

Beurteilung der Möglichkeiten von thermochromen Schichten als potenzielle Überhitzungsschutzmassnahme für solarthermische Kollektoren

Autor	Stefan Brunold, Peter Vogelsanger, Heinz Marty
Datum	14. September 2007
Verteiler	Urs Wolfer, Jean-Christophe Hadorn
BFE Projektnummer	43729
BFE Verfügung	152652



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Federal Office of Energy SFOE

1	Projektbeschreibung	3
2	Einleitung.....	3
3	Anlagendetails.....	4
3.1	Kollektor	4
3.2	Systemdefinitionen.....	4
4	Abhängigkeit des solaren Deckungsgrades von den optischen Schichteigenschaften α und ε	7
4.1	Simulationsresultate.....	8
4.2	Mindestanforderung an eine thermochrome Absorberschicht im ungeschalteten Zustand	11
5	Thermochrome Absorberschicht als Überhitzungsschutz	13
5.1	Modellierung des thermochromen Kollektors	13
5.2	Simulationsresultate.....	14
5.3	Diskussion.....	18
6	Andere Überhitzungsschutzmassnahmen	19
6.1	Solarabsorberschicht mit suboptimalen optischen Eigenschaften	19
6.2	Regelungs- und systemtechnische Überhitzungsschutzmassnahmen	20
7	Von 160°C abweichende Temperaturgrenzen.....	28
8	Diskussion	30
8.1	Temperaturgrenze bei 160°C.....	30
8.2	Temperaturgrenze deutlich unter 160°C.....	31
9	Schlussfolgerungen.....	32
10	Referenzen.....	33

1 Projektbeschreibung

Moderne Kollektoren für die solare Wasseraufbereitung sind mittlerweile sehr effiziente Strahlungswandler. Dabei sind insbesondere die verwendeten Absorberdünnschichten hochselektiv, was in Zeiten von guten Solarstrahlungskonditionen und geringem Warmwasserverbrauch zu starken thermischen Belastungen der eingesetzten Materialien führen kann – insbesondere des üblichen Wasser-Glykol Wärmeträgermediums. Auf den Absorber aufgebrachte thermochrome Schichten könnten allenfalls als effektive Überhitzungsschutzmassnahme dienen.

In einer klärenden ersten Phase sollen hypothetische Solarkollektorsystemen mit thermochromen Schichten mittels Simulationsrechnungen eingehend studiert werden, mit dem Ziel, folgende Mindestanforderungen an die optischen Eigenschaften der Schicht zu definieren:

1. Welche Werte müssen Absorptions- und Emissionsgrad im geschalteten Zustand aufweisen, um einen wirksamen Überhitzungsschutz darzustellen, und
2. Welche Werte müssen Absorptions- und Emissionsgrad im ungeschalteten Zustand aufweisen, um die zu erwartende Reduktion der Leistungsfähigkeit eines thermochromen Absorbers gegenüber einem herkömmlichen Absorber in einem akzeptablen Mass zu halten.

Ferner sollen die gewonnenen Erkenntnisse mit konventionellen, vornehmlich mechanischen, regelungstechnischen oder alternativ-hydraulischen Überhitzungsschutzmassnahmen verglichen und deren technisch-wirtschaftlicher Nutzen evaluiert werden.

2 Einleitung

In die Untersuchung einbezogen wurden sowohl Systeme zur reinen Wassererwärmung als auch Kombisysteme für Warmwasser und Heizungsunterstützung. Von beiden Systemtypen wurde je eine „kleine“ Variante, mit derzeit eher typischem solaren Deckungsgrad, als auch eine „grosse“ Variante mit relativ hohem solaren Deckungsgrad betrachtet. Letztere sind hinsichtlich des Auftretens von Stagnation als besonders kritisch anzusehen, da diese naturgemäss in den Sommermonaten viel Überschussenergie liefern.

Stagnation bedeutet, dass, aufgrund der fehlenden Energieabfuhr aus dem Kollektor durch den Solarkreislauf, der Absorber die sogenannte Stagnationstemperatur erreicht. Das ist die Temperatur, bei der die Energiegewinne (durch die solare Einstrahlung) mit den Energieverlusten (im wesentlichen Kollektorverluste) im Gleichgewicht stehen. In der Praxis können dabei bei Flachkollektoren Absorbertemperaturen von über 200°C erreicht werden. Bei durchdachter Bauweise und sorgfältiger Auswahl der im Kollektor verwendeten Materialien, ist diese Belastung jedoch durchaus handhabbar.

Den wirklichen Schwachpunkt gegenüber thermischer Belastung stellt jedoch der üblicherweise verwendete Wärmeträger dar, eine Mischung aus Glykol, Wasser und Inhibitoren. Da mit einer Zersetzung der Glykole bei Temperaturen oberhalb ca. 160°C zu rechnen ist, wurde in dieser Studie 160°C als Obergrenze für einen wirksamen Übertemperaturschutz gewählt.

Während in Abschnitt 3 die betrachteten Systeme vorgestellt werden, wird in Kapitel 4 auf die, aufgrund suboptimaler optischer Werte der Absorberschicht, zu erwartenden Ertragseinbussen eingegangen. Hintergrund dafür ist die Überlegung, dass eine neu zu entwickelnde, thermochrome Absorberschicht, auch im ungeschalteten Zustand nicht die optischen Eigenschaften der besten, heutzutage auf dem Markt erhältlichen, Absorberschichten erreichen wird.

Aufgrund von Simulationsrechnungen für Systeme mit thermochromem Solarabsorber, werden in Kapitel 5 Aussagen zur Anforderung an das Schaltvermögen dieser Schichten getroffen. In

Kapitel 6 werden konventionelle, zum Teil auf dem Markt befindliche, Überhitzungsschutzmassnahmen vorgestellt.

Auf Grenztemperaturen unter 160°C, welche sowohl die Palette der im Kollektor verwendeten Materialien substantiell erweitern, als auch die Systemkonzepte vereinfachen könnten, wird im Abschnitt 7 eingegangen.

3 Anlagendetails

3.1 Kollektor

Das verwendete Kollektormodell entspricht einem, im Vergleich mit dem SPF Kollektorkatalog, knapp überdurchschnittlich guten Kollektor. Es wurde bewusst kein Spitzenprodukt verwendet. Die Daten der Wirkungsgradkennlinie sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tab 3.1: Parameter der Wirkungsgradkennlinie des verwendeten Kollektors

Parameter	Wert
η_0	0.781
a_1	$3.95 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
a_2	$0.00582 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$

3.2 Systemdefinitionen

In Tab 3.2 sind Parameter aufgeführt, die für alle Simulationen gelten. In Tab 3.3 bis 3.6 sind die Parameter der unterschiedlichen Anlagen angegeben. Es wurden 4 Anlagen für EFH definiert. Je 2 sind solare Warmwasseranlagen (WW) bzw. solare Kombisystem für Warmwasser und Raumheizung (RH). Von jedem Typ wurde eine Anlage „Gross“ mit gravierendem Stagnationsverhalten und eine Anlage „Klein“, mit typischem Ertrag gewählt.

Die Anlagen mit gravierendem Stagnationsverhalten („Gross“), weisen einen kleinen Warmwasserverbrauch von 50 l / Tag und eine relativ grosse Kollektorfläche auf. Dieser Anlagentyp dient in erster Linie dazu, die Funktionsfähigkeit der Überhitzungsschutzmassnahme zu demonstrieren. Der Anlagentyp „Klein“ dagegen soll als Massstab dienen, den Einfluss einer Überhitzungsschutzeinrichtung auf den Ertrag zu quantifizieren.

Tab 3.2: Allgemeine Definitionen der simulierten Systeme

Parameter	Wert
Standort	Rapperswil SG
Einstrahlung Kollektorfeld	$1110 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$
Mittlere Aussentemperatur	9.5 °C
Ferien Periode	3 Wochen im August

System 1a: WWGross: Warmwasseranlage mit grosser Kollektorfläche und hohem Deckungsgrad

Durch die im Vergleich zum geringen Warmwasserbedarf gross gewählte Kollektorfläche, wird mit diesem System zur Warmwasserbereitung ein hoher solarer Deckungsgrad (S_{Fo}) erzielt. Der Zeitraum mit über 95%iger solaren Deckung ist von März bis September relativ lang. Dementsprechend gross ist auch die Überhitzungsproblematik insbesondere in den Sommermonaten.

Tab 3.3: Parameter WWGross

Parameter	Wert
Solarer Deckungsgrad S _{Fo}	74 %
Monate mit über 95 % S _{Fo}	März bis September
Energiebedarf (Q _{demand})	760 kWh
Zusatzenergie (Q _{aux})	196 kWh
Solarenergie an das System	1745 kWh
Warmwasserprofil	50 l/tag
Kollektorfläche	7 m ²
Speichervolumen	400 l

System 1b: WWKlein: Warmwasseranlage mit kleinerer Kollektorfläche und geringerem Deckungsgrad

Dieses System entspricht einer heutzutage eher typischen Auslegung einer solaren Warmwasseranlage. Der solare Deckungsgrad für die Warmwasserbereitung beträgt 55%. Dadurch geht dieses System weniger oft in Stagnation.

Tab 3.4: Parameter WWKlein

Parameter	Wert
Solarer Deckungsgrad S _{Fo}	55 %
Monate mit über 95 % S _{Fo}	August
Energiebedarf (Q _{demand})	2380 kWh
Zusatzenergie (Q _{aux})	1071 kWh
Solarenergie an das System	2150 kWh
Warmwasserprofil	150 l/Tag
Kollektorfläche	5 m ²
Speichervolumen	400 l

System 2a: RHGross: Kombisystem mit grosser Kollektorfläche und hohem Deckungsgrad

Diesem Kombisystem zur Raumheizung und Warmwasserbereitung liegt ein gut isoliertes Gebäude zugrunde. Der relativ bescheidene Deckungsgrad von 27% ist auf den bewusst klein gewählten Warmwasserverbrauch zurück zu führen. Drei Monate haben über 95% SFo.

Tab 3.5: Parameter RHGross

Parameter	Wert
Solarer Deckungsgrad S _{Fo}	27 %
Monate mit über 95 % S _{Fo}	Juni bis September
Energiebedarf (Q_{demand})	8640 kWh
Zusatzenergie (Q_{aux})	6339 kWh
Solarenergie an das System	4616 kWh
Warmwasserprofil	50 l/Tag
Skalierung von EBF 200 m ²	0.7
Luftwechselrate / Wärmerückgewinnung	0.7 l/h / 70%
Kollektorfläche	25 m ²
Speichervolumen	1300 l

System 2b: RHKlein: Kombisystem mit kleinerer Kollektorfläche und geringerem Deckungsgrad

Kleinere Kollektorfläche sowie höherer Bedarf an Warmwasser und Raumheizungsenergie, führen bei diesem Kombisystem zu einem kleineren, heutzutage eher typischen, solaren Deckungsgrad von 16%. Aufgrund des fehlenden Raumheizungsbedarfs im Sommer, ist die Stag-nationsproblematik gegenüber einem reinen Warmwassersystem dennoch erhöht.

Tab 3.6: Parameter RHKlein

Parameter	Wert
Solarer Deckungsgrad S _{Fo}	16 %
Monate mit über 95 % S _{Fo}	Juli und August
Energiebedarf (Q_{demand})	19720 kWh
Zusatzenergie (Q_{aux})	16474 kWh
Solarenergie an das System	5185 kWh
Warmwasserprofil	150 l/Tag
Skalierung von EBF 200 m ²	1
Luftwechselrate / Wärmerückgewinnung	Aus / Aus
Kollektorfläche	16 m ²
Speichervolumen	1300 l

4 Abhängigkeit des solaren Deckungsgrades von den optischen Schichteigenschaften α und ε

Die Entwicklung einer Solarabsorberschicht mit hoher Selektivität ist eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Es gilt, ein Schichtsystem zu finden, welches ein grosses solares Absorptionsvermögen mit einem möglichst niedrigen Emissionsvermögen verbindet und zudem dauerhaft ist, also dem Mikroklima in einem Flachkollektor über mindestens 25 Jahre stand hält. Heutzutage erzielen die besten auf dem Markt befindlichen Absorberschichten einen Absorptionsgrad um 95% bei gleichzeitigem Emissionsgrad um 5%.

Die in dieser Studie betrachtete Schicht beinhaltet jedoch noch eine weitere Funktion, nämlich die Eigenschaft, ihre optischen Werte bei einer definierten Temperatur zu verändern (zu verschlechtern). Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Schicht mit zusätzlichem Funktionsumfang, dieselben optischen Werte erreicht, wie eine herkömmliche Absorberschicht. Deshalb soll hier der Einfluss eines gegenüber 95% verringerten Absorptionsgrades bzw. gegenüber 5% erhöhten Emissionsgrades auf die Leistungsfähigkeit einer Solaranlage untersucht werden.

Dazu wird im Folgenden die relative Änderung des solaren Deckungsgrades SF_0 als Funktion von α und ε für die 4 unterschiedlichen Solarsysteme betrachtet:

$$SF_0 = \frac{\text{Energiebedarf} - \text{Zusatzenergie}}{\text{Energiebedarf}} \quad (4.1)$$

Um den, aufgrund der schlechteren optischen Werte, maximal akzeptablen Verlust an Systemleistung zu quantifizieren, kann, in Analogie zur Methode der beschleunigten Alterungsuntersuchungen an Solarabsorberschichten, das sogenannte „performance criterion“ [1 – 4] herangezogen werden:

$$pc = -\Delta\alpha + a \cdot \Delta\varepsilon \leq b \quad (4.2)$$

Dabei sind a und b anlagenspezifische Parameter. Solange das „performance criterion“ erfüllt ist, also $pc \leq b$ ist, ist der solare Deckungsgrad des Systems nicht unter 95% des Vergleichsystems (mit $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.05$) gefallen.

Mit SF_{0_0} ist nachfolgend derjenige solare Deckungsgrad bezeichnet, welcher mit den Referenzsystemen mit optimalen Schichteigenschaften $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.05$ erzielt wird.

4.1 Simulationsresultate

Sämtliche Simulationen wurden mit Polysun 4 [5] durchgeführt.

System 1a: WWGross

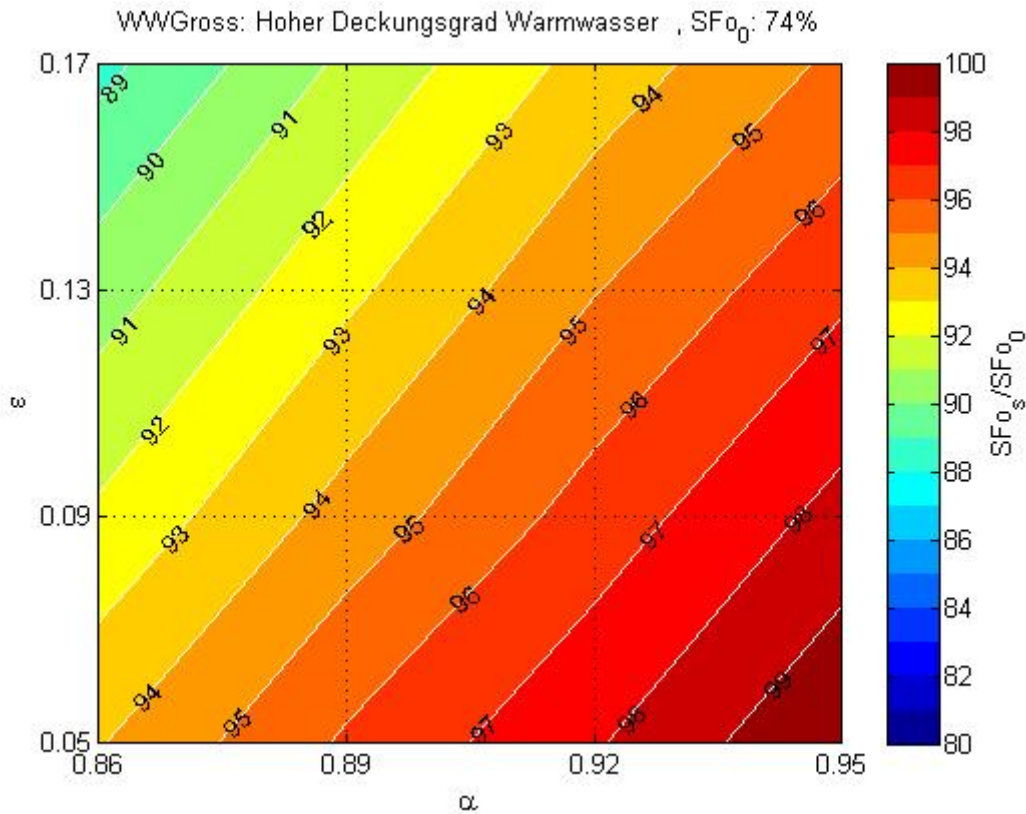


Abb. 4.1: Einfluss der optischen Schichteigenschaften auf den solaren Deckungsgrad SFo , bezogen auf einen SFo_0 von 74% bei $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.05$

Für das „performance criterion“ eines gross dimensionierten Solarsystems zur Warmwasserbereitung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$pc = -\Delta\alpha + 0.58 \cdot \Delta\varepsilon \leq 0.075$$

Dies bedeutet, dass z.B. eine Verringerung des Absorptionsgrades von 95% auf 87.5% bei einem unveränderten Emissionsgrad, bzw. eine Erhöhung des Emissionsgrades von 5% auf 18% bei unverändertem Absorptionsgrad der solare Deckungsgrad um 5% abnimmt.

Näherungsweise kann, im untersuchten Variationsbereich von α und ε mit einer Genauigkeit von besser als 7%, die Abnahme des solaren Deckungsgrades berechnet werden:

$$1 - SFo(\alpha, \varepsilon) / SFo_0(\alpha = 0.95, \varepsilon = 0.05) = -0.68 \cdot \Delta\alpha + 0.40 \cdot \Delta\varepsilon$$

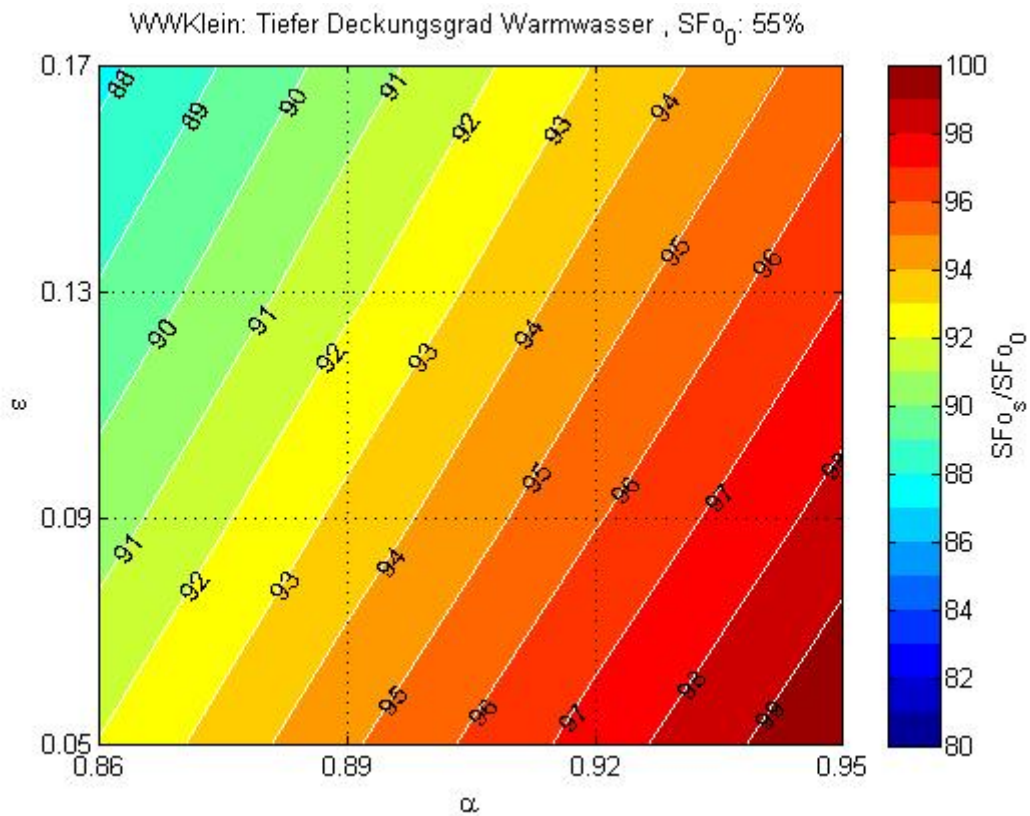
System 1b: WWKlein

Abb. 4.2: Einfluss der optischen Schichteigenschaften auf den solaren Deckungsgrad SF_o , bezogen auf einen SF_{o_0} von 55% bei $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.05$

Für das „performance criterion“ eines typisch dimensionierten Solarsystems zur Warmwasserbereitung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$pc = -\Delta\alpha + 0.46 \cdot \Delta\varepsilon \leq 0.060$$

Dies bedeutet, dass z.B. eine Verringerung des Absorptionsgrades von 95% auf 90.4% bei einem unveränderten Emissionsgrad, bzw. eine Erhöhung des Emissionsgrades von 5% auf 18% bei unverändertem Absorptionsgrad der solare Deckungsgrad um 5% abnimmt.

Näherungsweise kann, im untersuchten Variationsbereich von α und ε mit einer Genauigkeit von besser als 5%, die Abnahme des solaren Deckungsgrades berechnet werden:

$$1 - SF_o(\alpha, \varepsilon) / SF_{o_0}(\alpha = 0.95, \varepsilon = 0.05) = -0.88 \cdot \Delta\alpha + 0.37 \cdot \Delta\varepsilon$$

System 2a: RHGross

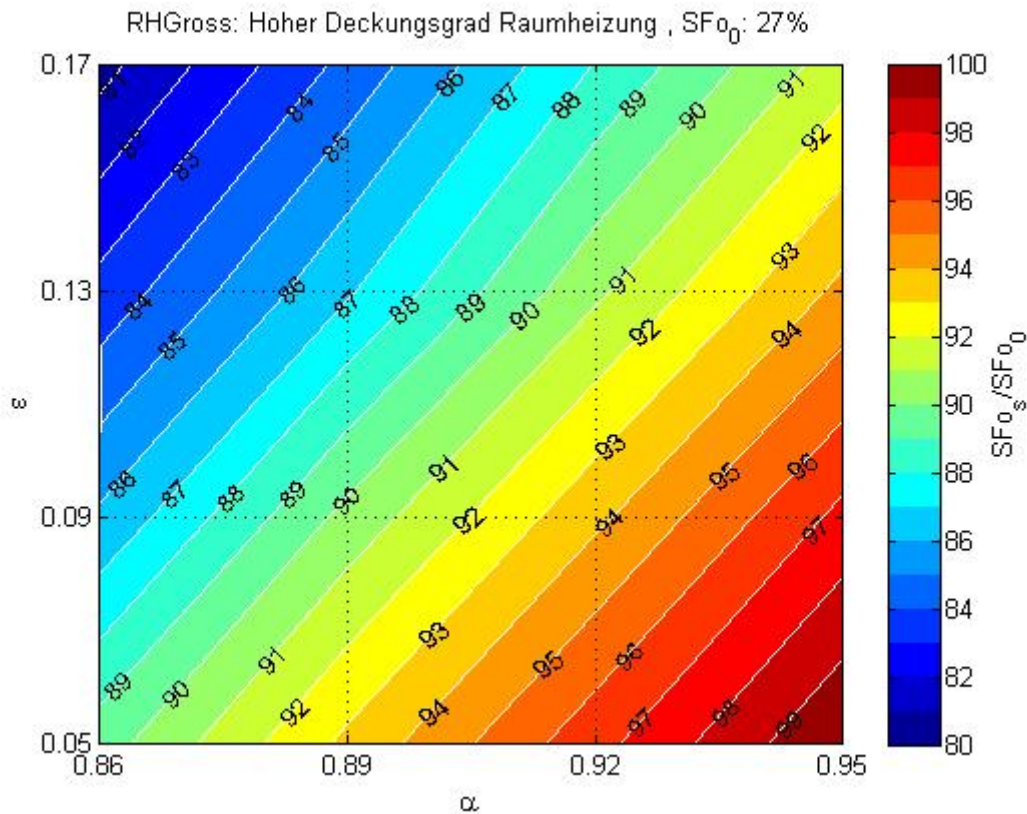


Abb. 4.3: Einfluss der optischen Schichteigenschaften auf den solaren Deckungsgrad SFo_s , bezogen auf einen SFo_0 von 27% bei $\alpha = 0.95$ und $\epsilon = 0.05$

Für das „performance criterion“ eines gross dimensionierten Solarkombisystems zur Warmwasserbereitung mit Heizungsunterstützung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$pc = -\Delta\alpha + 0.64 \cdot \Delta\epsilon \leq 0.045$$

Dies bedeutet, dass z.B. eine Verringerung des Absorptionsgrades von 95% auf 90.5% bei einem unveränderten Emissionsgrad, bzw. eine Erhöhung des Emissionsgrades von 5% auf 12% bei unverändertem Absorptionsgrad der solare Deckungsgrad um 5% abnimmt.

Näherungsweise kann, im untersuchten Variationsbereich von α und ϵ mit einer Genauigkeit von besser als 7%, die Abnahme des solaren Deckungsgrades berechnet werden:

$$1 - SFo(\alpha, \epsilon) / SFo_0(\alpha = 0.95, \epsilon = 0.05) = -1.19 \cdot \Delta\alpha + 0.72 \cdot \Delta\epsilon$$

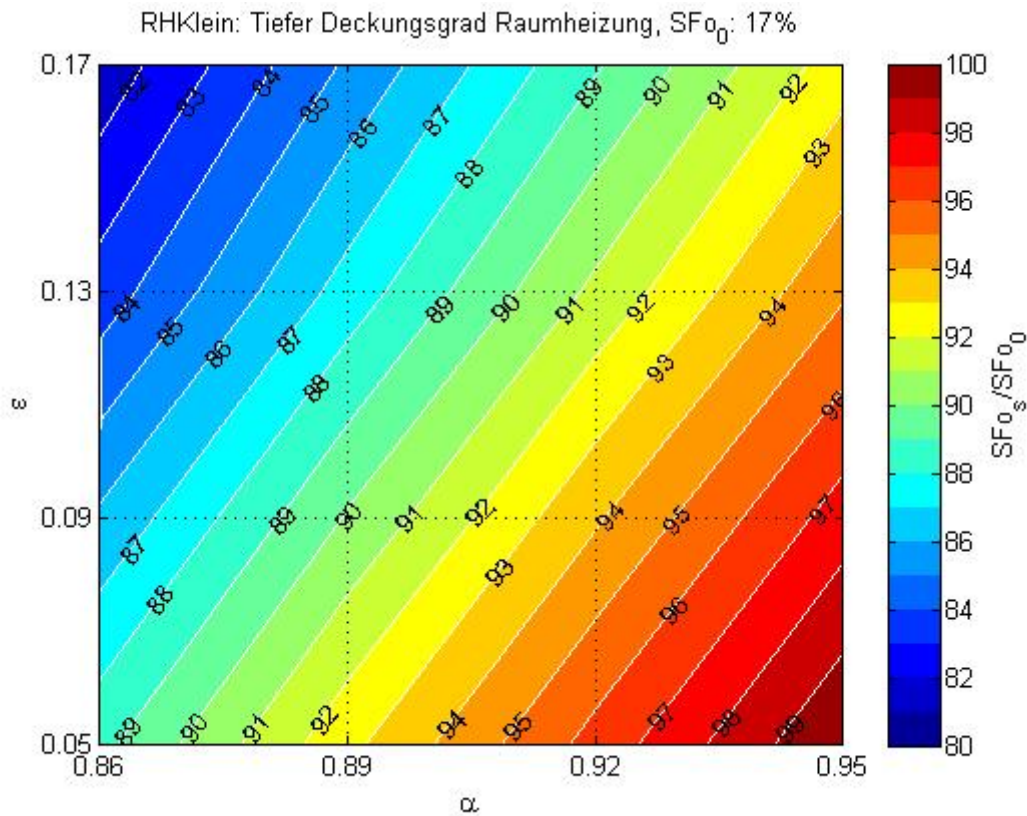
System 2b: RHKlein

Abb. 4.4: Einfluss der optischen Schichteigenschaften auf den solaren Deckungsgrad SF_o , bezogen auf einen SF_{o0} von 17% bei $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.05$

Für das „performance criterion“ eines typisch dimensionierten Solarkombisystems zur Warmwasserbereitung mit Heizungsunterstützung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$pc = -\Delta\alpha + 0.50 \cdot \Delta\varepsilon \leq 0.040$$

Dies bedeutet, dass z.B. eine Verringerung des Absorptionsgrades von 95% auf 91% bei einem unveränderten Emissionsgrad, bzw. eine Erhöhung des Emissionsgrades von 5% auf 13% bei unverändertem Absorptionsgrad der solare Deckungsgrad um 5% abnimmt.

Näherungsweise kann, im untersuchten Variationsbereich von α und ε mit einer Genauigkeit von besser als 4%, die Abnahme des solaren Deckungsgrades berechnet werden:

$$1 - SF_o(\alpha, \varepsilon) / SF_{o0}(\alpha = 0.95, \varepsilon = 0.05) = -1.25 \cdot \Delta\alpha + 0.62 \cdot \Delta\varepsilon$$

4.2 Mindestanforderung an eine thermochrome Absorberschicht im ungeschalteten Zustand

Wie bereits eingangs erwähnt, ist damit zu rechnen, dass eine thermochrome Absorberschicht bereits im ungeschalteten Zustand nur suboptimale optische Eigenschaften aufweist. Um die daraus resultierende Reduktion der Systemeffizienz beurteilen zu können, wurde auf das im Zusammenhang mit beschleunigten Alterungsuntersuchungen gebräuchliche „performance

criterion“ zurück gegriffen. Dabei wird eine Einbusse des solaren Deckungsgrades von 5% als zu akzeptierende Obergrenze angenommen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass dort diese Grenze während 25 Jahren Betrieb nicht überschritten werden darf. Dies würde bedeuten, dass für eine thermochrome Absorberschicht, welche im Neuzustand bereits an dieser Grenze liegt, im Laufe von 25 Jahren Betrieb keine weitere Degradation mehr zugelassen werden könnte. Daher sind in Tabelle 4.2 verschärfte Anforderungen an die Schicht zusammen gefasst, welche zu einer Verringerung des solaren Deckungsgrades von 1% führen würden.

Tab 4.1: Mindestanforderung an die optischen Eigenschaften im ungeschalteten Zustand (bei einer Verringerung des solaren Deckungsgrades um 5%)

	SF_{00}	α unverändert		ε unverändert		$pc(5\%)$
System	%	α	ε	α	ε	
WWGross	74	0.95	0.18	0.88	0.05	$-\Delta\alpha + 0.58 \cdot \Delta\varepsilon < 0.075$
WWKlein	55	0.95	0.18	0.90	0.05	$-\Delta\alpha + 0.46 \cdot \Delta\varepsilon < 0.060$
RHGross	27	0.95	0.12	0.91	0.05	$-\Delta\alpha + 0.64 \cdot \Delta\varepsilon < 0.045$
RHKlein	17	0.95	0.13	0.91	0.05	$-\Delta\alpha + 0.50 \cdot \Delta\varepsilon < 0.040$

Tab 4.2: Mindestanforderung an die optischen Eigenschaften im ungeschalteten Zustand (bei einer Verringerung des solaren Deckungsgrades um 1%)

	SF_{00}	α unverändert		ε unverändert		$pc(1\%)$
System	%	α	ε	α	ε	
WWGross	74	0.95	0.07	0.94	0.05	$-\Delta\alpha + 0.66 \cdot \Delta\varepsilon < 0.014$
WWKlein	55	0.95	0.07	0.94	0.05	$-\Delta\alpha + 0.50 \cdot \Delta\varepsilon < 0.011$
RHGross	27	0.95	0.06	0.94	0.05	$-\Delta\alpha + 0.66 \cdot \Delta\varepsilon < 0.008$
RHKlein	17	0.95	0.06	0.94	0.05	$-\Delta\alpha + 0.53 \cdot \Delta\varepsilon < 0.007$

Mit einem um 5% bzw. 1% verringerten solaren Deckungsgrad ist zwangsläufig eine Erhöhung des Zusatzenergiebedarfs verbunden. Dieser ist für beide Fälle in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Um die entstehenden Mehrkosten abschätzen zu können, wurde zum einen ein Energiepreis von 0.15 CFH/kWh, entsprechend den Kosten für konventionelle Energieträger, als auch 0.30 CHF/kWh, entsprechend den Kosten solarthermischer Energie, betrachtet.

Mit weiteren Ertragseinbussen, etwa aufgrund der schaltenden Eigenschaften, ist nicht zu rechnen (siehe Kap. 5)

Tab 4.3: Mehrkosten für die, durch suboptimale Absorberschichteigenschaften verursachten, Ertragseinbussen, während einer Betriebsdauer von 25 Jahren

	SFo₀	pc (5%)		pc (1%)	
System	%	Energiepreis 0.15 CHF/kWh	Energiepreis 0.30 CHF/kWh	Energiepreis 0.15 CHF/kWh	Energiepreis 0.15 CHF/kWh
WWKlein	55	245 CHF	490 CHF	49 CHF	98 CHF
RHKlein	17	608 CHF	1216 CHF	122 CHF	244 CHF

5 Thermochrome Absorberschicht als Überhitzungsschutz

5.1 Modellierung des thermochromen Kollektors

In Polysun4 sind Kollektoren mit thermochromen Absorberschichten noch nicht implementiert. Da Polysun4 jedoch modular aufgebaut ist, können Kollektoren mit schaltbaren Schichten durch eine geeignetes „Ersatzschaltbild“ dennoch simuliert werden:

Zwei Kollektoren werden parallel geschaltet. Einer der beiden Kollektoren hat die optischen Eigenschaften der ungeschalteten Schicht ($\alpha = 0.95$, $\varepsilon = 0.05$), der andere die (schlechteren) optischen Eigenschaften der geschalteten Schicht ($\alpha = \alpha_S$, $\varepsilon = \varepsilon_S$). Durch ein Mischventil wird während der Simulation immer nur einer der beiden Kollektoren durchströmt. Die Austrittstemperatur des Kollektors mit ungeschalteter Schicht bestimmt, welcher Kollektor durchflossen wird. Solange diese Temperatur unterhalb der Schaltgrenze von 120°C liegt, wird der ungeschaltete Kollektor durchflossen, und das System entspricht einer herkömmlichen Anlage mit leistungsfähigem Kollektorfeld. Sobald diese Schaltgrenze aber überschritten wird, wird nur noch der geschaltete Kollektor durchströmt, so dass der Ertrag des Systems aufgrund der schlechteren optischen Eigenschaften reduziert wird. Um ein schnelles hin- und herschalten während der Simulation auszuschliessen, wurde eine Hysterese von 5K eingeführt.

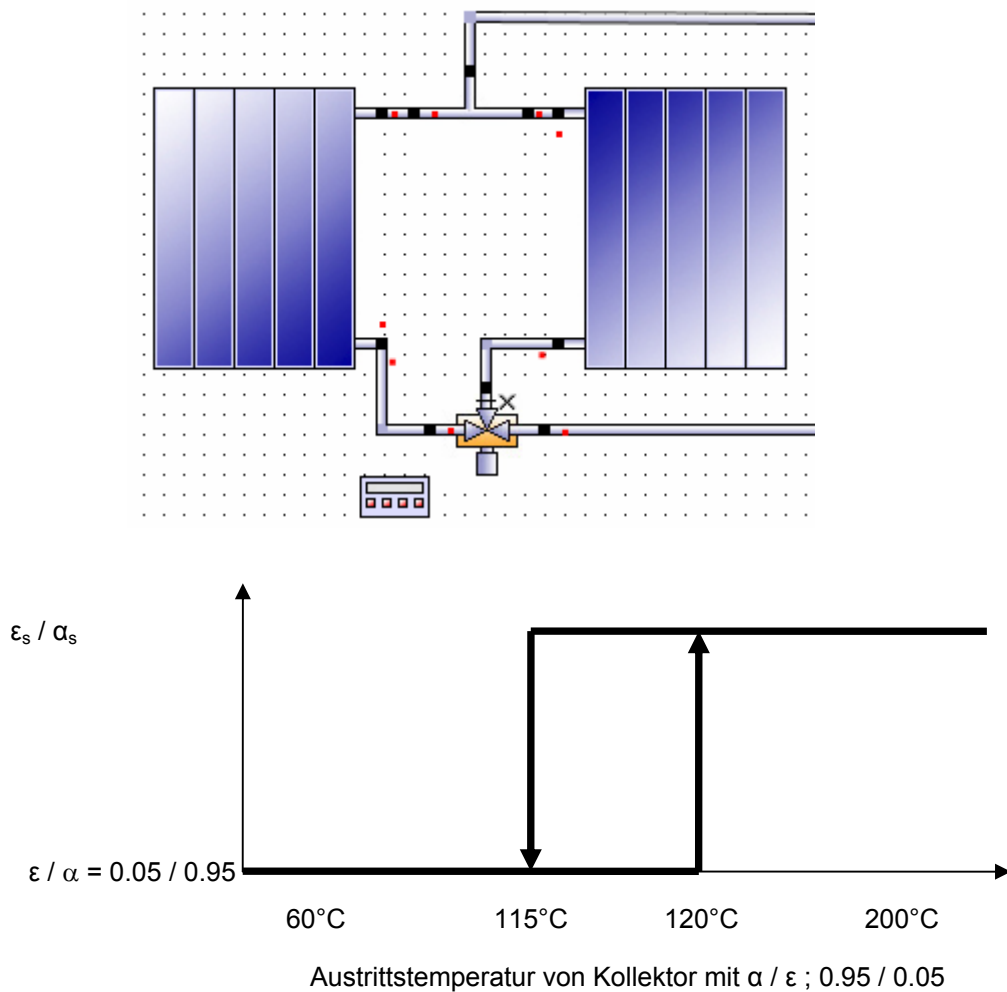


Abb. 5.1: Polysun 4 - Ersatzschaltbild des thermochromen Kollektors und dessen Schaltverhalten

5.2 Simulationsergebnisse

Energetisch betrachtet entsprechen die Simulationsergebnisse den Systemen ohne schaltende Eigenschaften. Dies liegt daran, dass beim Auftreten des Stagnationszustandes keine Energie mehr vom Kollektor an das System abgeführt wird und die Leistungsfähigkeit des Kollektors keinen Einfluss mehr auf den Solarertrag hat. Nur die Höhe der Stillstandtemperatur und deren Häufigkeitsverteilung wird noch von den optischen Schichteigenschaften bestimmt.

Im Folgenden sind, für die 4 betrachteten Solarsysteme, die Häufigkeitsverteilungen der Absorbertemperatur, in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften der Absorberschicht im geschalteten Zustand, während eines Jahres dargestellt.

Im ungeschalteten Zustand hat die Absorberschicht die optischen Eigenschaften $\alpha = 0.95$ und $\epsilon = 0.05$. Simulationen wurden durchgeführt für alle Kombinationen von $\alpha_s = 0.95, 0.85, 0.75, 0.65$ mit $\epsilon_s = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35$ im geschalteten Zustand. Die erste Kombination von $\alpha_s = 0.95$ mit $\epsilon_s = 0.05$ entspricht also einem herkömmlichen System ohne thermochrome Funktion der Absorberschicht. Die Häufigkeitsverteilung der Absorbertemperatur für dieses System ist immer im rechten unteren Diagramm der Abbildungen 5.2 – 5.5 dargestellt. Davon ausge-

hend nach links nimmt das Absorptionsvermögen mit jedem Diagramm in Schritten von $\Delta\alpha = 0.1$ ab, während nach oben das Emissionsvermögen in Schritten von $\Delta\varepsilon = 0.1$ zunimmt.

Wie Eingangs bereits erwähnt, wird aufgrund der Stabilität des Glykols 160°C als Obergrenze für einen wirksamen Übertemperaturschutz angesehen. Zur Quantifizierung der Anforderungen die an die optischen Werte der Schicht im geschalteten Zustand zu stellen sind, um einen zuverlässigen Überhitzungsschutz zu gewährleisten, wird das „switching criterion“ (sc) eingeführt:

$$sc = -\Delta\alpha + a \cdot \Delta\varepsilon \geq b \quad (5.1)$$

Dies bedeutet, dass die Änderung der optischen Eigenschaften $\Delta\alpha$ und $\Delta\varepsilon$, bezogen auf die Ausgangswerte $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.05$, Bedingung (5.1) erfüllen müssen, um den Kollektor vor Überhitzung zu schützen.

System 1a: WWGross

Beschichteter Kollektor, Histogramme der Temperaturverteilung / Anlage: WWGross

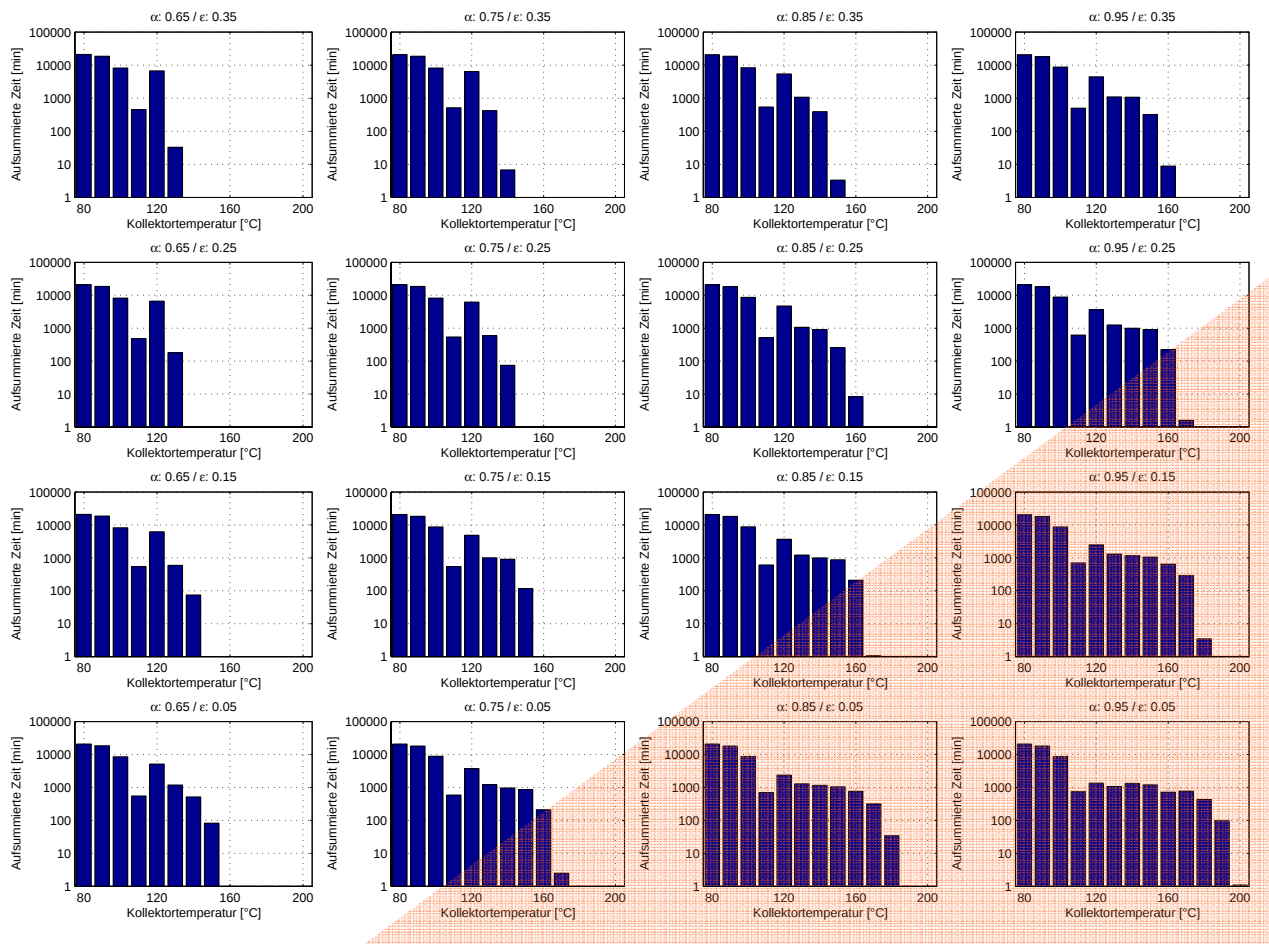


Abb. 5.2: Histogramme der Absorbertemperatur während eines Jahres für alle Kombinationen von α_s und ε_s für ein gross ausgelegtes System zur Warmwasserbereitung. Das Diagramm rechts unten entspricht einem herkömmlichen System mit Kollektor ohne thermochromen Absorber. Der rot hinterlegte Bereich bietet keinen ausreichenden Überhitzungsschutz.

Für einen hinreichenden Überhitzungsschutz ist folgendes „switching criterion“ gefordert:

$$sc = -\Delta\alpha + \Delta\varepsilon \geq 0.2$$

System 1b: WWKlein

Beschichteter Kollektor, Histogramme der Temperaturverteilung / Anlage: WWKlein

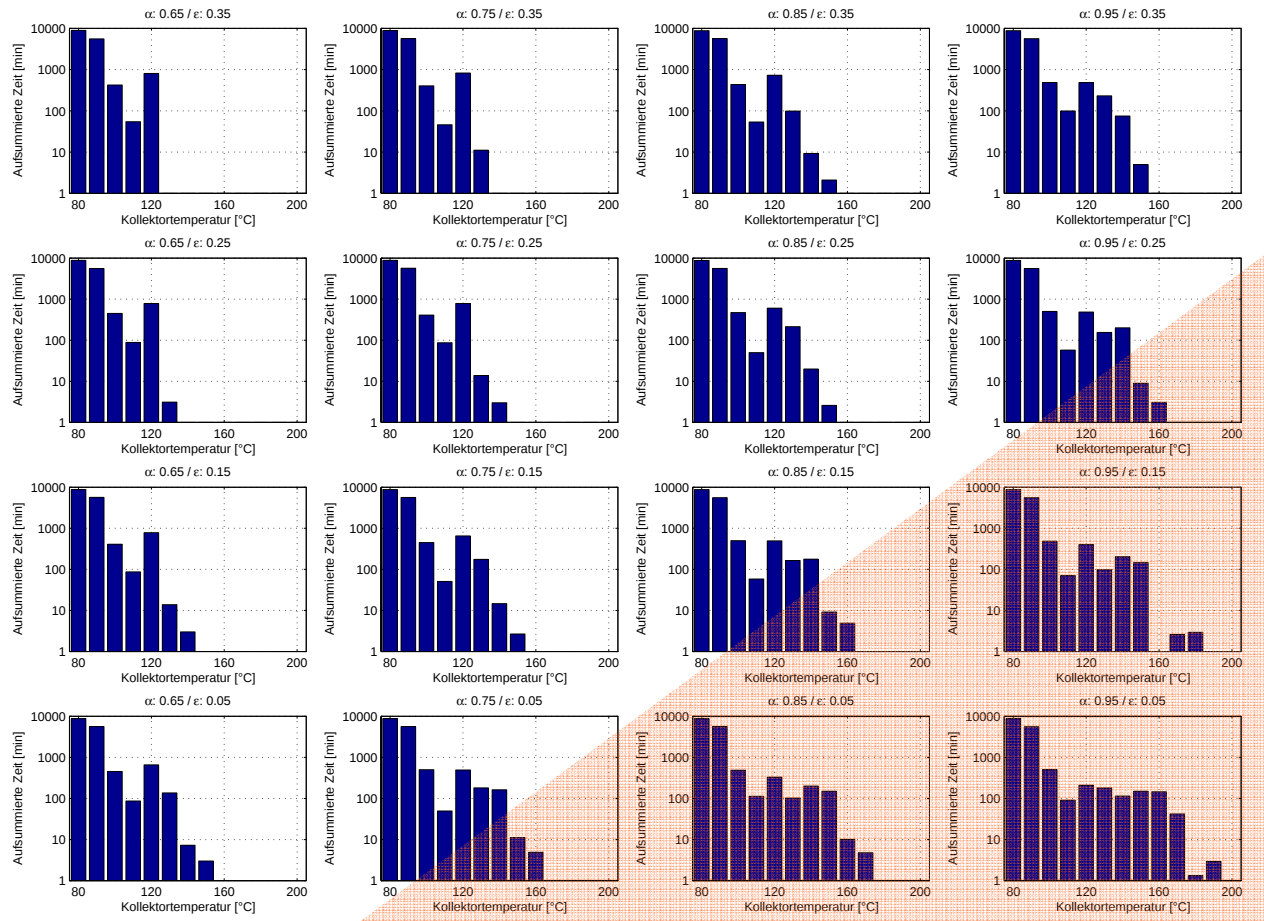


Abb. 5.3: Histogramme der Absorbentemperatur während eines Jahres für alle Kombinationen von α_s und ε_s für ein typisch ausgelegtes System zur Warmwasserbereitung. Das Diagramm rechts unten entspricht einem herkömmlichen System mit Kollektor ohne thermochromen Absorber. Der rot hinterlegte Bereich bietet keinen ausreichenden Überhitzungsschutz.

Für einen hinreichenden Überhitzungsschutz ist folgendes „switching criterion“ gefordert:

$$sc = -\Delta\alpha + \Delta\varepsilon \geq 0.2$$

System 2a: RHGross

Beschichteter Kollektor, Histogramme der Temperaturverteilung / Anlage: RHGross

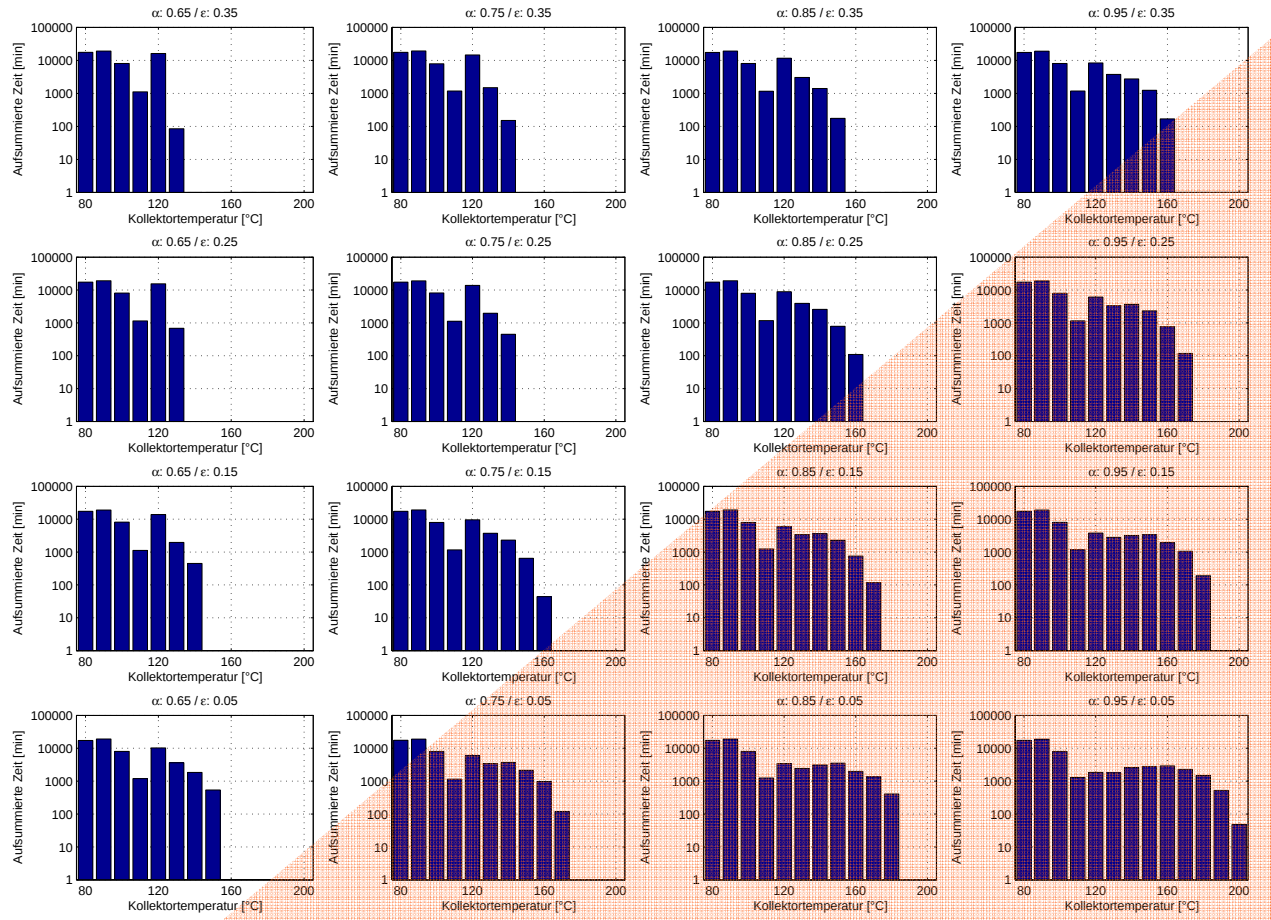


Abb. 5.4: Histogramme der Absorbtemperatur während eines Jahres für alle Kombinationen von α_s und ϵ_s für ein gross ausgelegtes System zur Warmwasserbereitung mit Heizungsunterstützung. Das Diagramm rechts unten entspricht einem herkömmlichen System mit Kollektor ohne thermochromen Absorber. Der rot hinterlegte Bereich bietet keinen ausreichenden Überhitzungsschutz.

Für einen hinreichenden Überhitzungsschutz ist folgendes „switching criterion“ gefordert:

$$sc = -\Delta\alpha + 0.8 \cdot \Delta\epsilon \geq 0.25$$

System 2b: RHKlein

Beschichteter Kollektor, Histogramme der Temperaturverteilung / Anlage: RHKlein

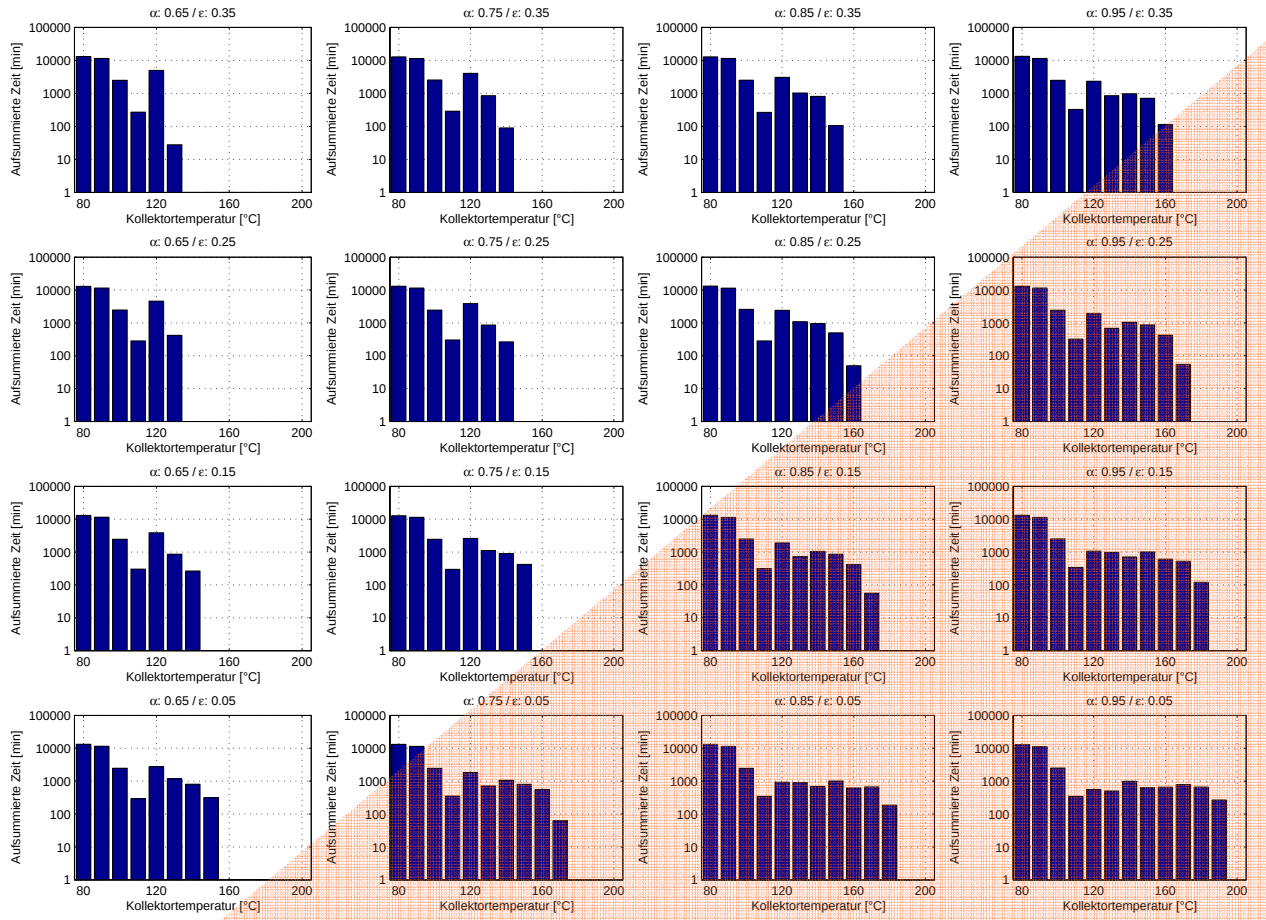


Abb. 5.5: Histogramme der Absorbertemperatur während eines Jahres für alle Kombinationen von α_s und ε_s für ein typisch ausgelegtes System zur Warmwasserbereitung mit Heizungsunterstützung. Das Diagramm rechts unten entspricht einem herkömmlichen System mit Kollektor ohne thermochromen Absorber. Der rot hinterlegte Bereich bietet keinen ausreichenden Überhitzungsschutz.

Für einen hinreichenden Überhitzungsschutz ist folgendes „switching criterion“ gefordert:

$$sc = -\Delta\alpha + 0.8 \cdot \Delta\varepsilon \geq 0.25$$

5.3 Diskussion

Aus den Simulationsrechnungen folgt, dass für Solaranlagen zur reinen Warmwassererwärmung ein kleinerer Schalhub erforderlich ist, um die Anlage vor Überhitzung zu schützen, als für solare Kombisysteme. Während für Warmwassersysteme die notwendige Änderung im Absorptionsgrad und im Emissionsgrad ebenbürtig ist, ist für Kombisysteme eine grössere Änderung des Emissionsgrades im Vergleich zum Absorptionsgrad nötig. Daraus liesse sich folgern, dass eine als Überhitzungsschutz fungierende thermochrome Absorberschicht eher mit Hinblick auf einen schaltenden Absorptionsgrad entwickelt werden sollte.

Berücksichtigt man jedoch die naheliegende Annahme, dass eine den Absorptionsgrad schaltende Schicht auch einen suboptimalen ungeschalteten Absorptionsgrad, bzw. eine den Emissionsgrad schaltende Schicht einen suboptimalen ungeschalteten Emissionsgrad aufweist, so ändert sich das Bild. Wie aus dem „performance criterion“ ersichtlich ist (siehe Tab. 5.1), ist der Einfluss des Absorptionsgrades auf den solaren Deckungsgrad für alle 4 Anlagentypen in etwa doppelt so stark zu gewichten, als der Einfluss des Emissionsgrades. Auf die Stagnationstemperatur ist der Einfluss dieser beiden optischen Größen jedoch beinahe gleichwertig (siehe „switching criterion“ in Tab. 5.1). Daraus folgt, dass die Entwicklung einer thermochromen Solarabsorberschicht mit schaltendem ε derjenigen mit schaltendem α vorzuziehen ist.

Tab 5.1: „Performance criterion“ und „switching criterion“ für die 4 betrachteten Anlagentypen

System	SFo [%]	performance criterion, pc	switching criterion, sc
WWGross	74	$-\Delta\alpha + 0.58 \cdot \Delta\varepsilon < 0.075$	$-\Delta\alpha + \Delta\varepsilon \geq 0.20$
WWKlein	55	$-\Delta\alpha + 0.46 \cdot \Delta\varepsilon < 0.060$	$-\Delta\alpha + \Delta\varepsilon \geq 0.20$
RHGross	27	$-\Delta\alpha + 0.64 \cdot \Delta\varepsilon < 0.045$	$-\Delta\alpha + 0.80 \cdot \Delta\varepsilon \geq 0.25$
RHKlein	17	$-\Delta\alpha + 0.50 \cdot \Delta\varepsilon < 0.040$	$-\Delta\alpha + 0.80 \cdot \Delta\varepsilon \geq 0.25$

6 Andere Überhitzungsschutzmassnahmen

6.1 Solarabsorberschicht mit suboptimalen optischen Eigenschaften

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erörtert, kann eine geeignete Wahl der (festen) optischen Werte der Solarabsorberschicht, eine Überhitzungsschutzmassnahme darstellen. Dazu muss ein Absorber, gegenüber dem hier verwendeten Referenzabsorber mit $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.05$, die um $\Delta\alpha$ bzw. $\Delta\varepsilon$ derart reduzierten optischen Werte besitzen, mit welchen das „switching criterion“ erfüllt wird. Wie in Kapitel 5.3 festgestellt, wird dazu vorzugsweise der Emissionsgrad erhöht. Dies bedeutet, dass ein Kollektor mit den optischen Eigenschaften $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.25$ für Warmwassersysteme, und einer mit $\alpha = 0.95$ und $\varepsilon = 0.31$ für Kombisysteme, einen ausreichenden Überhitzungsschutz darstellen würde.

Der Vorteil dieser Massnahme besteht darin, dass keine direkten Mehrkosten gegenüber einem herkömmlichen System entstehen. Die generelle Verschlechterung des Kollektors, führt jedoch zu Ertragseinbussen, welche sich in einem erhöhten Zusatzenergiebedarf widerspiegeln. Dieser zusätzlich benötigte Zusatzenergiebedarf ΔQ_{aux} kann mit den in Kapitel 4 gefundenen Relationen abgeschätzt werden (siehe Tab. 6.1). Wie bereits in Abschnitt 3 erläutert, ist hier der Anlagentyp „Gross“ mit geringem spezifischen Ertrag nicht relevant.

Tab 6.1: Während einer Betriebszeit von 25 Jahren zusätzlich aufzuwendender Zusatzenergiebedarf ΔQ_{aux} bei Verwendung eines Absorbers mit erhöhtem Emissionsgrad ($\varepsilon = 0.25$ für Warmwasser- und $\varepsilon = 0.31$ für Kombisysteme) als Überhitzungsschutz

	Referenzkollektor ($\alpha = 0.95$, $\varepsilon = 0.05$)			Kollektor m. Überhitzungsschutz ($\alpha = 0.95$, $\varepsilon = 0.25$ bzw. 0.31)			
System	SF ₀ [%]	Q _{demand} [kWh]	Q _{aux} [kWh]	SF ₀ [%]	Q _{aux} [kWh]	Mehrkosten	
						Energiepreis 0.15 CHF/kWh	Energiepreis 0.30 CHF/kWh
<i>WWKlein</i>	55	59500	26800	51	29200	360 CHF	720 CHF
<i>RHKlein</i>	17	493000	412000	14	425000	1950 CHF	3900 CHF

6.2 Regelungs- und systemtechnische Überhitzungsschutzmassnahmen

Die Reihenfolge der im Folgenden beschriebenen Massnahmen richtet sich, soweit als sinnvoll, nach deren Einfachheit und Wirkung. Die einfacheren, kostengünstigeren aber nicht unbedingt wirksameren Massnahmen stehen in der Tendenz oben, wobei die Wirksamkeit einer Massnahme nicht absolut beurteilt werden kann, denn der Effekt einer Massnahme hängt immer vom der Ausgestaltung der Massnahme und von weiteren Einflussfaktoren ab, wie z. B. Dimensionierung und Benutzerverhalten.

6.2.1 Präventive Stagnation (auch „passives Kühlen“)

Beschrieb: Der Kollektorkreis wird ausser Betrieb genommen, wenn der Speicherfühler der Solaranlage nahezu die maximal erlaubte Temperatur misst. Dadurch wird Energieeintrag verhindert, wenn er nicht als ausreichend wichtig erachtet wird. Stellt der Kollektorfühler eine Temperatur in der Nähe des Siedepunktes – aber noch darunter – fest, wird der Kollektorkreis eingeschaltet. Dadurch können die Stunden mit unzulässig hohen Kollektortemperaturen reduziert werden.

Nachteil: Beschränkte Wirkung. Ertragseinbussen.

Bemerkung: Es handelt sich um eine einfache Massnahme, die v. a. in Deutschland eingesetzt wird oder dort eingesetzt wurde. Ein kleiner Nachteil dieser speziellen Betriebsbedingungen besteht darin, dass der Betrieb des Solarkreises für den Anwender kompliziert ist, was zu Rückfragen führen kann. Es ist nicht sicher, ob mit dieser Massnahme das Glykol geschont wird: Das Fluid wird zwar weniger lange klar unzulässig hohen Temperaturen ausgesetzt, dafür wird sehr viel mehr Glykol während längerer Zeit relativ hohen Temperaturen ausgesetzt.

6.2.2 Nächtliches Rückkühlen (auch „aktives Kühlen“)

Beschrieb: Der Kollektorkreis wird in Betrieb genommen, wenn der Speicherfühler der Solaranlage eine hohe und der Kollektorfühler eine tiefere Temperatur misst. Hierbei handelt es sich um eine in der Schweiz seit Langem besonders beliebte Massnahme.

Nachteil: Mehrverbrauch an elektrischer Hilfsenergie. Ertragseinbussen.

Bemerkung: Eine einfache Massnahme, die sich v. a. in der Schweiz grosser, wenn auch vermutlich abnehmender Beliebtheit erfreut. Je nach Systemtyp und Dimensionierung ist die Wirksamkeit des nächtlichen Rückkühlens zwischen sehr beschränkt und ausreichend. Bei standardisierten Kleinanlagen könnten das System und die Steuerung des Rückkühlens so ausgelegt werden, dass Rückkühlen als Überhitzungsschutz sicher ausreicht.

6.2.3 Auskühlen des Speichers mittels Kesselladekreis

Beschreibung: Der Kesselladekreis wird in Betrieb genommen, wenn der Speicherinhalt nahe an der Maximaltemperatur ist.

Nachteile: Mehraufwand bei Installation und Planung. Machbarkeit nicht immer gegeben, Wirkung nicht standardisierbar und oft beschränkt.

Bemerkung: In der Schweiz ist diese Massnahme kaum im Gespräch, in Deutschland wurde sie z. T. als Option empfohlen.

6.2.4 Thermische Ablasssicherung (Kühlen mit Kaltwasser)

Beschreibung: Warmwasser wird aus dem Tank entnommen und Kaltwasser nachgefüllt, bevor der Speicher seine Maximaltemperatur erreicht. Der Kollektorkreis bleibt in Betrieb und Stagnation wird vermieden.

Nachteile: Warmwasser muss entsorgt werden, was normalerweise einen Anschluss an das Entsorgungsnetz verlangt. Erhöhter Trinkwasserverbrauch.

Bemerkung: In der Schweiz ist diese Massnahme für Solaranlagen mit gepumptem Solarkreis kaum im Gespräch. Sie ist Standard bei Thermosiphonsystemen, dort allerdings v. a. zum Schutz des Speichers vor Überhitzung. Ebenfalls wird die thermische Ablasssicherung bei Holzfeuerungen eingesetzt (deshalb die Bezeichnung „Ablasssicherung“).

6.2.5 Geringer Druck im Kollektorkreis

Beschreibung: Der Druck im Kollektorkreis wird so klein als möglich gehalten, das übliche Konzept des Kollektorkreises aber nicht modifiziert (druckbeaufschlagter, geschlossener Kollektorkreis mit – in der Regel – einem Membranausgleichsgefäss). Durch den geringen Druck ist die Siedetemperatur niedrig. Die Wärmeträgerflüssigkeit verdampft bei sehr moderaten Temperaturen.

Nachteile: Bei ausgeprägter low-flow Technik ist das Konzept begrenzt anwendbar. Es gibt mehr Aufwand bei der Installation bzw. der Inbetriebsetzung. (Der Druck im Kollektorkreis und u. U. auch der Vordruck des Expansionsgefässes sollte u. U. entsprechend der Anlagenhöhe angepasst werden.) Risiko von Dampfschlägen bei Betrieb, im Fall falscher Wahl des Anlagendrucks.

Bemerkung: Diese Massnahme wird kaum angewendet, obschon plausibel ist, dass dadurch die Problematik stark abgeschwächt wird. Das Glykol verdampft schon klar unterhalb der Zersetzungsgrenze. Die zögerliche Anwendung dieser Massnahme könnte u. a. darin begründet sein, dass deren Wirksamkeit kaum untersucht oder jedenfalls nicht ausreichend belegt ist. Von

den in diesem Kapitel erwähnten Möglichkeiten ist dies die erste, die nicht Ausmass oder Dauer hoher Kollektortemperaturen reduziert. Sie vermeidet, dass die gefährdete Wärmeträgerflüssigkeit in den heissen Kollektoren in flüssigem Zustand verbleibt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die kleine Menge an Glykol, die als überhitzter Dampf im Kollektor verbleibt und dort klar unzulässigen Temperaturen ausgesetzt ist, kein Problem darstellt. Die Tatsache, dass Vakuumröhrenkollektoren (VRK) Stagnationstemperaturen über 300°C erreichen, aber die Glykolverzersetzung nicht deutlich dramatischer ist als bei Flachkollektoren, stützt diese Annahme.

6.2.6 Vorteilhaftes Absorberdesign und vorteilhafte Kollektorverschaltung („drain-down“ oder „steam-down“)

Beschreibung: Absorber und Kollektoren sind so konstruiert und verschaltet, dass sich Dampf im obersten Bereich des Kollektorfeldes bildet, der das Frostschutzgemisch im noch flüssigen Zustand und entsprechend moderater Temperatur nach unten aus den Kollektoren drückt. In der Schweiz wird dieses Konzept z. T. als „drain-down“ oder „steam-down“ bezeichnet.

Nachteile: Ausser dem Absorberdesign, das leicht standardisiert werden kann, muss in allen Installationen darauf geachtet werden, dass die Verschaltung der Kollektoren den Anforderungen gerecht wird. Bei der Verschaltung mehrerer Kollektoren nebeneinander verlangt dies eine Kollektorbauform mit je zwei Anschlüssen unten, einer entsprechend grossen Zahl von Kollektorverbindungselementen und dem entsprechenden Aufwand bei der Installation.

6.2.7 In Stillstand druckloser Kollektorkreis

Beschreibung: Im Stillstand ist der Druck im Kollektorfeld sehr klein, u. U. sogar unter dem atmosphärischen Druck. Ev. ist der Kollektorkreis gegen Atmosphäre offen. Im Betrieb baut die Solarkreispumpe einen ausreichend hohen Druck auf, dass im Betrieb Sieden im Kollektorfeld vermieden wird. Das Wärmeträgerfluid kann bei sehr geringem Druck und entsprechend moderater Temperatur verdampfen.

Nachteile: Das Konzept verlangt in der Regel nach einer besonderen Pumpe und einem Überströmventil oder einer Drossel um den Druck im Betrieb aufzubauen.

6.2.8 Heatpipe Kollektoren

Beschreibung: Heatpipes (Wärmerohre) können, durch entsprechende Wahl des Füllmediums und -drucks, so ausgelegt werden, dass bei einer gewissen Temperatur der ganze Inhalt dampfförmig ist und fast keine Wärme mehr an das (Frostschutzgemisch führende) Sammelrohr übertragen wird. Der Nachteil dieser Art der Temperaturbegrenzung ist, dass der Übergang von guter zu schlechter Wärmeübertragung stetig ist, und nicht in einem eng begrenzten Temperaturintervall erfolgt. Daraus resultiert ein Minderertrag.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Heatpipe-Mechanismus mechanisch zu unterbinden, indem ein thermisch gesteuertes Ventil den Übergang vom Verdampferrohr zum Kondensator verschliesst. Eine solche Methode ist von der Firma Thermomax patentiert (Memotron). Es können unterschiedliche Temperaturniveaus gewählt werden.

Nachteile: Heatpipes werden bisher in der solaren Wärmetechnik praktisch ausschliesslich in Vakuumröhren eingesetzt, so dass die Nachteile der Vakuumröhrentechnik (Kosten und Hagelschlag) relevant sind.

6.2.9 Belüftung des Kollektorgehäuses

Beschreibung: Bei hoher Temperatur im Kollektorkreis wird das Gehäuse des Kollektors belüftet. Es kann die Vorderseite oder die Hinterseite des Absorbers gekühlt werden.

Nachteile: Zusätzlicher Aufwand an jedem Kollektor wegen der Mechanik zum (fremdenergiefreien) Antrieb der Belüftungsöffnung, z.B. mittels Bimetallelementen. Eine wesentliche Komplikation dürfte darin bestehen, dass die Möglichkeit von Regen bei noch hoher Temperatur, also noch offen stehender Öffnung, berücksichtigt werden muss (bei Belüftung nach oben bzw. vorne) oder dass eine ggf. angrenzende Dachfläche und deren Wärmedämmung hohen Temperaturen ausgesetzt wird oder die Belüftung behindert (bei Belüftung nach hinten bzw. unten). Es gibt kaum Erfahrung oder technisch ausgereifte Lösungen. Es gibt jedoch Forschung und Entwicklung, insbesondere in Norwegen im Zusammenhang mit Kollektoren mit Abdeckungen und Absorbern aus Kunststoff [6].

6.2.10 Andere frost- und temperaturresistente Wärmeträgerfluide

6.2.10.1 Luft

Beschreibung: Statt Wasser wird Luft eingesetzt.

Nachteile: Bei reinen Warmwasseranlagen ist Luft als Wärmeträger wenig nahe liegend. Da die Heiztechnik im Mitteleuropa auf Wasser als Wärmeträger setzt, ist die Akzeptanz der Bauherrschaften und des Gewerbes für Luftheizsysteme wenig ausgeprägt. Dies könnte sich aber bei einer zunehmenden Verbreitung von Passivhäusern mittelfristig ändern.

Bemerkung: Solare Kombianlagen in den USA waren – als es sie noch gab – mehrheitlich Luftkollektorsysteme. Nach Expertenmeinung, würde bei einer Renaissance der solaren Heiztechnik in den USA erneut diese Technik eingesetzt.

6.2.10.2 Ethylenglykol

Beschreibung: Es wird das etwas temperaturbeständigere Ethylenglykol an Stelle des normalerweise verwendeten Propylenglykol eingesetzt.

Nachteile: Anders als Propylenglykol, das u. a. in Haarwaschmitteln eingesetzt wird, ist Ethylenglykol nicht giftklassenfrei. Es ist eine das Problem reduzierende, aber keine das Problem lösende Massnahme, da die Temperaturfestigkeit auch bei Ethylenglykol deutlich unter der Stagnationstemperatur von Sonnenkollektoren liegt.

Bemerkung: Nur sehr wenige Firmen setzen Ethylenglykol in Solaranlagen ein. (In der Schweiz: Hoval). Die Verbesserung gegenüber Propylenglykol ist kaum belegt oder quantifiziert und jedenfalls wenig bekannt. Es werden zum Teil spezielle Solarfluide auf Glykolbasis angeboten, deren angebliche Vorteile in der Fachwelt aber kontrovers diskutiert werden.

6.2.10.3 Spezielle Flüssigkeiten: Thermoöle, Silikonöle, Alkohole, ionische Flüssigkeiten

Beschreibung: Ausser Glykol-Wassergemische, Wasser und Luft gibt es eine Reihe von weiteren Flüssigkeiten, die prinzipiell für den Einsatz in Kollektorkreisen in Frage kommen.

Nachteile: Alle aufgeführten Flüssigkeiten (mineralische Thermoöle, Silikonöle, Alkohole, ionische Flüssigkeiten) haben gegenüber Wasser und Frostschutzgemisch etwas schlechtere thermische Eigenschaften. Diese reduzieren die Wärmeübertragung in Wärmetauscher und Absorber, was zu Ertragseinbussen von wenigen Prozent führen kann. Allerdings ist die Wärmeübertragung weit besser als bei Luft, so dass dieser Nachteil nicht überbewertet werden darf und natürlich, wie bei Luftsystemen, durch anlagenseitige Anpassungen ausgeglichen werden kann. Ausserdem sind sie alle „Speziellen Flüssigkeiten“ vergleichsweise unangenehm zu handhaben. Bei Alkoholen ist der wichtigste Nachteil die Entzündbarkeit und bei ionische Flüssigkeiten (flüssige, konzentrierte Salze) gibt es wenig Erfahrung und Bedenken wegen Korrosionsfolgen. Silikonöl ist teuer und gegen Silikonöl ist schwierig abzudichten.

6.2.11 Wasser statt Frostschutzgemisch

6.2.11.1 Drainback Technik

Beschreibung: Bei Anlagenstillstand fließt das Wärmeträgerfluid durch Schwerkraft angetrieben zurück aus dem Kollektorfeld in ein Auffanggefäß (oder Drainbackgefäß). Das in den Kollektoren frei werdende Volumen wird durch Luft aus dem Drainbackgefäß gefüllt. Bei Inbetriebnahme des Kollektorkreises wird dieser wieder mit Wärmeträgerfluid aus dem Drainbackgefäß gefüllt. Es wird z. T. Wasser als Wärmeträger verwendet, z. T. kommt auch Frostschutzgemisch zum Einsatz, das dann nur eine sehr geringe thermische Belastung erfährt. Eine ausführliche Beschreibung der Drainbacktechnik findet sich in [7].

Nachteile: Die im Freien verlegten Leitungen müssen unbedingt (bei Wasser) bzw. mit Vorteil (bei Wasser-Glykol) vom und zum höchsten Punkt des Solarkreises, steigend verlegt werden. Dies gilt auch für alle Rohre in den Kollektoren. Zum Befüllen der Anlage muss die Solarkreispumpe in der Lage sein, die Anlagenhöhe zu überwinden. Es wird in der Regel ein Drainbackgefäß verwendet.

Bemerkung: Die Technik ist alt. Sie erfreut sich zwar zunehmender Beliebtheit, wird aber im Vergleich zur üblichen Technik immer noch nur spärlich eingesetzt. Die Nachteile werden dadurch sehr weitgehend ausgeglichen, dass der Wärmeübergang beim Einsatz von Wasser verbessert wird. Bei Kombianlagen kann auf den Solarkreiswärmetauscher verzichtet werden. Beides steigert den Solarertrag. Bei drucklosen Tanks von Kombianlagen wird kein spezielles Drainbackgefäß eingesetzt, da der Speicher selbst die Funktion des Drainbackgefäßes übernimmt. Eine Wertschätzung und Adoption der Technik wird jedoch durch die Bereitschaft zu Innovation und der Sorgfalt des Handwerks weit stärker bestimmt, als durch theoretische Erwägungen.

6.2.11.2 Wasser im Kollektorkreis (AquaSystem)

Beschreibung: Wasser ersetzt das Frostschutzgemisch im Kollektor. Um den Kollektorkreis vor Frostschäden zu bewahren, wird bei Frostbedingungen Wärme vom Kombi-Wärmespeicher, bzw. Wassererwärmer eingebracht: Die Solarkreispumpe schaltet so lange und so oft wie nötig

ein. Wenn die Schaltkriterien für die Frostschutzsicherheit optimiert sind und die Kollektoren eine geringe Wärmeverlustrate aufweisen (wie dies bei Vakuumröhrenkollektoren, VRK, der Fall ist), ist der frostschutzbedingte Wärmeverlust gering.

Nachteile: Das Konzept wurde erst vor wenigen Jahren zur Marktreife entwickelt und vor kurzem auch patentiert. Es beruht bisher ausschliesslich auf Vakuumröhren, so dass die Nachteile der Vakuumröhrentechnik (Kosten, Anfälligkeit gegen Hagelschlag) relevant sind.

Bemerkungen: Die Firma Paradigma ist mit diesem Konzept (AquaSystem) sehr erfolgreich. Es dürfte bei der Verwendung von Kollektoren, die nach dem Heatpipe-Prinzip funktionieren, recht problemlos umsetzbar sein.

6.2.12 Wärmesenken an Kollektorkreis, Kollektor oder Speicher

Eine nahe liegende Möglichkeit zur Vermeidung von Stagnation besteht darin, eine weitere Wärmesenke einzurichten um im Bedarfsfall Wärme abzuführen. Es ist im Prinzip am einfachsten, solche Senken an den Kollektorkreis bzw. an die Pumpengruppe des Solarkreises anzuschliessen. Allerdings ist das keine gut standardisierbare Lösung, was bei Kleinanlagen, bei denen Standardisierung wichtig ist, einen Nachteil darstellt. Diese Möglichkeit wird im nächsten Abschnitt erörtert. Anschliessend wird die Möglichkeit einfacher Wärmesenken an Speichern erörtert, die sich besonders für kleine Kompaktanlagen zur Wassererwärmung eignen (bzw. eignen würden!). Schliesslich wird auf die Möglichkeit hingewiesen, Wärmesenken mit einem einzelnen Kollektor oder im Zusammenhang mit der Kollektorfeldverrohrung zu konzipieren.

6.2.12.1 Zusätzliche Senke am Solarkreis mit Sommernutzung der Wärme

Beschreibung: Neben den im Folgenden beschriebenen spezifischen Massnahmen, die ausser dem Schutz vor Überhitzung des Frostschutzmittels keinen Nutzen erzeugen, kann eine zusätzliche Wärmesenke in manchen Fällen (wenigstens moderat) nutzbringend sein. Dies ist z. B. beim Anschluss eines Pools, bei der Holztrocknung, der Versorgung eines Trockenraumes zur Wäschetrocknung oder bei der Einspeisung in die Gebäudefundation (Trocknung, Schutz vor aufsteigender Feuchte) der Fall. Prinzipiell kann die Wärme dem Kollektorkreis oder dem Speicher entnommen werden. Ist die Wärmesenke ausreichend kräftig, ist es vorteilhaft, die zusätzliche Wärmesenke direkt an den Kollektorkreis anzuschliessen. Ein aktiv angesteuertes oder ein thermostatisch wirkendes 2- oder 3-Wege Umschaltventil schaltet dann die zusätzliche Wärmequelle entweder alternativ, seriell oder parallel zum Solarwärmetauscher, eine zusätzliche Pumpe wird nicht benötigt.

Nachteile: Zusätzlicher Aufwand für Installation und Planung.

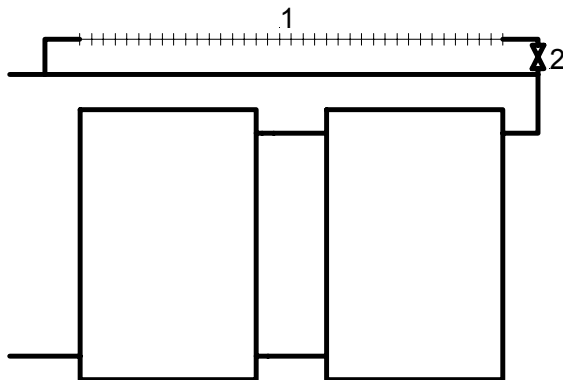
Bemerkungen: Gelegentlich wird eine zusätzliche Nutzung eingerichtet. Wenn überhaupt, wird dies aber fast nur bei Kombianlagen und grösseren Warmwasseranlagen als verhältnismässig erachtet. Werden kompakte standardisierte Kombianlagen so konzipiert, dass ein Pool ohne grosse Modifikation angeschlossen werden kann, ist der Anschluss irgendeiner zusätzlichen Wärmesenke mit erträglichem Mehraufwand machbar. So kann u. U. ein Radiator neben dem Kombispeicher platziert werden, der dann einen kombinierten Technik- und Trocknungsraum beheizt.

6.2.12.2 Überschüssige Wärme ohne Nutzung vom Kollektorkreis abführen

Beschreibung: Ein Radiator, Rippenrohr oder ein Fancoil führt die überschüssige Wärme vom Vor- oder Rücklauf des Kollektorkreises ab. Die Schaltung ist die gleiche, wenn die Wärme genutzt wird (s. oben).

Nachteile: Zusätzlicher Aufwand für Installation und Planung ohne zusätzlichen Nutzen.

Bemerkungen: Ausser bei grösseren Anlagen mit hohem Deckungsgrad wird der Aufwand für zusätzliche Wärmesenken fast immer als unverhältnismässig erachtet.

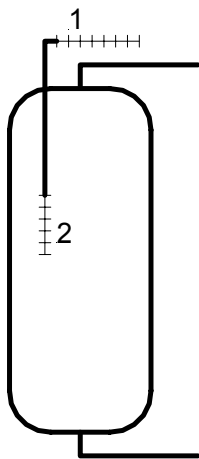


An Stelle des 2-Wege Thermostatventils (2) könnte auch ein thermostatisches 3-Wege Ventil eingesetzt werden, das bei hohen Temperaturen den gesamten Fluss durch das Wärmeabgabeelement (1, z. B. ein Rippenrohr) lenkt. Die Senke kann an den Vorlauf (wie skizziert) oder an den Rücklauf angeschlossen werden. Diese Lösung entspricht im Prinzip derjenigen, die nahe liegend ist, wenn eine zweite Wärmesenke an die Pumpengruppe des Solarkreises angeschlossen wird, wie im Abschnitt 6.2.12 beschrieben. Dies dürfte relativ kostengünstig sein. Die Wärmesenke am Kollektorfeld anzubringen, wie skizziert, ist auch – wenngleich in Abhängigkeit verschiedener Varianten des Kollektorfelds – standardisierbar. Dennoch wird sie nicht systematisch eingesetzt.

6.2.12.3 Standardisierbare Wärmesenke am Solartank

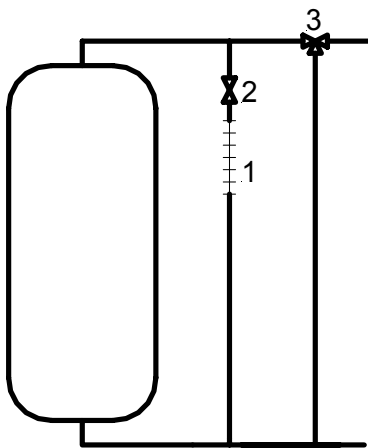
Beschreibung: Eine einfaches Wärmetauscherelement, z. B. ein Rippenrohr, führt Wärme vom Tank der Umgebung zu.

Nachteile: Mehraufwand und u. U. mehr Wärme in der Umgebung des Speichers, wo sie nicht immer erwünscht ist.



Es kann sich um ein gezielt ausgelegtes Wärmerohr (heatpipe) oder um ein fast gänzlich mit Wasser gefülltes Rohr handeln. Im Falle eines Wärmerohrs müsste es sehr gut ausgelegt werden, sollen nicht allzu grosse unerwünschte Wärmeverluste auftreten. Im Falle eines gefüllten Rohres strömt Wasser in Gegenstromzirkulation im selben Rohr vom Wärmetauscher im Tank (2) zum Wärmetauscher ausserhalb des Tanks (1) und zurück. In diesem Fall ist ein thermostatisches Ventil zwischen 1 und 2 unvermeidbar, um unerwünschte Wärmeverluste zu vermeiden.

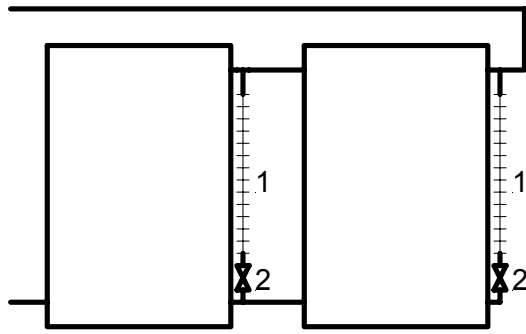
Eine Einrichtung dieser Art wurde schon an einer Thermosiphonanlage eines bekannten Herstellers eingesetzt. Ev. handelte es sich um einen Prototyp (mit Wärmerohr?).



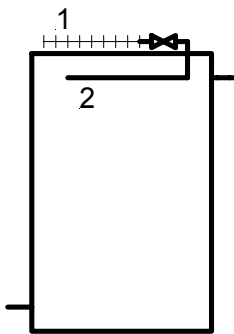
Das thermostatische Ventil (2) öffnet bei einer erhöhten Speichertemperatur und der Wärmetauscher (1) führt Wärme an die Speicherumgebung ab. Wird mit dem thermostatischen Mischventil (3) keine Rückschlagklappe eingebaut, übernimmt oft unbeabsichtigt der Kaltwasserbypass zum Mischventil (3) die Funktion einer Wärmesenke.

6.2.12.4 Standardisierbare Wärmesenken am Kollektor

Die folgenden Varianten sind weder relevant, im Sinne, dass sie verbreitet wären, noch erheben sie Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden aus einer Vielzahl möglicher Lösungen einige Beispiele aufgezeigt. Es ist den Autoren nicht bekannt, ob eine der gezeigten Varianten in relevanter Häufigkeit angewendet wird.



Das an jedem Kollektor vormontierte Wärmeabgabeelement (1), wird bei hoher Temperatur parallel zum Kollektor durchströmt. Eine solche Lösung hat den Vorteil der Standardisierung und Vorfertigung. Da mehrere Thermostatventile (2) benötigt werden, dürfte sie wirtschaftlich dennoch wenig interessant sein.



Es handelt sich um eine ähnliche Lösung wie oben am Speicher gezeigt. Der Wärmeaufnahme teil (2) im Kollektor würde an das Sammelrohr gelötet. Der Einsatz eines Wärmerohrs wäre nahe liegend.

7 Von 160°C abweichende Temperaturgrenzen

Im Vorangegangenen wurde (mit Ausnahme von einigen Beispielen in Abschnitt 6) immer eine Absorbertemperatur von 160°C als akzeptable Temperaturgrenze für den Kollektor eines Solarthermischen Systems betrachtet. Selbstverständlich sind auch noch weitere sinnvolle Grenztemperaturen denkbar.

Ein wichtiger Bestandteil einer solarthermischen Anlage ist dessen Expansionsgefäß. Dieses muss, neben der normalen Ausdehnung der Wärmeträgerflüssigkeit, im Falle der Stagnation und der damit verbundenen Verdampfung des Wärmeträgers, mindestens zusätzlich den gesamten Flüssigkeitsinhalt des Kollektorfeldes mit Vorlaufleitung aufnehmen können. Eine Begrenzung der Kollektortemperatur auf 120°C würde, bei einem eingestellten Vordruck des Systems auf 2 bar (bezogen auf Kollektorhöhe), eine Dampfbildung sicher verhindern. Damit könnte ein deutlich kleineres und kostengünstigeres Expansionsgefäß eingesetzt werden. Bei Anlagenhöhen über 10 m müsste diese Grenze entsprechend niedriger ausfallen, um ein Ansprechen des Sicherheitsventils (typisch 3 bar) zu vermeiden. Der Einspareffekt bezogen auf die Kollektorfläche liegt bei den betrachteten Systemen unter 10 CHF/m².

Eine weitergehende Begrenzung der maximalen Kollektortemperatur auf etwa 90°C, würde zusätzlich noch die Verwendung alternativer Kollektoranschlussleitungen ermöglichen. An Stelle der heute üblichen Kupferrohre, könnten kostengünstige und leicht zu verlegende Kunststoffrohre bzw. Metall-Kunststoff Verbundrohre eingesetzt werden, wie diese z.B. im Heizungsbau üblich sind. Auch ein Einsatz von weniger temperaturstabilen Materialien im Kollektor (Wärmedämmung, Dichtungen etc.) wäre möglich. Der Einspareffekt für die einfachere Verrohrung und das kleinere Expansionsgefäß liegt um 40 CHF/m² bei Warmwasseranlagen und um 25

CHF/m² bei Kombisystemen (lowflow). Obwohl Kollektortemperaturen von 90°C durchaus noch zu den normalen Betriebszuständen gezählt werden können, fällt der mit dieser Massnahme verbundene zusätzliche Zusatzennergieaufwand vernachlässigbar bis moderat aus (Tab. 7.1).

Tab 7.1: Jährlich zusätzlich aufzuwendender Zusatzennergiebedarf ΔQ_{aux} bei Verwendung eines Absorbers mit 90°C Temperaturbegrenzung.

			Referenzkollektor ($\alpha = 0.95$, $\varepsilon = 0.05$)		Kollektor m. Überhitzungs- schutz (90°C)		
System	A_{Koll} [m ²]	Q_{demand} [kWh]	SF_{00} [%]	Q_{aux} [kWh]	SF_0 [%]	Q_{aux} [kWh]	ΔQ_{aux} [kWh]
<i>WWKlein</i>	5	2380	55	1071	55	1072	1
<i>RHKlein</i>	16	19720	17	16474	16	16604	130

Die eingangs betrachtete Temperaturgrenze von 160°C kann als „weiches“ Kriterium bezeichnet werden, da in diesem Fall durchaus auch (kurze) Zeiten mit höheren Temperaturen toleriert werden können. Im Falle von Temperaturüberschreitungen wird es zwar zu Schädigungen geringer Mengen Wärmeträgerflüssigkeit kommen, aber in einem akzeptablen Mass, welche die Betriebssicherheit des Solarsystems nicht gefährden.

Die jetzt betrachteten Temperaturgrenzen sind im Gegensatz dazu als „hart“ zu bezeichnen, da auch eine bereits kurzzeitige Übertretung zu einem Ausfall oder gar zu einer Schädigung der Anlage führen kann. Sei es durch eine Entleerung des Kollektorkreislaufes über das Sicherheitsventil oder gar die Zerstörung der nur mässig temperaturbeständigen Verrohrung des Kollektorkreislaufes oder anderer im Kollektor verwendeter Materialien. Deshalb wird zur Bestimmung der geforderten optischen Absorbereigenschaften der Kollektor (bzw. dessen Stagnationstemperatur) isoliert betrachtet, und nicht als eine in ein funktionierendes System eingebettete Komponente.

Für die Berechnung der Stagnationstemperatur wurde auf bekannte Verfahren zurück gegriffen [8, 9]. Der Kollektor hat ausgezeichnete optische und thermische Eigenschaften (Transmission der Abdeckung 91%, mittlerer Wärmeverlustkoeffizient über Rückseite und Rand $0.9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Die in Abb. 7.1 dargestellte Stagnationstemperatur als Funktion des Absorptions- und Emissionsgrades gelten für eine solare Einstrahlung von 1100 W/m^2 und einer Umgebungstemperatur von 30°C bei Windstille.

Wie aus Abb. 7.1 zu entnehmen ist, kann durch schalten des Emissionsgrades allein die gewünschte Maximaltemperatur nicht mehr erreicht werden. Es muss also zwingend der Absorptionsgrad geschaltet werden. Bei einem unveränderten Emissionsvermögen von 5% muss der Absorptionsgrad auf unter 38% geschaltet werden, um eine Maximaltemperatur von 120°C, bzw. auf unter 25%, um eine Maximaltemperatur von 90°C zu gewährleisten.

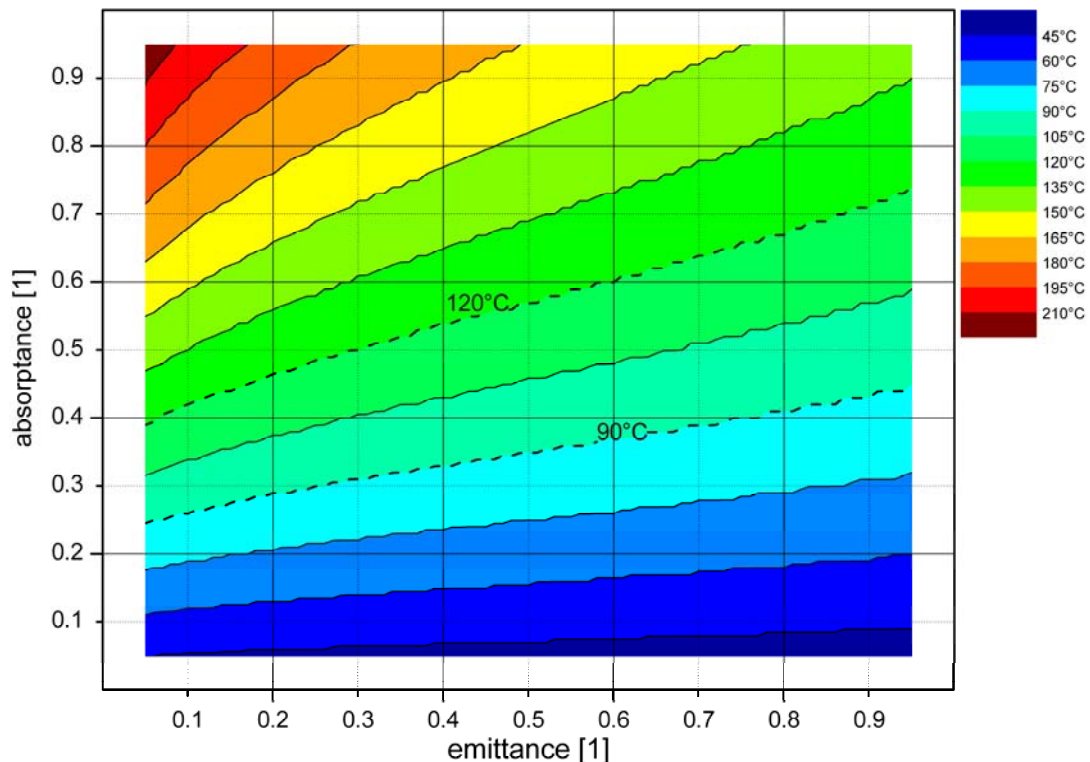


Abb. 7.1: Stagnationstemperatur als Funktion von α und ε für einen sehr guten Flachkollektor bei einer Einstrahlung von 1100 W/m^2 und 30°C Umgebungstemperatur.

8 Diskussion

8.1 Temperaturgrenze bei 160°C

Bei den meisten thermischen Solaranlagen, gibt es keine Massnahme oder Einrichtung, die dazu dient, dem Problem des Überhitzungsschutzes zu begegnen. Einzig werden systematisch Membranexpansionsgefässe eingesetzt, deren Volumen es erlaubt, dass im Kollektorfeld und in den benachbarten Leitungen Dampf entsteht. Dadurch wird die der unzulässigen thermischen Belastung ausgesetzte Menge des Wärmeträgers vermindert. Ausser in Schweden wird diese Massnahme schon seit sehr langer Zeit praktisch überall angewendet. Viele andere Massnahmen werden sporadisch eingesetzt. Einige Massnahmen werden durch eine Minderheit der Herstellerfirmen oder Systemanbieter in der Regel oder als firmeneigener Standard verwendet (z.B. die Kompaktanlagen der Firma Hoval, deren Kollektorkreis im Stillstand drucklos ist).

Für viele der in Abschnitt 6 aufgezeigten Massnahmen zum Überhitzungsschutz, lässt sich ein Mehrpreis, sei es nun in Form höherer Systemkosten oder bedingt durch einen auszugleichenden solaren Minderertrag, nur unzureichend gut abschätzen. Dies gilt insbesondere für die auf Wasser als Wärmeträgermedium beruhenden Systeme (6.2.11), die. Je nach Konzept wären hier sogar Minderkosten denkbar. Das Hauptproblem ist bei diesen Anlagen der Frostschutz, welcher in der Regel nur durch eine sorgfältige Installation gewährleistet werden kann.

Die in 6.2.1. bis 6.2.4. beschriebenen Methoden der Kühlung, sind entweder sehr individuelle Lösungen, mit entsprechend hohen Kosten, oder sie sind je nach Ausführung/Situation mit einem Minderertrag verbunden, da diese Anlagen den Speicherinhalt de facto nicht ganz ausnut-

zen. Eine Verbesserung wäre hier durch eine Einbindung einer kombinierten Wetter- und Verbrauchsprognose in den Regelalgorithmus denkbar. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die Einbindung einer Wetterprognose zu erhöhten Investitions- und Betriebskosten führen würde, und eine, im Sinne eines Überhitzungsschutzes genügend zuverlässige Verbrauchsprognose, nicht möglich ist. Das Kühlen mit Frischwasser (6.2.4) ist, insbesondere mit Hinblick auf die zunehmend angespanntere Situation der Trinkwasserversorgung während der Sommermonate in weiten Teilen Europas, als kritisch zu betrachten.

Den in 6.2.5 bis 6.2.7 beschriebenen Konzepten gemein ist, dass spätestens beim Erreichen einer für Glykol schädlichen Temperatur, der Absorber bereits leer ist, d.h. sich darin nur noch sehr geringe Restmengen an Wärmeträger befinden. Im Falle von Stagnation, können also, im Vergleich zum Gesamtvolumen, nur sehr kleine Mengen des Wärmeträgers zersetzt werden. Es bleibt aber ein geringes Restrisiko, dass Zersetzungsprodukte Komponenten des hydraulischen Kreislaufs verstopfen. Einige Hersteller setzen auf diese Strategie, und bieten entsprechende Systeme an. Es sind keine zwangsläufigen Mehrkosten mit diesen Massnahmen verbunden.

Während die in 6.2.8 bis 6.2.10 beschriebenen Massnahmen in eine der Rubriken „zu teuer“ oder „am hiesigen Markt nicht durchsetzbar“ fallen, können die in 6.2.12 beschriebenen Wärmesenken durchaus mit wenigen hundert Franken realisiert werden. Dennoch wird diese Massnahme praktisch nur in individuellen Einzelfällen eingesetzt. Die in 6.1. betrachtete Solarabsorberschicht mit suboptimalen optischen Eigenschaften erstreckt sich, je nach System, von „einige hundert Franken“ bis „zu teuer“. Diese Kostenüberlegungen zeigen, dass die Kostenfolge jeder Massnahme gering sein muss, um in der Praxis erwogen zu werden.

Viele der in Abschnitt 6 aufgeführten Massnahmen sind bekannt oder nahe liegend, werden aber kaum eingesetzt. Es muss angenommen werden, dass die Hersteller die Problematik der Glykolzerstörung als nicht gravierend betrachten und auf einschneidende Massnahmen verzichten. Auch die Tatsache, dass eine Anfrage bei den in ESTIF organisierten Herstellern, ob ein Bedarf zur standardisierten Prüfung von Wärmeträgerflüssigkeiten und entsprechenden Methoden bestehe, verneint wurde, passt in dieses Bild. Die Situation hat einen Kenner der Umstände (Ueli Frei) schon zur Aussage veranlasst: „Das einzige Problem mit dem Überhitzungsschutz ist, dass er nichts kosten darf.“

Ausgehend von dieser Situation ist es stimmig, dass die meisten Planer und Systemanbieter Massnahmen bevorzugen, die sehr einfach sind, also kaum Mehrkosten oder Komplikationen bei der Installation verursachen. Derartige Massnahmen vermindern das Problem auf ein als erträglich empfundenes Mass (geringer Mehrbedarf an Wartung, für den der Benutzer aufkommen muss; ein beschränkter Anteil Schadensfällen). Es wird von Massnahmen dieser Art aber keine komplette und absolut zuverlässige Lösung erwartet. Das Überhitzungsschutzproblem ist ein relatives Problem. Die Wirksamkeit der eingesetzten Massnahmen ist – in der Regel – entsprechend beschränkt.

8.2 Temperaturgrenze deutlich unter 160°C

Bei deutlich niedrigeren Temperaturgrenzen als 160°C ergeben sich, neben den in Abschnitt 7 aufgezeigten Einspareffekten für den hydraulischen Kreislauf, noch weitere, für die Zukunft u. U. bedeutendere Möglichkeiten, welche dem Kollektorbau neue Impulse verleihen könnten.

Ein nahe liegender Schritt wäre der Austausch der heute verbreiteten Mineralwolle, welche zur rückseitigen und seitlichen Wärmedämmung eingesetzt wird. An deren Stelle könnten weniger temperaturstabile aber besser isolierende und zudem formstabilere Schäume treten. Dies hat

wiederum Auswirkung auf die Kollektorbauhöhe und die Steifigkeit des Kollektorgehäuses (Möglichkeit der Materialeinsparung und Einsatz neuer Materialien).

Noch einen Schritt weiter könnte man mit dem Einsatz von Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) gehen, deren maximale Einsatztemperatur, je nach Produkt, zwischen 80°C und 120°C liegt. Das Wärmedämmvermögen von VIPs ist mehr als einen Faktor 5 besser, als der heute üblichen im Kollektorbau eingesetzten Dämmstoffe. Entsprechend dünner oder leistungsfähiger könnte ein mit VIP isolierter Kollektor konstruiert werden.

Um die frontseitigen Wärmeverluste zu reduzieren, könnte Transparente Wärmedämmung (TWD) eingesetzt werden. Die (Leistungs-) Vorteile von TWD Kollektoren wurde in zahlreichen Projekten Ende der 80er Anfang der 90er Jahre demonstriert. Da die gängigen TWD Materialien jedoch auf Kunststoff basieren (PMMA und PC), waren diese Kollektoren nicht Stillstandssicher. Eine zuverlässig funktionierende Temperaturbegrenzung des Absorbers auf Werte um 90°C würde den risikolosen Einsatz von TWD ermöglichen.

In jüngster Zeit wird vermehrt der Einsatz von Polymeren im Kollektorbau diskutiert (siehe z. B. IEA SHC Task 39). Sollen die Kunststoffkollektoren zu einem zum Flachkollektor konkurrenzfähigem Preis – Leistungsverhältnis hergestellt werden können, sollte möglichst auf temperaturbeständige Hochleistungspolymere verzichtet werden. Der Einsatz von Massenpolymeren wäre vorzuziehen. Diese sind jedoch nur beschränkt temperaturbeständig (ca. 80°C – 120°C) und müssen daher zuverlässig vor zu hohen Temperaturen geschützt werden.

9 Schlussfolgerungen

Aufgrund der zu erwartenden geringen Einspareffekte und basierend auf den Erfahrungen die mit der Umsetzung anderer Massnahmen zum Übertemperaturschutz gemacht wurden, kann gefolgert werden, dass eine schaltende Absorberschicht, mit einer Grenztemperatur um 160°C (Glykolschutz), nur dann eine Chance auf Vermarktung hat, wenn damit keine oder nur sehr geringe Mehrkosten verbundenen sind.

Zudem ist noch nicht abschliessend geklärt, ob die alleinige Temperaturbegrenzung des Absorbers auf 160°C (also bei gleichzeitigem Verbleib des Wärmeträgers im Absorber) überhaupt einen zuverlässigen Schutz des Glykols darstellt, da der oxidative Abbau des Glykols mit steigender Temperatur beschleunigt wird. Ohne Entleerung des Kollektors im Falle der Stagnation würden relativ grosse Mengen Glykol für relativ lange Zeiten hohen Temperaturen ausgesetzt. Es ist also nicht auszuschliessen, dass der Solarkreislauf trotz schaltender Absorberschicht so ausgelegt werden muss, dass der Wärmeträger im Falle von Stagnation möglichst vollständig aus dem Absorber ausdampfen kann. Ein möglicher Einspareffekt wäre damit jedoch hinfällig. Lediglich der Schutz im Absorber verbliebener Glykol- und insbesondere Inhibitorenreste wäre deutlich besser gewährleistet.

Erst Temperaturgrenzen deutlich unter 160°C bieten die Möglichkeit einfacher, kostengünstiger Systeme und eröffnen ganz neue Perspektiven und Innovationen für den Kollektorbau. Die Anforderungen an eine solche Solarabsorberschicht sind jedoch sehr hoch. Im ungeschalteten Zustand sollte die Schicht optische Werte ähnlich heutiger selektiver Solarabsorberschichten aufweisen. Beim Erreichen einer definierten (möglicherweise im Beschichtungsprozess einstellbaren) Temperaturgrenze bei 80°C – 120°C, muss der solare Absorptionsgrad innerhalb eines möglichst schmalen Temperaturbandes (zumindest schmal im Bereich der normalen Betriebstemperatur) auf Werte von $\alpha = 0.2 - 0.4$ abfallen.

Auf jeden Fall muss bei einer allfälligen Entwicklung einer thermochromen Schicht der Schalttemperatur grösste Beachtung geschenkt und diese intelligent festgelegt werden.

10 Referenzen

- [1] B. Carlsson, U. Frei, M. Köhl, K. Möller; (1994). Accelerated Life Testing of Solar Energy Materials - Case Study of some Selective Solar Absorber Coating Materials for DHW Systems; *A report of IEA Task X; Solar Materials Research and Development; SP Report 94:13*; ISBN91-7848-472-3.
- [2] Brunold, S.; Frei, U.; Carlsson, B.; Möller, K.; Köhl, M.; (2000). Accelerated Life Testing of Solar Absorber Coatings: Testing Procedure and Results. *Solar Energy* 68, 313-323.
- [3] Carlsson, B.; Möller, K.; Köhl, M.; Frei, U.; Brunold, S. (2000). Qualification Test Procedure for Solar Absorber Surface Durability. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 61, 225-275.
- [4] S. Brunold, U. Frei; B. Carlsson, K. Möller, M. Köhl; (1998) 'Beschleunigte Lebensdauerprüfung an Solarabsorberschichten – Prüfprozedur und Ergebnisse'; SVU Fachtagung 'Service Life Prediction' 30. Oktober 1998
- [5] Polysun 4, Simulationsprogramm zur Dimensionierung thermischer Solaranlagen, erhältlich bei Vela Solaris AG, Herrenberg 35, CH-8640 Rapperswil, www.velasolaris.ch
- [6] Furbo, Simon; Alexander Thür; Chris Bales; Frank Fiedler; John Rekstad; Michaela Meir; Dagnija Blumberga; Claudio Rochas; Torben Schifter-Holm; Klaus Lorenz (2006): Competitive Solar Heating Systems for Residential Buildings (REBUS)
http://www.physics.uio.no/energy/rebus/downloads/REBUS_final_01-2007.pdf
- [7] Weiss, Werner (ed.); Markus Peter, Huib Visser (2003): Drainback technology; in: Solar heating systems for houses – a design handbook for solar combisystems; S. 82; James & James (Sciences Publishers) Ltd., London
- [8] S. A. Klein; Calculation of flat-plate collector loss coefficients; *Solar Energy* 17 (1975), 79-80
- [9] Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie and William A. Beckman, Wiley-Interscience, Second Edition