstromes an diese, ergibt sich im Vergleich zum Prüfkollektor eine günstigere Kollektorwirkungsgradkennlinie.

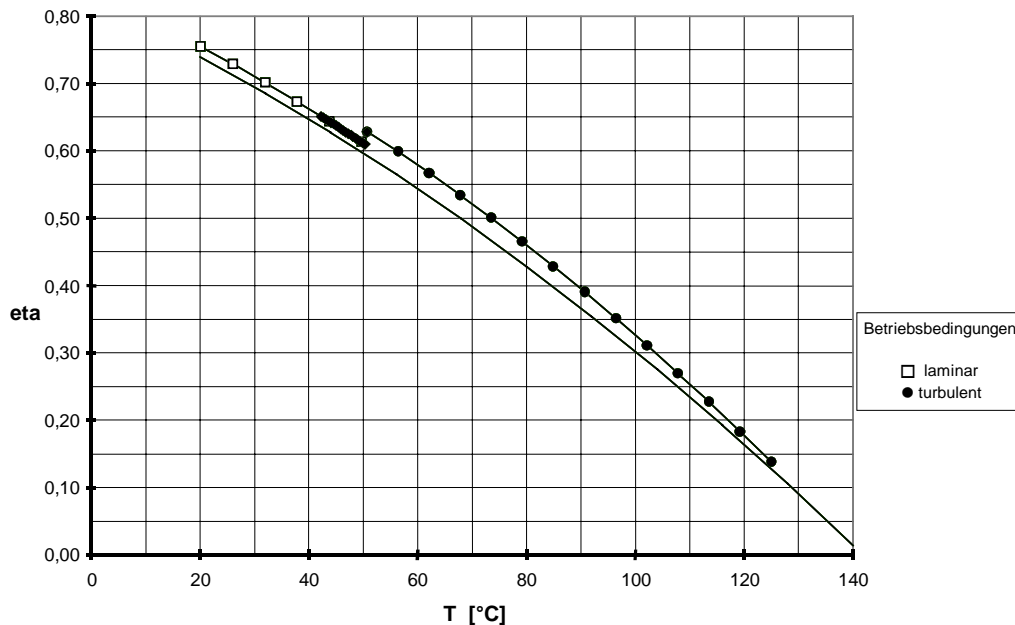


Abbildung 6.3: Wirkungsgradverlauf des im High Flow betriebenen Kollektorfeldes über der mittleren Fluidtemperatur (800 W/m^2 , 20°C Umgebungstemperatur) im Vergleich zur gemessenen Kennlinie des Prüfkollektors (tiefer liegende Kennlinie).

Die Anhäufung der fetten Quadrate stellt die gerechneten Punkte für einen Kollektordurchgang bei 42°C Kollektoreintritts- und 51°C Austrittstemperatur dar. Die sich daraus ergebende Temperaturdifferenz von 9 K , bei einer Einstrahlung von 800 W/m^2 ist typisch für einen High Flow Betrieb mit zugrunde gelegter thermischen Absorberlänge von $9,6 \text{ m}$ und der gegebenen Absorbergeometrie. Die mittlere Kollektortemperatur beträgt damit $46,5 \text{ K}$.

Der Druckverlust über das gesamte Kollektorfeld, einschließlich des Druckverlustes verursacht durch Sammler, Zu- und Ableitungen sowie Verbindungsleitungen zwischen den Elementen, beträgt bei beschriebener Temperatursituation und einem Gesamtmassenstrom von 2037 kg/h 6000 Pa (entspricht $0,6 \text{ mWS}$).

6.2.2 Low Flow Kollektorverschaltung

Mit der Bezeichnung Low Flow geht oft der Irrtum einher, den konventionell verschalteten Kollektor einfach mit einer kleineren Durchflussrate als üblich betreiben zu können, um hohe Kollektoraustrittstemperaturen zu erreichen. Vielfach werden die strömungstechnischen Verhältnisse im Kollektor außer acht gelassen, was bei üblichen Absorbersystemen zu unnötigen Ertragsminderungen von Solaranlagen führt. Kennzeichnend für eine Low Flow Verschaltung sind, angepasst an die Absorbergeometrie, eine vergleichsweise große thermische Länge sowie eine geringere Anzahl paralleler Stränge. Daraus resultiert in Kombination mit den für Low Flow üblichen niedrigen Massenströmen ein großer Temperaturhub innerhalb eines Kollektordurchlaufs.

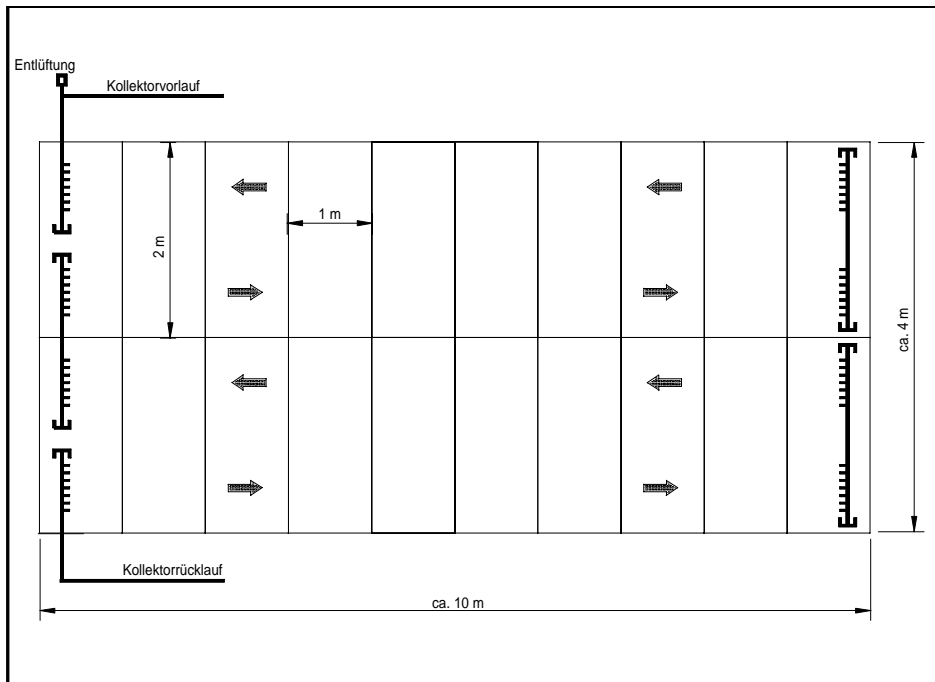


Abbildung 6.4: Beispiel einer typischen Low Flow Verschaltung mit marktüblichem Streifen-system

Abbildung 6.5 zeigt wiederum die Wirkungsgradkennlinie des Prüfkollektors (tiefer liegende Kennlinie) und die durch Zugrundlegung der Messergebnisse errechnete Kollektorwirkungsgradlinie speziell für obige Low Flow Verschaltung. Durch Anpassung der hydraulischen Verschaltung an die Betriebsart Low Flow ergibt sich wie vorhin bei High Flow gegenüber dem Prüfkollektor eine günstigere Kollektorkennlinie für die neu definierte Kollektorschaltung.

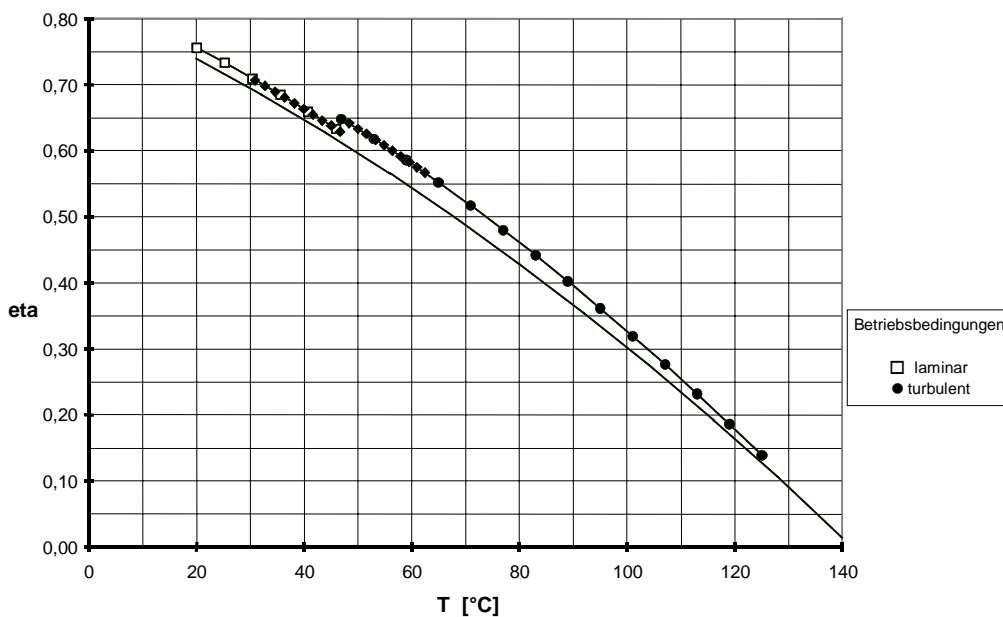


Abbildung 6.5: Wirkungsgradverlauf des im Low Flow betriebenen Kollektorfeldes über der mittleren Fluidtemperatur (800 W/m^2 , 20°C Umgebungstemperatur) im Vergleich zur gemessenen Kennlinie des Prüfkollektors (tiefer liegende Kennlinie).

Der Strömungsumschlag zwischen laminarer und turbulenter Strömung erfolgt hier schon bei 47°C. Die Anhäufung der fetten Quadrate stellt die gerechneten Punkte für einen Kollektordurchgang bei 30°C Kollektoreintritts- und 63°C Austrittstemperatur dar. Der Temperaturhub beträgt somit bedingt durch die für Low Flow und der zugrundegelegten Absorbergeometrie üblichen thermischen Länge von 38,4 m und eines spezifischen Massenstroms von 15 kg/m²h 33 K. Die mittlere Kollektortemperatur beträgt wie schon bei High Flow 46,5 K.

Der Druckverlust über das gesamte Kollektorfeld, einschließlich des Druckverlustes verursacht durch Sammler, Zu- und Ableitungen sowie Verbindungsleitungen zwischen den Elementen, beträgt bei beschriebener Temperatursituation und einem Gesamtmassenstrom von 555 kg/h 17200 Pa (entspricht 1,72 mWS).

6.2.3 Vergleich der Kollektorförderleistungen

Die Güte einer Kollektorverschaltung wird zum einen von der erreichten thermischen Kollektorleistung und zum anderen von der benötigten Kollektorförderleistung bestimmt. Die notwendige Kollektorförderleistung hängt nun nicht nur vom Druckverlust, sondern auch vom gewünschten Massenstrom ab und wird wie folgt errechnet:

$$P_{\text{Koll.}} = \frac{\dot{m} \cdot \Delta p_{\text{Koll.}}}{\rho \cdot 3600}$$

Gleichung 6.3

$P_{\text{Koll.}}$	Kollektorförderleistung oder hydraulische Leistung	[W]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/h]
ρ	mittlere Dichte des Mediums	[kg/m ³]
$\Delta p_{\text{Koll.}}$	Druckverlust im Kollektor	[Pa]

Die mittlere Dichte beträgt für ein Wasser-Frostschutzgemisch mit 35% Ethylenglykol bei einer mittleren Kollektortemperatur von 46,5 K 1039 kg/m³. Setzt man jetzt Massenstrom und Druckverlust der beiden Verschaltungsbeispiele ein, erhält man die dazugehörigen Kollektorförderleistungen.

High Flow:

$$P_{\text{Koll.}} = \frac{2037 \cdot 6000}{1039 \cdot 3600} = 3,27 \text{ W}$$

Low Flow:

$$P_{\text{Koll.}} = \frac{555 \cdot 17200}{1039 \cdot 3600} = 2,55 \text{ W}$$

Die Förderleistung für das Low Flow Feld liegt, bei praktisch gleicher thermischer Leistung mit 2,55 W um 22% unter der Förderleistung für das High Flow Feld. Trotz des wesentlich höheren Druckverlustes bei Low Flow, ist die aufzuwendende elektrische Leistung schon im Kollektor niedriger als bei High Flow. Fortgesetzt über die übrigen Anlagenkomponenten ergibt sich für Low Flow, wie schon in Kapitel 6.1.1 angeführt, bei größeren Anlagen eine wesentlich geringere Förderleistung.

Die Ergebnisse dieser beiden Beispiele zeigen aber, wie gering die benötigte elektrische Leistung ist, um ein Kollektorfeld mit 40 m² Bruttokollektorfläche mit hundertprozentigem

Pumpenwirkungsgrad zu betreiben. Übernimmt man Druckverlust und Massenstrom in ein Pumpendiagramm, ist sehr bald zu erkennen, dass für den gewünschten Betriebspunkt nur Pumpen mit wesentlich höherer elektrischer Leistungsaufnahme in Frage kommen, da der Pumpenwirkungsgrad von Kreiselpumpen in den üblichen Betriebspunkten von Solaranlagen (große Förderhöhe, verhältnismäßig kleine Massenströme) sehr gering ist.

Vor allem bei Low Flow Systemen werden aus diesem Grund von einigen Anbietern schon Alternativen zu Kreiselpumpen (Drehschieberpumpen, Membranpumpen) eingesetzt.

6.2.4 Thermische Rohrlänge bei Low Flow Betriebsweise

Bei der Planung von Anlagen in Low Flow Betriebsweise mit fassadenintegrierten Sonnenkollektoren muss darauf geachtet werden, dass die notwendige thermische Rohrlänge eingehalten werden kann.

Bei einer Low Flow oder Matched Flow Betriebsweise des Kollektors werden mit einem Umlauf des Wärmeträgers hohe Temperaturdifferenzen erreicht. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass diese Betriebsweise einen geeigneten Verrohrungs- und Durchströmungsplan (siehe Kapitel 6.2.2) benötigt.

Kennzeichnend für eine Low Flow Verschaltung sind, angepasst an die Absorbergeometrie, eine große thermische Länge (gesamt durchströmte serielle Länge einer Absorberbahn) sowie eine geringe Anzahl paralleler Stränge. Die thermische Länge des Kollektors ist direkt abhängig von dem gewählten Durchmesser der Rohre.

Bei einem Rohrdurchmesser von 7 mm ergibt sich eine notwendige thermische Rohrlänge von 20 bis 25 m. Das ist die Länge, die der Wärmeträger vom Eintritt in den Kollektor bis zum Austritt zurücklegen muss. Um die nötige Länge bei Low Flow Betriebsweise zu erreichen werden die Felder seriell durchströmt.

Im Sommer ist durch den flachen Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf die Fassade nicht zu erwarten, dass die Kollektoren in der Fassade in den Stillstand gehen und sich Dampf bildet. In den Übergangszeiten ist dies jedoch nicht zur Gänze auszuschließen, wenn der Kollektor keine Wärme abführen kann. Es sollte daher darauf geachtet werden, dass eventuell entstehender Dampf von selbst aus dem Kollektor austreten kann. Dies wird durch eine horizontale Rohrführung erreicht (siehe Abbildung 6.6).

Ist eine vertikale Anordnung der Rohre vorgesehen, so müssten die Kollektorfelder übereinander angeordnet werden, damit Dampf von selbst nach oben aus dem Kollektor austreten kann (siehe Abbildung 6.7).

Eine Möglichkeit, die thermische Länge zu reduzieren, ist, den Rohrdurchmesser auf 4 bis 5 mm zu reduzieren. Neben der thermischen Länge ändert sich damit aber auch der Rohrabstand.

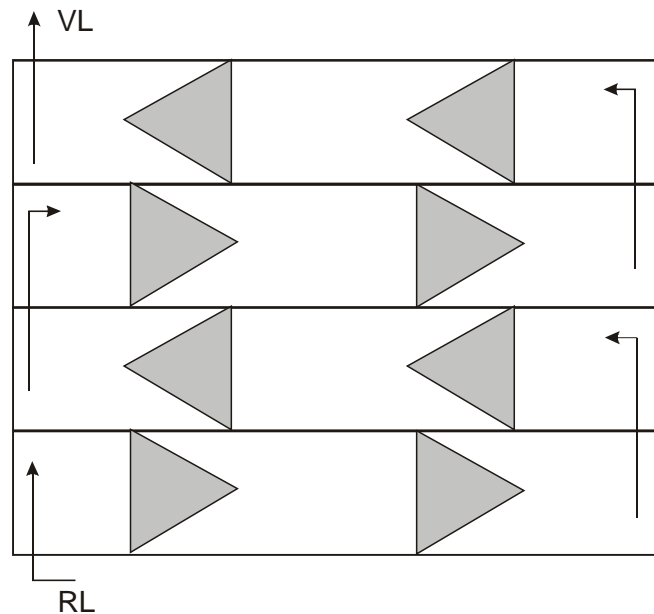


Abbildung 6.6: Low Flow Verschaltung, horizontal angeordnete Rohre

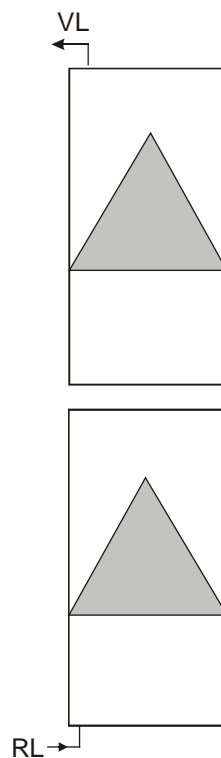


Abbildung 6.7: Low Flow Verschaltung, vertikal angeordnete Rohre

6.3 Speichermanagement bei Kombianlagen mit Fassadenkollektor

Die unten angeführten Angaben zu Speichermanagement und Kollektorhydraulik werden in Bezug auf Kombianlagen (Warmwasserbereitung und Raumheizung) gemacht.

Auf Basis der durchgeführten Simulationen und bei der Erhebung von bestehenden Solaranlagenanlagen mit Fassadenkollektor wurde festgestellt, dass einige Kombianlagen im

Sommer Probleme haben, genügend Energie für die Brauchwasserbereitung zu liefern. Das liegt daran, dass die Sonne in den Sommermonaten in einem sehr ungünstigen Winkel auf den Kollektor trifft. Dadurch wird der Ertrag der Solaranlage gemindert. Aus dieser speziellen Situation in der Fassade ergibt sich die Notwendigkeit eines geeigneten Speichermanagements, um die Bereitung von Warmwasser in den Sommermonaten sicher zu stellen.

Bei einer Anlage in Low Flow Betriebsweise wird mit niedrigen Massenströmen ein großer Temperaturhub innerhalb eines Kollektordurchlaufs erzielt. Das von der Solaranlage erwärmte Heizmedium wird abhängig von seiner Temperatur in den Energiespeicher eingeschichtet.

Im Sommer wäre aufgrund des Einstrahlungsprofils in die Fassade ein kleinerer Speicher günstiger, um schneller die nötige Temperatur für die Warmwasserbereitung zu erreichen. Es wird daher eine „Teilung“ des Speichers vorgenommen, wenn die eingestellte Mindesttemperatur für die Warmwasserbereitung noch nicht erreicht ist. Durch Umschalten eines Ventils wird der Solarrücklauf nicht mehr aus dem untersten Bereich des Speichers entnommen, sondern aus einem Bereich mit höherer Temperatur im oberen Teil des Speichers (siehe Abbildung 6.8). Das Heizungsmedium wird nun so weit erwärmt, dass vorerst nur der oberste Teil des Speichers beladen wird.

Bei Erreichen der Mindesttemperatur schaltet das Ventil um und der Solarrücklauf wird wieder aus dem untersten Teil des Energiespeichers entnommen. Damit wird wieder der gesamte Energiespeicher von der Solaranlage beladen. Mit dieser Regelung wird sichergestellt, dass der Nachheizenergiebedarf gering gehalten wird.

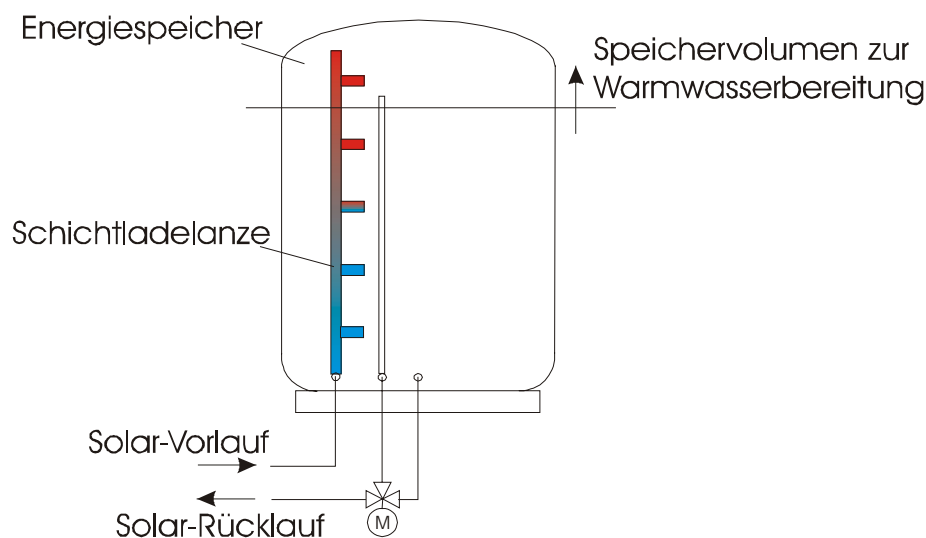


Abbildung 6.8: Speichermanagement bei Anlagen mit Fassadenkollektor, Umschalten des Drei-Wege-Ventils und Teilung des Energiespeichers

Die Einbindung des Energiespeichers in das gesamte Hydrauliknetz ist in Abbildung 4.23 dargestellt.

7 Design des Fassadenkollektorsystems und Bau der Prototypen

Auf Basis der Ergebnisse der vorangehenden Arbeitspakete erfolgt die Entwicklung eines Kollektors, der auf die speziellen Erfordernisse der Fassadenintegration abgestimmt ist. Dies beinhaltet die entsprechenden Anschlusssteile für Fenster, Türen und die Fassade. Bei der bautechnischen Integration der Kollektorelemente wird eine möglichst einfache und wärmebrückenfreie Befestigungstechnik angestrebt.

Die Fertigungsüberleitung, der Bau der Prototypen sowie der Test der Prototypen erfolgt auf Basis der Ergebnisse der vorangehenden Arbeitspakete von der am Projekt beteiligten Firmen im Rahmen eines parallel beantragten ITF-Projektes. Die Kosten für das Arbeitspaket „Bau und Test der Prototypen“ werden daher über das ITF-Projekt bzw. vom Solartechnikunternehmen getragen.

Die gewonnenen Erkenntnisse durch die Entwicklung der Prototypen, der Anschlusssteile und der Befestigungstechnik sind Know-How der Firmen. Daher werden im Zwischenbericht keine Details veröffentlicht.

8 Testanlagen

Vor der Serienfertigung der Fassadenkollektoren wird eine Vorserie der Fassadenkollektorelemente gefertigt, zwei Testanlagen errichtet und alle für die Funktionsüberprüfung erforderlichen Parameter über einen Zeitraum von 9 Monaten messtechnisch erfasst, dokumentiert und ausgewertet. Die Testfassaden werden auf unterschiedliche Wandkonstruktionen (Massivwand und Leichtbauwand) aufgebracht um das evt. unterschiedliche Verhalten des Systems „Wand-Kollektor“ zu erfassen. Die Testfassade 1 wird auf einer Holzriegelwand, die Testfassade 2 wird auf einer Ziegelwand errichtet.

Auf Basis der Ergebnisse der Messungen werden vor der Großserienfertigung gegebenenfalls Optimierungen bzw. Systemanpassungen durchgeführt.

8.1 Testanlage 1 – Zweifamilienwohnhaus Graz

8.1.1 Hydraulisches Gesamtkonzept

Die Testanlage dient der solaren Warmwasserbereitung und teilsolaren Raumheizung für ein Zweifamilienwohnhaus in Graz. Der Kollektor ist an der Südfassade des Gebäudes auf eine Leichtbauwand montiert (siehe Abbildung 8.2) und hat eine Bruttofläche von 55 m², es wird ein Kollektor mit Solarlackbeschichtung verwendet. Die Anlage wird in Low - Flow Betriebsweise mit drehzahl geregelter Pumpe im Kollektorkreislauf betrieben. Tabelle 8.1 gibt die technischen Daten an. In Abbildung 8.1 ist der Wandaufbau der Testfassade dargestellt. Abbildung 8.3 zeigt das Prinzipschaltbild der Anlage.

Tabelle 8.1: Technische Daten

Bruttokollektorfläche	55 m ²
Kollektorneigung	90°
Azimut	10° Südwest
Energiespeicher	3.750 l Schichtspeicher
Brauchwasserspeicher	500 l Brauchwasserspeicher
Heizlast des Gebäudes	12 kW
Warmwasserbedarf	240 l mit 60°C/Tag
Zusatzheizung	Pelletkessel – Kellergerät ca. 15 kW
Wärmeabgabesystem	Wand und Fußbodenheizung
Regelung	Frei programmierbare Regelung

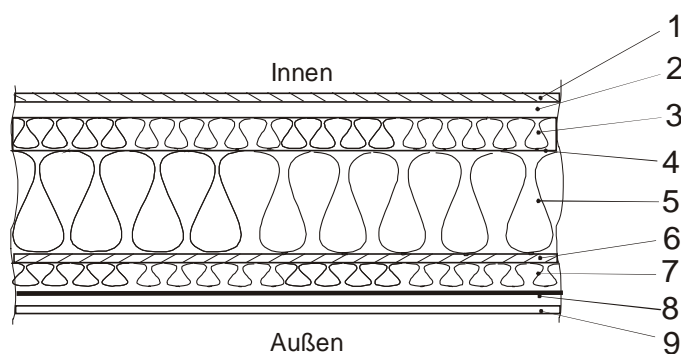


Abbildung 8.1: Wandaufbau der Testfassade Graz

Tabelle 8.2: Schichtaufbau und Abmessungen des Wandaufbaus der Testfassade Graz

Nr.	Schichtaufbau von Innen nach Außen	Abmessungen [mm]
1	Gipsfaserplatte	15
2	Streuschalung	24
3	Holzfaserdämmung	50
4	Dampfbremse	-
5	Steinwolle	160
6	OSB-Platte	15
7	Steinwolle	40
8	Absorber	11
9	Glasabdeckung	4

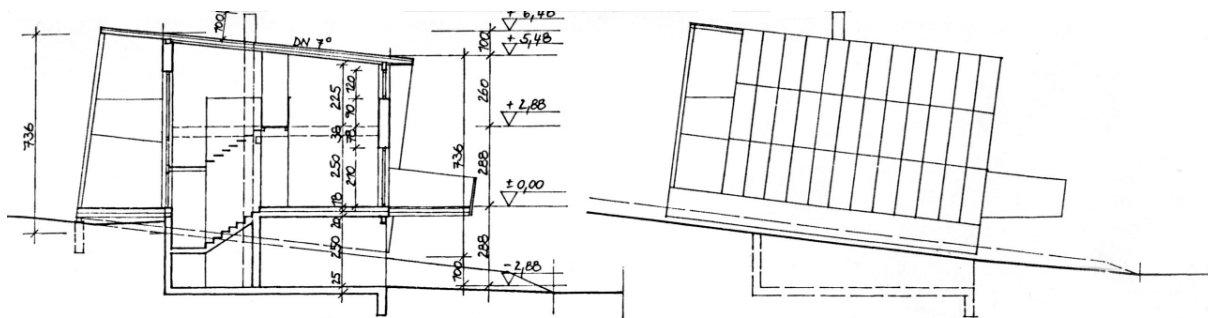


Abbildung 8.2: Südansicht des Zweifamilienhauses mit Kollektorfeld

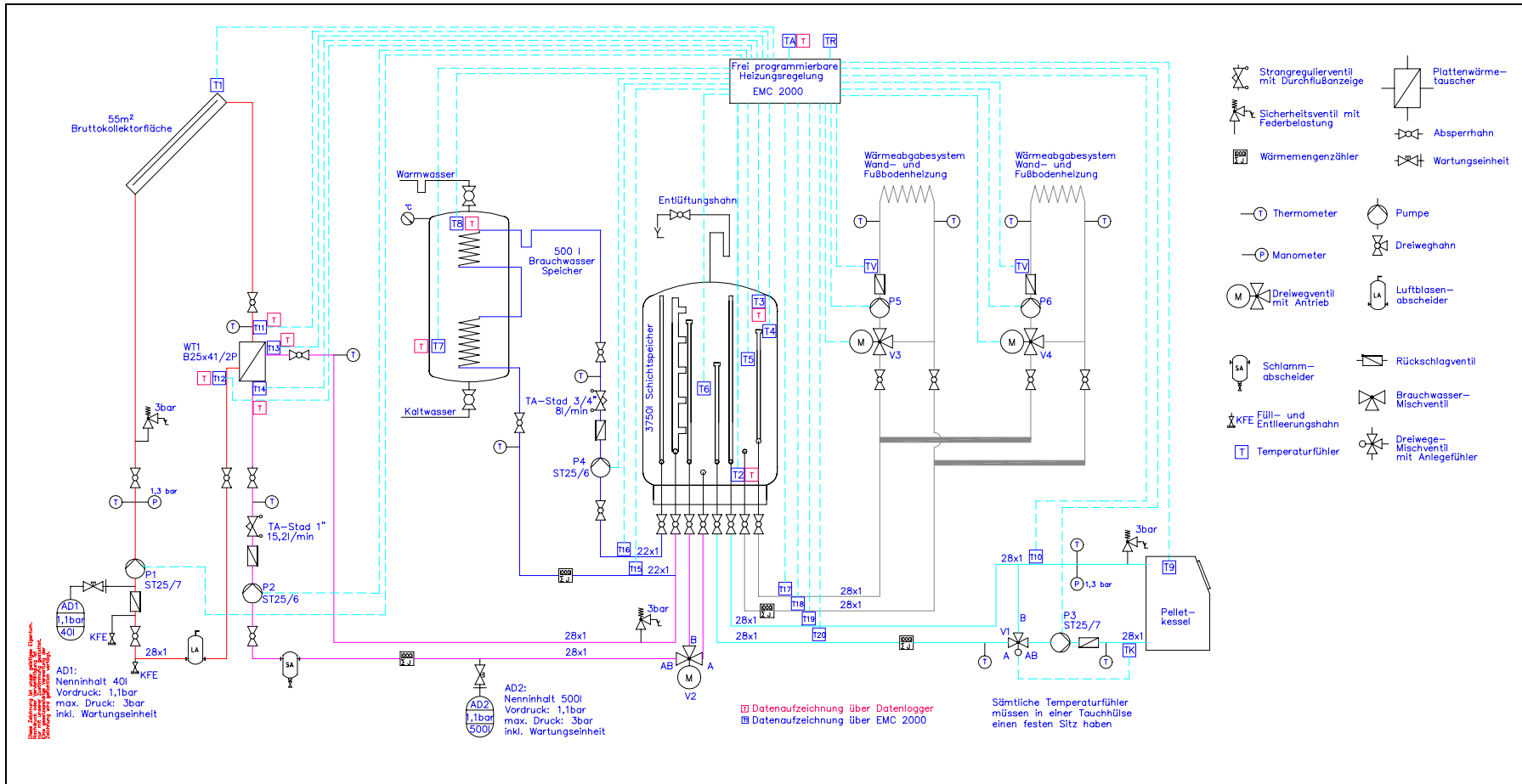


Abbildung 8.3: Hydraulisches Schaltbild der Testanlage 1

8.1.2 Regelungskonzept

8.1.2.1 Solarkreis

Wenn die Temperatur T1 (Kollektor oben) größer ist als T2 (Speicher unten), dann schaltet sich die Pumpe des Solarkreises P1 ein. Parallel dazu schaltet sich die Pumpe P2 ein. P1 und P2 sind so lange in Betrieb, bis entweder T1 kleiner als T2 ist oder eine an der Regelung einzustellende Maximaltemperatur im Pufferspeicher erreicht ist.

Ist am Fühler T4 im Schichtspeicher eine an der Regelung frei einstellbare Mindesttemperatur, die für die Warmwasserbereitung notwendig ist (z.B. 60°C), noch nicht erreicht, so wird über Umschalten des Ventils V2 nur der obere Teil des Pufferspeichers von der Solaranlage beladen. Durch das Umschalten des Ventils wird der Solar-Rücklauf nicht mehr aus dem untersten – kalten - Teil des Energiespeichers entnommen wird, sondern aus einem oberen – wärmeren - Bereich (siehe dazu auch Kapitel 6.3). Nach Erreichen dieser Mindesttemperatur, die für die Boilerladung notwendig ist, wird von der Regelung das Ventil V2 wieder umgeschaltet, d.h. es wird bei einem Solareintrag wieder der gesamte Pufferspeicher von der Solaranlage beladen.

Die Drehzahl der Pumpe P2 wird dabei genau auf die in den einzelnen Zeitfenstern eingestellten Vorlauftemperaturen geregelt. Die Drehzahl der Pumpe P1 wird hingegen auf die gleiche Temperaturdifferenz der Pumpe P2 (zwischen Vor- und Rücklauf) eingeregelt. Dabei wird das solar erwärmte Medium über die Schichtbeladeeinrichtung in den Pufferspeicher eingeschichtet. Es müssen dabei die im Primär und Sekundärkreislauf festgelegten Massenströme eingehalten werden.

8.1.2.2 Heizen aus dem Speicher

Wird in den Heizkreisen (Wand- und Fußbodenheizung) Energie benötigt (Heizungsregelung schaltet die Heizungspumpen P5 und P6), so wird das von der Solaranlage oder vom Pelletkessel erwärmte Medium aus dem Pufferspeicher in die Heizung abgesaugt, je nach Stellung der Heizungsmischer V3 oder V4.

8.1.2.3 Betrieb über Pelletkessel

Falls T4 im Puffer eine bestimmte Temperatur unterschreitet, wird der Pelletkessel von der Regelung in Betrieb genommen. Die Kesselladepumpe P3 wird nach Überschreiten der Kesseltemperatur T9 von z.B. 55°C die an der Regelung frei eingestellt werden kann, in Betrieb genommen.

Um Kondensation am Kessel zu verhindern, zirkuliert das erwärmte Medium über ein Dreiwegeventil V1 intern. Steigt die Temperatur am Rücklauffühler TK an, öffnet das Ventil und gibt die Energie im Kessel für die Heizung frei. Die Rücklaufanhebung V1 sorgt für eine konstante Rücklauftemperatur (ca. 55°) und verhindert Kondensation im Kessel. Dabei wird die Drehzahl der Kesselladepumpe P3 über den Fühler T10 von der Regelung so eingeregelt, dass eine an der Regelung eingestellte Temperatur von z.B.:70°C am Fühler T10 gehalten wird.

Der Pelletkessel ist so lange in Betrieb, bis T5 eine bestimmte Temperatur überschreitet (diese Temperatur kann an der Regelung eingestellt werden kann, z.B. 65°C). Die Pumpe P3

läuft dann zeitlich so lange nach, bis der Kessel am Fühler T9 eine bestimmte an der Regelung einstellbare Temperatur ca. 60°C unterschreitet.

8.1.2.4 Laden des Brauchwasserspeichers aus dem Puffer

Wenn T3 im Pufferspeicher größer ist als T8 im Brauchwasserspeicher und der Zeitpunkt für die Nachheizung stimmt, (ist an der in der Heizungsregelung integrierten Zeitschaltuhr zu programmieren - ein bis zweimal am Tag) schaltet die Pumpe P4 ein und wärmt den Boiler bis zu einer einzustellenden Maximaltemperatur am Fühler T7 auf. Die Nachladung sollte nur nicht parallel mit solaren Einträgen erfolgen, d.h. erst dann, wenn von der Sonne keine Energie mehr zu erwarten ist, da sonst an der Beladeeinrichtung ungewünschte Vermischungen entstehen.

8.1.2.5 Hydraulische Verschaltung des Kollektors

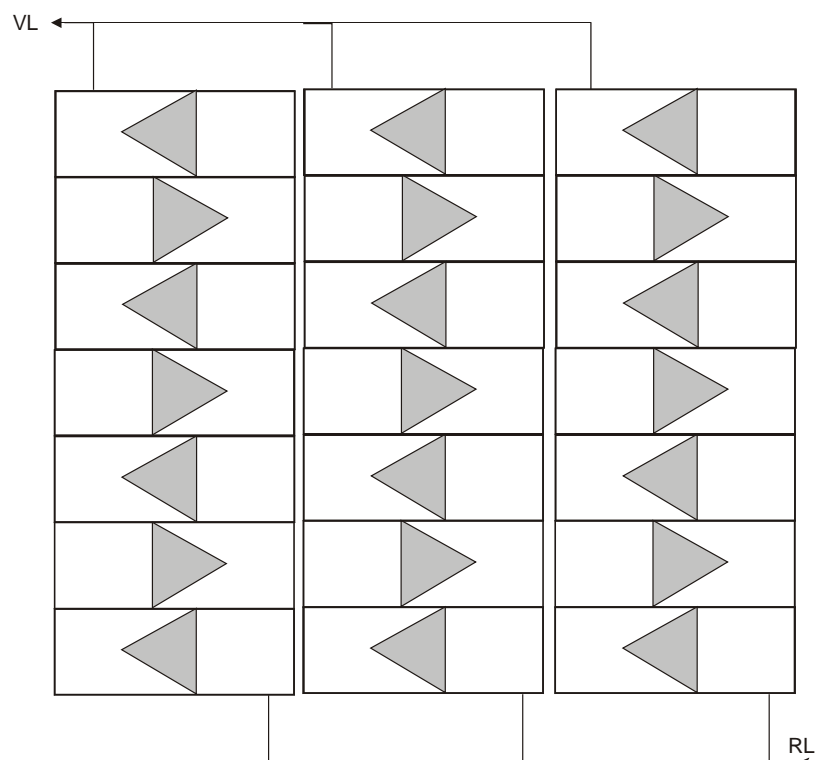


Abbildung 8.4: Kollektorverschaltung der Testfassade 1

Abbildung 8.4 zeigt die hydraulische Verschaltung des Kollektors. Der Absorber hat eine Nettoabsorberfläche von 50 m². Die thermische Länge beträgt ca. 20 m².

8.1.2.6 Hydraulische Einregelung des Solarkreises

Über die Durchflussmengenregler (Strangreguliertventile) wird der anlagenspezifische Durchfluss (primär und sekundär, Durchfluss wie am Hydraulikschema angegeben) eingestellt. Das Kollektorfeld wird zuerst über die Drehzahlstufe und die Durchflussmengenregler grob eingeregelt. Bei entsprechender guter Einstrahlung misst man dann die Temperatur am

Vorlauf und Rücklauf bzw. verändert den Massenstrom um die gewünschte Temperaturspreizung von ca. 30 K zu erhalten.

Weiters muss beachtet werden, dass die Temperaturunterschiede am Wärmetauscher zwischen Primärkreis und Sekundärkreis auf beiden Seiten max. ca. 10 K betragen. Während des Betriebs ist dies auch ein tauglicher Hinweis darauf, ob der Wärmetauscher aufgrund von Ablagerungen nicht mehr einwandfrei arbeitet.

8.1.3 Messtechnisches Gesamtkonzept Testfassade 1

Gemessen und erfasst werden:

- Klimadaten (Globalstrahlung und Außentemperatur): Die Globalstrahlung wird horizontal und in der Fassade mit Hilfe von Pyranometern gemessen.
- Wärmestrom in der Wandkonstruktion: Die Erfassung der Wärmeströme in der Wand wird mit einer Wärmestromplatte gemessen (siehe Abbildung 8.5).
- Temperaturen und Feuchte im Kollektor und im Wandaufbau: Die Absorberrücktemperaturen werden an 7 unterschiedlichen Positionen auf der Absorbervorderseite und einmal an der Absorberrückseite gemessen (siehe Abbildung 8.6). Die Feuchtigkeit bzw. zusätzliche Temperaturen werden auf zwei verschiedenen Ebenen im Zwischenraum von Absorber und Glasebene gemessen. Weiters werden in der unteren Ebene die Feuchte und Temperaturwerte in jeder relevanten Ebene des Wandaufbaus gemessen (siehe Abbildung 8.5). Schließlich werden die Feuchtigkeit und die Temperatur im Wohnraum hinter dem Fassadenkollektor erfasst.
- Temperaturfühler im Leitungsnetz befinden sich einmal im Solarrücklauf und drei mal im Solarvorlauf des Primärkreises (siehe Abbildung 8.6) bzw. jeweils im Vor- und Rücklauf des Solarkreises. Weitere Temperaturfühler befinden sich im oberen und im unteren Bereich des Warmwasserboilers und der Pufferspeichers (siehe Abbildung 8.3).
- Wärmemengenzähler

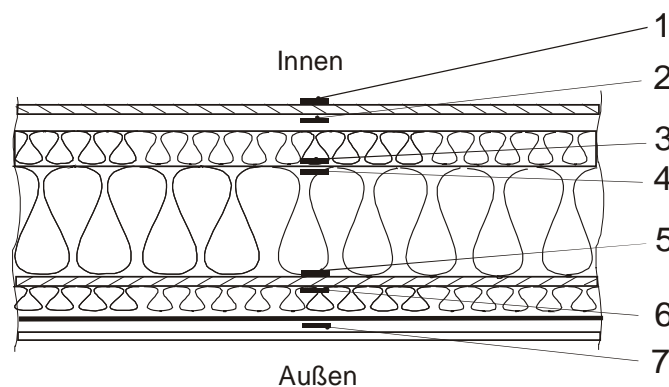


Abbildung 8.5: Positionierung der Messfühler im Wandaufbau der Testfassade 1

Tabelle 8.3: Art des Messgeräts und Position im Wandaufbau* der Testfassade 1

Positionsnummer	Messgerät
1	Temperatur- und Feuchtefühler im Raum
2	Temperatur- und Feuchtefühler
3	Temperatur- und Feuchtefühler, Wärmestromplatte
4	Temperatur- und Feuchtefühler
5	Temperatur- und Feuchtefühler
6	Temperatur- und Feuchtefühler
7	Temperatur- und Feuchtefühler im Zwischenraum Glas und Absorber

*Abmessungen des Wandaufbaus siehe Abbildung 8.1

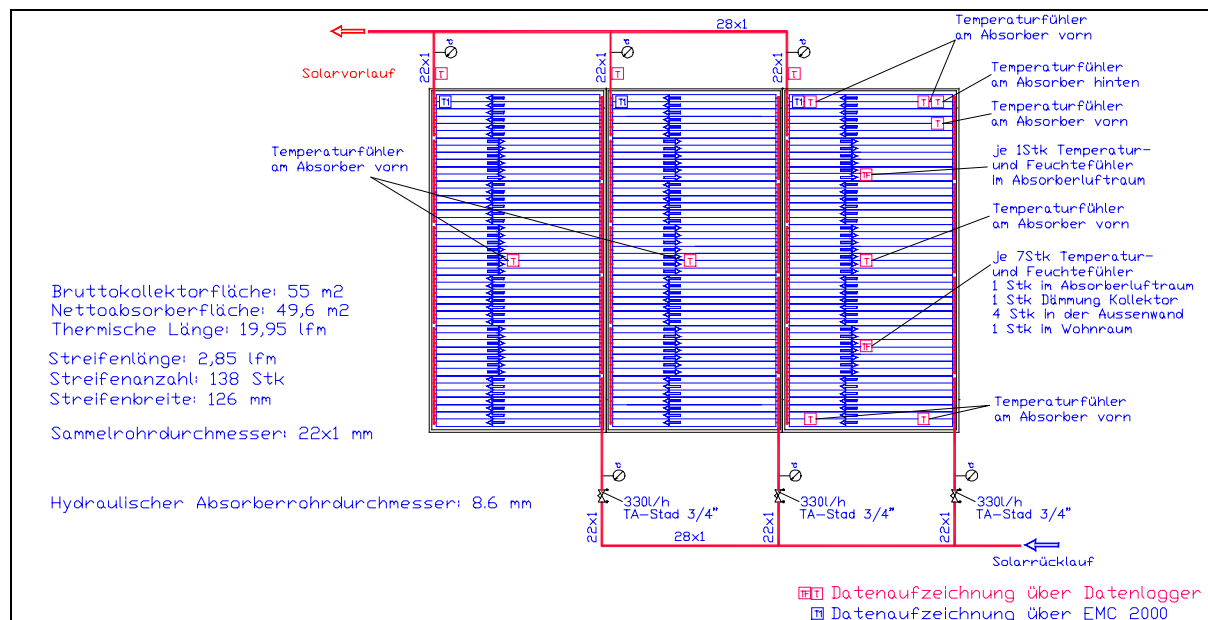


Abbildung 8.6: Positionierung der Messfühler im Kollektor der Testfassade 1

8.2 Testanlage 2 – Bürogebäude St.Veit

Die Testfassade 2 wird auf das Bürogebäude der Firma GreenONEtec auf eine Massivwand montiert (siehe Abbildung 8.8). Die voraussichtliche Bruttokollektorfläche beträgt 25 m², es wird ein Kollektor mit selektiver Beschichtung verwendet. Der Kollektor wird auf eine Ziegelwand (25 cm hochporöser Ziegel) montiert.

Der gesamte Kollektoraufbau samt Dämmung und Glasabdeckung hat eine Tiefe von 8,8 cm. Dies ergibt sich aus dem Anspruch, in einer Ebene an die restliche Fassade anzuschließen. Die verbleibende Fassade wird mit Eternit-Platten abgedeckt. Es wird in der am Projekt beteiligten Firma ein entsprechendes Fassadenanschlusselement entwickelt.

Das Hydraulikkonzept der Anlage sieht eine Versorgung des Bürogebäudes (Waschbecken, Dusche, Teeküche) mit Warmwasser vor.

Details liegen zum Zeitpunkt der Berichtlegung nicht vor.

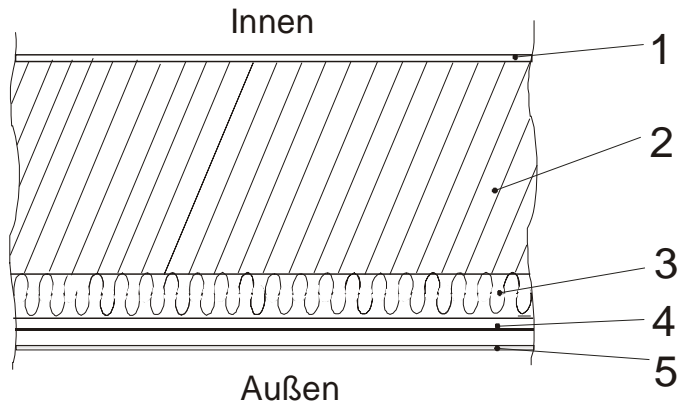


Abbildung 8.7: Wandaufbau der Testfassade 2, Ziegel 25 cm

Tabelle 8.4: Abmessungen des Wandaufbaus der Testfassade 2

Nr.	Schichtaufbau von Innen nach Außen	Abmessungen [mm]
1	Innenputz	15
2	Ziegel, hochporös	250
3	Steinwolle	40
4	Absorber	-
5	Glasabdeckung	4



Abbildung 8.8: Versuchskollektor, ca. 25 m², 1. und 2. OG, Ansicht Verwaltung

8.2.1 Messtechnisches Gesamtkonzept Testfassade 2

Gemessen und erfasst werden:

- Klimadaten (Globalstrahlung und Außentemperatur): Die Globalstrahlung wird horizontal und in der Fassade mit Hilfe von Pyranometern gemessen.
- Wärmestrom in der Wandkonstruktion: Die Erfassung der Wärmeströme in der Wand wird mit einer Wärmestromplatte gemessen (siehe Abbildung 8.9).
- Temperaturen und Feuchte im Kollektor und im Wandaufbau: Die Absorberrtemperaturen werden an unterschiedlichen Positionen auf der Absorbervorderseite und einmal an der Absorberrückseite gemessen. Die Feuchtigkeit bzw. zusätzliche Temperaturen werden auf zwei verschiedenen Ebenen im Zwischenraum von Absorber und Glasebene gemessen. Weiters werden in der unteren Ebene die Feuchte und Temperaturwerte in jeder relevanten Ebene des Wandaufbaus gemessen (siehe Abbildung 8.9). Schließlich werden die Feuchtigkeit und die Temperatur im Wohnraum hinter dem Fassadenkollektor erfasst.
- Temperaturfühler im Leitungsnetz befinden sich einmal im Solarrücklauf und drei mal im Solarvorlauf des Primärkreises bzw. jeweils im Vor- und Rücklauf des Solarkreises. Weitere Temperaturfühler befinden sich im oberen und im unteren Bereich des Warmwasserboilers und der Pufferspeichers.
- Wärmemengenzähler

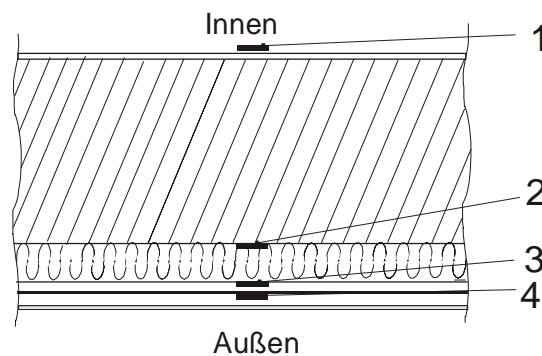


Abbildung 8.9: Positionierung der Messfühler im Wandaufbau der Testfassade 2

Tabelle 8.5: Art des Messgeräts und Position im Wandaufbau* der Testfassade 2

Positionsnummer	Messgerät
1	Temperatur- und Feuchtefühler im Raum, Wärmestromplatte
2	Temperatur- und Feuchtefühler
3	Temperatur- und Feuchtefühler
4	Temperatur- und Feuchtefühler im Zwischenraum Glas und Absorber

*Abmessungen des Wandaufbaus siehe Abbildung 8.7

9 Literaturverzeichnis

- Lit 1 Mitteilung der Kommission über Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger, Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan
- Lit 2 Purkarthofer, G.: Marktübersicht Thermische Solaranlagen, Gleisdorf, 1998
- Lit 3 Rockendorf, Janßen: Facade Integrated Solar Collectors, Institut für Solarenergieforschung GmbH, Hameln
- Lit 4 Valentin, G., T-Sol, Programm zur Auslegung und Simulation Thermischer Solaranlagen, Innovative Ingenieur Software, Dr.-Ing. Valentin & Partner GbR, Berlin, 1998
- Lit 5 Fink, C., Müller, A.: Thermische Sonnenenergienutzung im Mehrfamilienwohnbau, Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, 1999
- Lit 6 DVGW, 1993, Richtlinie W551 „Legionellenverordnung“, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs, Arbeitsblatt W551, 03/93, Eschborn, Deutschland
- Lit 7 Eder, M., Fink, C., Streicher, W., Themeßl, A., Weiss, W., e.a.: Heizen mit der Sonne, Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, 1997
- Lit 8 Jordan, U, Vajen, K., Load Profile on a One-Minute Time Scale, IEA-Task 26, Solar Combisystems, Stuttgart, Germany, 1999
- Lit 9 Fink, C., Purkarthofer, G.: Garantierte Wärmelieferung aus Thermischen Solaranlagen im Wohnbau, Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, 2000
- Lit 10 Diem, Paul, Bauphysik im Zusammenhang, 2. Auflage 1996, Bauverlag
- Lit 11 Ökologischer Bauteilkatalog, 1999 Springer-Verlag Wien New York
- Lit 12 Energieverwertungsagentur - E.V.A, <http://www.eva.wsr.ac.at/enz/k-wert.htm>, 1998
- Lit 13 TRNSYS, A Transient System Simulation Program – Version 14.2, Klein, S.A., Beckmann, W.A., et al., Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA, Vertrieb in Deutschland: Transsolar Energietechnik GmbH, Nobelstraße 25, 70569 Stuttgart, Deutschland
- Lit 14 Mack, M., Fünfgeld, C., Institut für Solarenergieforschung Hameln: Moderne Konzepte solarer Brauchwassersysteme, Chancen, Grenzen, Möglichkeiten; 8. Internationales Sonnenforum, Berlin, Deutschland, 1992

10 Anhang