

Forschungsprogramm

Solarwärme

Stillstandsverhalten von Solaranlagen

Teilprojekt aus: Messprojekt 52m² low-flow-Solaranlage

Ausgeführt durch:
Ralph Eismann, Paul von Felten
Fenergy 5644 Auw-Rüstenschwil

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie
3003 - Bern

1 Zusammenfassung

Anlagenstillstände können infolge Stromausfall oder beispielsweise durch Pumpendefekt auftreten und sind daher nie sicher zu vermeiden. Bei einem Stromausfall kommt die Zirkulation im Kollektorkreis praktisch zum Stillstand. Der Wärmestau in den Kollektoren führt zu Stagnationstemperaturen von $> 180^{\circ}\text{C}$ im Absorber und, bei üblichen Wärmeträgermedien mit 33% Propylenglykol in Wasser, zum Verdampfen des Mediums im Kollektor bei entsprechendem Druckanstieg. Das entstehende Dampfvolumen und die Höhe der auftretenden Temperaturen ist nicht nur vom Kollektorinhalt, sondern von der hydraulischen Gestaltung des gesamten Solarkreislaufes abhängig. Scheinbar kleine Unterschiede können ein ganz anderes Verhalten bewirken.

Das Stillstandsverhalten einer Solaranlage mit 52m^2 Kollektorfläche wurde experimentell untersucht [3,4]. Anhand der Messresultate wurden allgemeine Richtlinien zur stillstandssicheren Gestaltung von Solaranlagen erarbeitet. Deren wichtigste Aussagen sind: Der entstehende Dampf muss ein zusammenhängendes Volumen bilden. Die Serieschaltung horizontal angeordneter Absorber ist daher zu vermeiden. Der Anschluss des Expansionsgefäßes muss zwischen dem unteren Anschluss des Kollektorfeldes, der meist dem Kollektoreintritt entspricht, und einem allfälligen Rückschlagventil oder Sperrventil angeordnet sein.

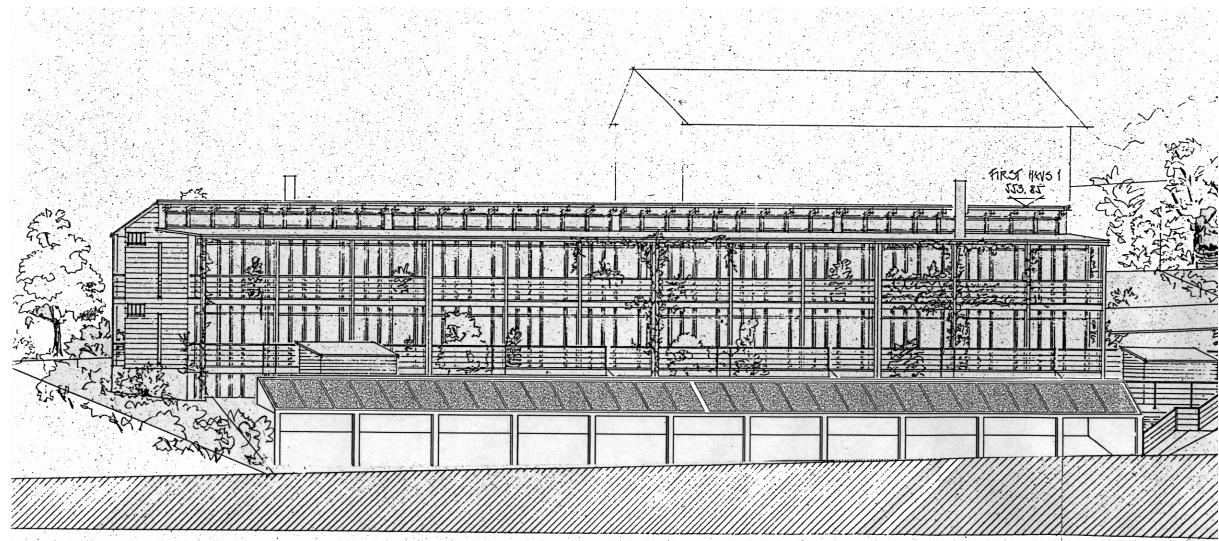
Inhaltsverzeichnis:

1	Zusammenfassung	2
2	Beschrieb der Solaranlage	3
3	Sicherheit und Anlagenstillstand	4
3.1	Wichtigste Erkenntnisse	5
4	Stillstandssichere Gestaltung von Solaranlagen	5
4.1	Siphon am oberen Kollektorfeldanschluss	6
4.2	Sperren des Solarkreislaufes	7
4.3	Begrenzen des Stillstandsdruckes	7
4.4	Entleeren des Kollektorfeldes	8
4.5	Bei Anordnung des Kollektorfeldes unterhalb des Speichers	8
4.6	Hydraulische Schaltung von Absorbern und Kollektorfeldern	9
5	Messanordnung und Messmethoden	10
6	Messresultate	11
6.1	Siphon am Kollektoraustritt	12
6.2	Gesperzte Vorlaufleitung	14
6.3	Ohne Siphon	16

2 Beschrieb der Solaranlage

Die Solaranlage ist ein sorgfältig integrierter Teil einer modernen, nach ökologischen Kriterien gestalteten Siedlung in Illnau-Effretikon (ZH), und versorgt 10 Haushalte mit Energie zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung.

Kennzeichnend sind der einfache, modulare und damit kostengünstige Aufbau von Kollektorfeld und Anlage. Das Kollektorfeld ist auf dem 30m breiten Dach eines Autounterstandes angeordnet und dient gleichzeitig als Abschrankung für den dahinter liegenden Kinderspielplatz. Die Siedlung umfasst zehn Reiheneinfamilienhäuser mit einer Bruttowohnfläche von je $262m^2$ wobei einmal 4 und zweimal 3 Häuser zusammengebaut sind. Diese Anlage wurde im Auftrag des BFE detailliert ausgemessen. Nebst der Untersuchung des Stillstandsverhaltens wurde eine Gesamtenergiebilanz der Anlage erstellt [3] sowie ein neues Berechnungsverfahren zur Dimensionierung von Expansionsgefäßsen entwickelt [4].



Das Kollektorfeld besteht aus 30 Kollektormodulen mit einer Nettofläche von $52m^2$. Je 15 Kollektoren sind über integrierte Sammelleitungen parallelgeschaltet. Die Absorber bestehen aus seriell geschalteten, selektiv beschichteten Kupferlamellen und arbeiten im low-flow-Betrieb mit Volumenströmen von 15 bis $21 l/hm^2$.

Der Speicher mit $6250l$ Inhalt wird durch die Solaranlage über Plattenwärmetauscher mit je $0.9m^2$ Fläche durch drei Einspeisungen in verschiedener Höhe geladen.

Die Versorgung der Haushalte mit Warmwasser erfolgt über den im Speicher integrierten Spira-Boiler (FEURON). Dieser erlaubt eine annähernd schichtweise Entladung des Speichers. Die erhöhte Windungsdichte im Bereich des Speicherbodens sorgt für tiefe Temperaturen in der Vorlaufleitung des Solarkreises.

Während der Heizperiode heizt der Holzschnitzelkessel mit 80kW Nennleistung den Speicherinhalt über einen integrierten Glattrohrwärmeübertrager.

Zwei Elektro-einsätze mit je 6kW Leistung dienen zur Überbrückung des Energiebedarfs während Schlechtwetterperioden im Sommer.

Anlagenschema:

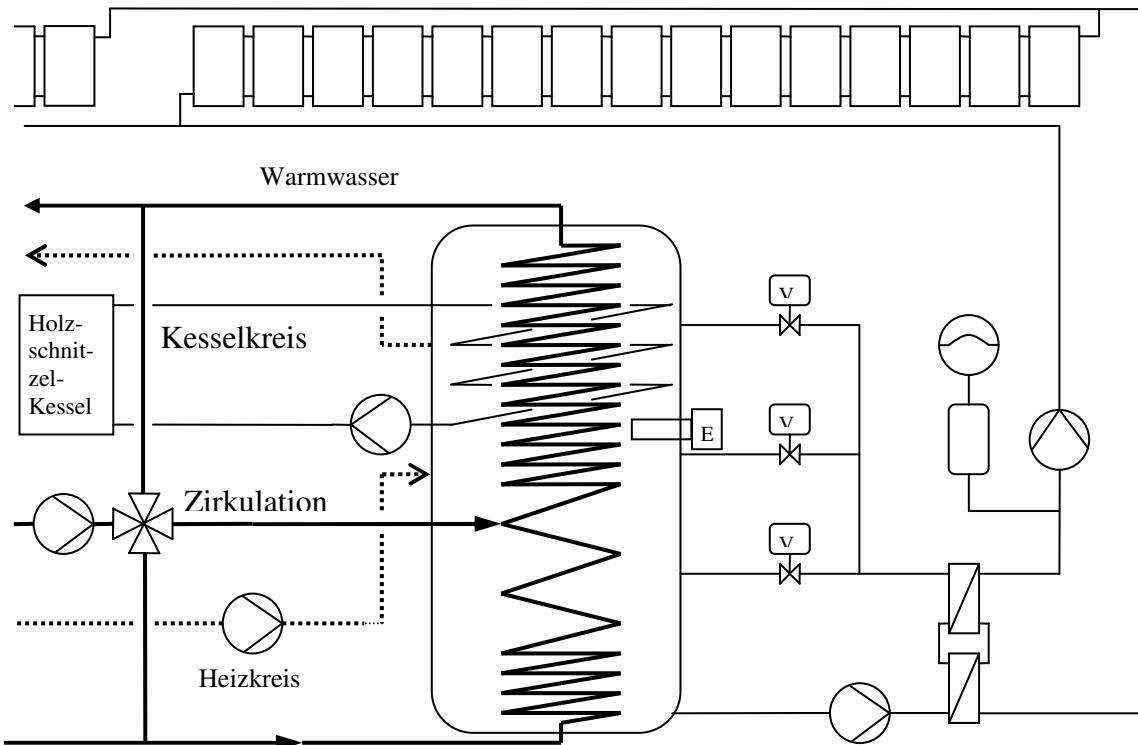


Fig.1

3 Sicherheit und Anlagenstillstand

Die meisten Solaranlagen werden mit geschlossenem Solarkreislauf und frostsicherm Wärmeträgermedium betrieben. Bei der Planung von Solaranlagen müssen zwei Sicherheitsaspekte [1,2,5] berücksichtigt werden:

1. Schutz des Speichers vor Überhitzung. Dies erfolgt entweder aktiv, durch Kühlen des Kreislaufes über geeignete Kühlflächen während des Betriebs oder durch nächtliches Rückkühlen des Speichers über die Kollektoren, oder passiv, durch Abstellen der Anlage und Verdrängen des Mediums aus den Kollektoren durch Dampfbildung.
2. Schutz der Anlage vor zu hohen Drücke und Temperaturen im Anlagenstillstand. Dieser kann entweder durch bewusstes Abstellen der Anlage eintreten oder als Störfall infolge Stromausfall oder Pumpendefekt.

Letzterer Fall kann nie ausgeschlossen werden. Die Anlage muss so konstruiert sein, dass die durch einen Anlagenstillstand entstehende thermische und mechanische Belastungen die zulässigen Werte nicht überschreitet. Ein Anlagenstillstand muss als normales Ereignis betrachtet werden und darf keine Wartungsarbeiten nötig machen. Die Anlage darf also insbesondere kein Wärmeträgermedium als Folge eines zu hohen Stillstandsdruckes verlieren.

Unter diesen Voraussetzungen kann bei Warmwasseranlagen das Problem der Speicherüberhitzung kostengünstig durch Abstellen der Anlage gelöst werden. Bei heizungsunterstützten Anlagen oder bei Anlagen in Ferienhäusern tritt diese Situation sehr häufig auf, und es sind andere Methoden vorzuziehen, beispielsweise Kühlen des Vorlaufes über einen Radiator oder Abschatten des Kollektorfeldes.

3.1 Wichtigste Erkenntnisse

Das Stillstandsverhalten ist in hohem Masse von der Gestaltung der Anlage abhängig. Solaranlagen unterscheiden sich nicht nur durch unterschiedliche Anordnung und Eigenschaften der Komponenten, sondern auch hinsichtlich der Rohrführung. Scheinbar kleine Unterschiede können ein ganz anderes Verhalten bewirken.

- Sofern genügend Strahlungsenergie vorhanden ist, kann wesentlich mehr als der Kollektorinhalt verdampfen. Das tatsächliche **Dampfvolumen** hängt von der Rohrführung und von der Anordnung des Expansionsgefäßes des Rückschlagventils und anderer gesteuerter Ventile ab.
- Die **Temperaturen** in den Rohrleitungen erreichen die Siedetemperatur des Wärmeträgermediums, die je nach Systemdruck sehr hoch sein kann. Der Dampf strömt aufgrund seines Auftriebs an die höchstgelegene Stelle im Kreislauf. Der Absorber befindet sich jedoch immer unterhalb dieser Stelle. Wenn das Dampfvolumen nicht durch geeignete Massnahmen auf das Kollektorfeld beschränkt ist, werden die Leitungen außerhalb des Feldes durch die freiwerdende Kondensationswärme auf Siedetemperatur aufgeheizt.
- Die **thermische Belastung** der Anlage beim **Anfahren** aus dem Stillstand ist gross. Es ist nicht wirtschaftlich, eine Anlage für die seltenen Fälle auszulegen, in denen ein Anfahren aus dem Stillstand energetisch gerechtfertigt wäre. Die Rohrleitungen und Armaturen müssten für Temperaturen bis 150°C ausgelegt sein. Eventuell gibt es aber andere Anwendungen, bei denen ein solcher Betrieb sinnvoll ist. **Dampfschläge** treten nur in Anlagen auf, bei denen die Vorlaufleitung während des Stillstandes gesperrt ist (Fig.6) .

4 Stillstandssichere Gestaltung von Solaranlagen

Üblicherweise erfolgt die Durchströmung eines Kollektorfeldes von unten nach oben. Dies ist auch bei der untersuchten Anlage so. Die in den nachfolgenden Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 beschriebenen Hinweise zur Anlagengestaltung gelten für diesen, etwas schwieriger zu beherrschenden Fall. Im Kapitel 4.4 wird auch die Durchströmung des Kollektorfeldes von oben nach unten diskutiert. Dieser Fall ist bezüglich der stillstandssicheren Gestaltung einfacher, jedoch sind nur Kollektoren mit verhältnismässig hohem Druckverlust für diese Durchströmungsart geeignet.

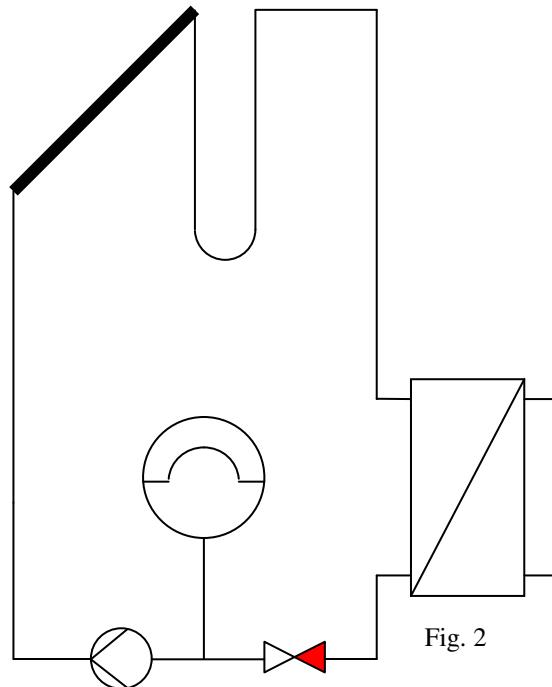
Die Anlagen müssen so gestaltet sein, dass während des Stillstandes die thermische Belastung der Komponenten gering bleibt und ein möglichst kleines Dampfvolumen entsteht. Die Rohrleitungen und das Expansionsgefäß müssen für die zu erwartenden Temperaturen und Dampfvolumen ausgelegt sein. Um diese Forderungen zu erfüllen, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die einzeln oder in Kombination angewendet werden können:

1. Einbau eines Siphons unmittelbar beim Kollektoraustritt.
2. Sperren der Vorlaufleitung durch ein gesteuertes Ventil oder durch die Sperrwirkung einer volumetrischen Pumpe.
3. Beschränken des Druckes und damit der Siedetemperatur bei Anlagenstillstand.
4. Automatisches Entleeren des Kollektorfeldes.

Die Varianten 1. und 2. wurden in Experimenten getestet. Zu diesem Zweck wurden jeweils entsprechende Umbauten an der Anlage vorgenommen.

Die Anlagenschemata entsprechen der experimentellen Situation. Armaturen und Bauteile, die für die Resultate unwichtig sind, sind nicht gezeichnet.

4.1 Siphon am oberen Kollektorfeldanschluss



Der Siphon am Kollektoraustritt (Fig.2) verhindert die Ausbreitung der Dampfphase über den Bereich des Siphons hinaus und beschränkt wirkungsvoll die thermische Belastung der anschliessenden Vorlaufleitung.

Kein Siphon ist erforderlich, wenn die Vorlaufleitung ohne Umweg nach unten, unterhalb des Niveaus des Kollektoreintritts führt (Fig.3). Bei freistehenden Kollektoren sind aus Platzgründen die Vor- und Rücklaufleitungen oft hinter die Kollektoren verlegt (Fig.4). In diesem Fall muss ein gut isoliertes Siphon vorgesehen werden, das deutlich unter den Kollektoreintritt hinabreicht (Fig.5).

Die Wirkung des Siphons ist am besten, wenn sich das Medium in beiden Richtungen bewegen kann. Dies lässt sich in Anlagen mit externem Wärmeübertrager problemlos realisieren, da in diesem Fall kein Rückschlagventil nötig ist. Bei Anlagen mit integriertem Wärmeübertrager verhindert üblicherweise

ein Rückschlagventil die Auskühlung der Speicher infolge Thermosiphoneffekt bei abgestellter Anlage. Die Expansionsvolumenströme über die Vor- bzw. Rücklaufleitung sind aber nicht identisch, sondern schwanken zum Teil erheblich. Das Rückschlagventil bewirkt, dass ein grosser Teil des Absorberinhaltes nicht durch Verdrängung in die Rücklaufleitung gedrückt wird, sondern durch Verdampfen in die Vorlaufleitung gelangt und diese durch die freiwerdende Kondensationswärme aufheizt. Es sollten daher bessere Lösungen zur Rückflussverhinderung gefunden werden. Die geeignete Stelle für das Rückschlagventil ist die Leitung zwischen dem Kollektoraustritt und dem Anschluss des Expansionsgefäßes.

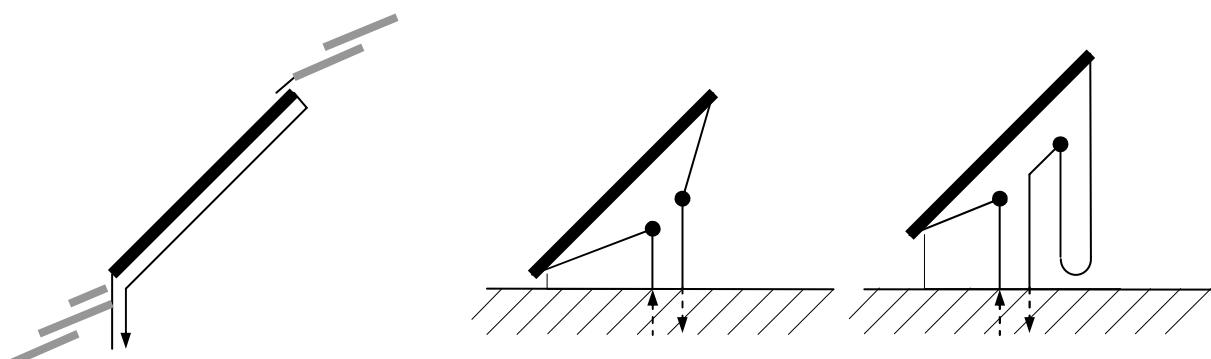


Fig. 3

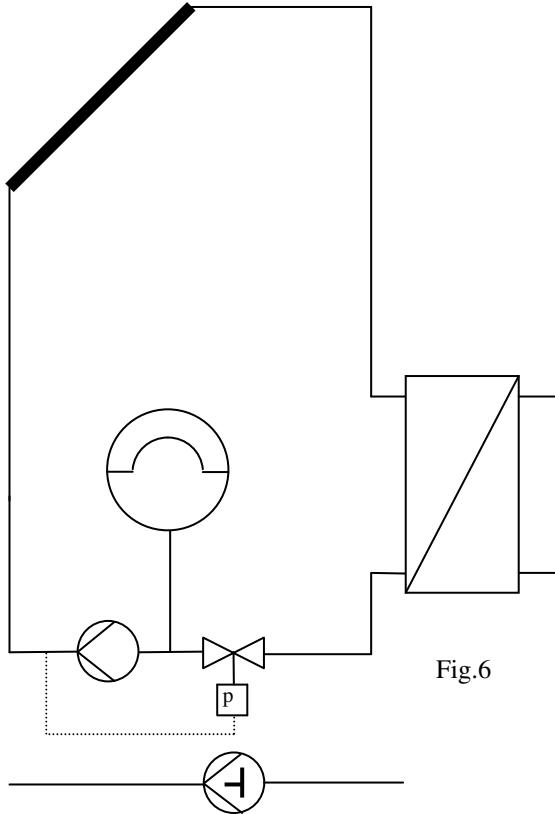
Fig. 4

Fig. 5

Im Bereich des Siphons und am Anfang der Vorlaufleitungen treten in jedem Fall Temperaturen im Bereich des Siedepunktes auf. Die Rohrwerkstoffe und insbesondere die Rohrverbindungen und Dichtungen müssen diesen Belastungen dauerhaft standhalten. Herkömmliche Verschraubungen mit Flachdichtungen sind wegen ihrer Kriechneigung nicht geeignet. Erfahrungsgemäss ist die gehanfte Rohrverschraubung für diese Anwendung gut geeignet. Ebenfalls geeignet sind Klemmringverschraubungen und Flanschverbindungen mit Elastomerdich-

tungen, bei denen das Dichtungselement ausschliesslich die Dichtfunktion übernimmt und die Kräfte infolge Flüssigkeitsdruck und thermischer Spannung durch andere Elemente übertragen werden. Mit Hochtemperaturweichlot hergestellte Verbindungen sind auch geeignet, sofern die Kräfte und Momente auf die Lötstellen durch klar definierte Fixpunkte für die Rohrbefestigung und Kompensatoren zum Ausgleich der thermischen Wärmedehnung innerhalb zulässiger Grenzen gehalten werden.

4.2 Sperren des Solarkreises



Die Sperrung erfolgt durch eine volumetrische Pumpe oder durch ein Ventil, das selbsttätig schliesst, wenn kein Differenzdruck über der Pumpe herrscht.

Diese Variante schützt die Vorlaufleitung am effektivsten vor hohen Temperaturen, weil das Medium nur über die Phasengrenze unmittelbar beim Kollektor durch Kondensationswärme geheizt wird. Falls die Vorlaufleitung nach dem Kollektoraustritt horizontal oder nach oben wegführt, ist ein Siphon auch hier notwendig, um den Wärmetransport durch Konvektion zu minimieren und Eintreten von flüssigem Medium in die mit Dampf gefüllten Bereiche zu verhindern.

Bei Anlagen mit integriertem Wärmeübertrager ist kein Rückschlagventil notwendig, da das Ventil oder eine genügend dichte Pumpe die Aufgabe der Rückflussverhinderung übernimmt.

Wird die Vorlaufleitung durch ein Ventil gesperrt, muss das Expansionsgefäß zwischen Kollektoreintritt und Ventil angeordnet sein, damit das Medium über die Rücklaufleitung aus dem Kollektor verdrängt werden kann. Wenn eine volumetrische Pumpe eingesetzt wird, muss das Expansionsgefäß aus demselben Grund auf der Druckseite angeschlossen sein. Dies muss bei der Dimensionierung des Expansionsgefäßes berücksichtigt werden: Das erforderliche Gefäßvolumen ist grösser als beim Anschluss auf der Saugseite, da der Betriebsdruck um den Förderdruck grösser ist.

Wenn eine volumetrische Pumpe eingesetzt wird, muss das Expansionsgefäß aus demselben Grund auf der Druckseite angeschlossen sein. Dies muss bei der Dimensionierung des Expansionsgefäßes berücksichtigt werden: Das erforderliche Gefäßvolumen ist grösser als beim Anschluss auf der Saugseite, da der Betriebsdruck um den Förderdruck grösser ist.

4.3 Begrenzen des Stillstandsdruckes

Dies kann entweder durch ein entsprechend gross dimensioniertes oder ein druckgesteuertes Expansionsgefäß erreicht werden, sodass der zulässige Maximaddruck des Expansionsgefäßes nicht erreicht wird. Die Einstellung des Gefäßvordruckes und des Fülldruckes richtet sich dann nach dem minimal erforderlichen Betriebsdruck im Kollektor, der erforderlich ist, um Dampfblasen bei Normalbetrieb zu verhindern. Die Temperatur in den indirekt beheizten Anlageteilen ist durch die Siedetemperatur bei dem entsprechenden Druck begrenzt. Auch hier ist ein gut funktionierendes Siphon vorzusehen.

4.4 Entleeren des Kollektorfeldes

Dies ist nur bei kleinen Anlagen mit volumetrischen Förderpumpen praktikabel. Falls der Kollektor nicht vollständig entleert werden kann, wird die restliche Flüssigkeit verdampfen und die Rohrleitungen durch ihre Kondensationswärme aufheizen. Beim Entleeren des Kollektors kommt das Wärmeträgermedium bei hoher Temperatur mit Luftsauerstoff in Berührung. Dies führt zu einem Abbau des Glykols. Wie rasch dieser Abbau geschieht, hängt unter Anderem von der Höhe und Häufigkeit der auftretenden Temperaturen und von der Menge des im Absorber verbleibenden Mediums ab. Experimente wären hier aufschlussreich.

4.5 Bei Anordnung des Kollektorfeldes unterhalb des Speichers

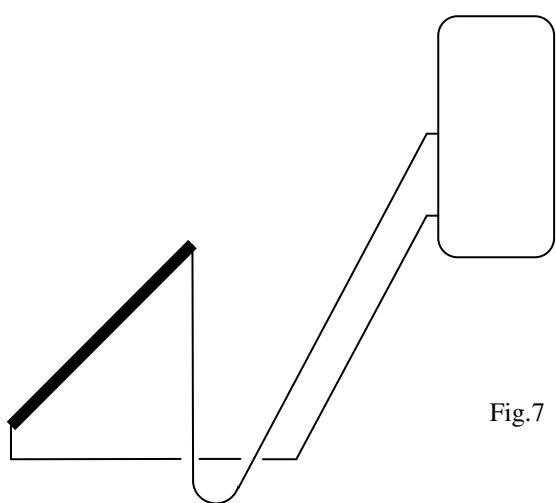


Fig.7

Die Vorlaufleitung sollte, wenn irgend möglich, nicht über den obersten Punkt des Kollektorfeldes geführt werden. Durch den statischen Druck der Flüssigkeitssäule kann der Druck im Kollektorfeld viel höher sein als erforderlich. Demzufolge sind auch die Siedetemperaturen des Mediums und damit die Belastung der Anlage höher. Die Ausbreitung des Dampfes kann auch hier durch ein Siphon auf das Kollektorfeld begrenzt werden. Falls die Vorlaufleitung gesperrt werden kann, genügt ein Siphon von der halben Höhe des Kollektorfeldes. Ohne eine dieser Massnahmen würde sich der gesamte Kreislauf infolge Schwerkraftzirkulation auf die Siedetemperatur des Mediums erwärmen!

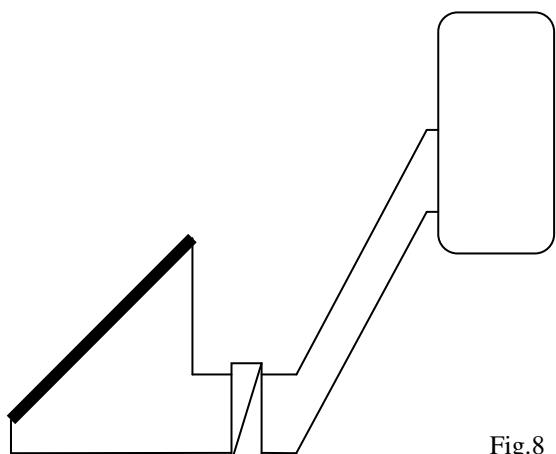


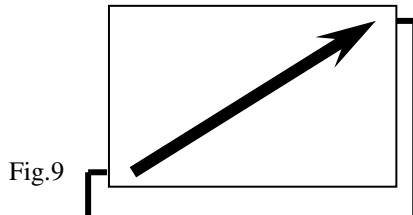
Fig.8

Das Problem kann auch durch die Anordnung des Wärmeübertragers unter dem Kollektorfeld gelöst werden (Fig.8). Damit sind die Kreisläufe hydraulisch entkoppelt und der Druck im Kollektorkreislauf wird über ein eigenes Expansionsgefäß aufrechterhalten.

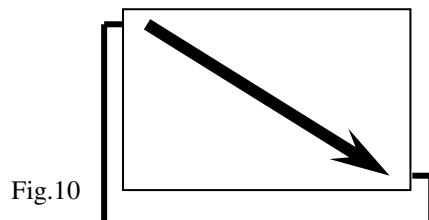
4.6 Hydraulische Schaltung in Kollektorfeldern und Absorbern:

Im Falle eines Anlagenstillstandes muss der Dampf von Anfang an ein zusammenhängendes Volumen bilden. Dadurch wird ein Druckaufbau durch serielle Wassersäulen innerhalb des Kollektorfeldes oder innerhalb eines Absorbers vermieden. Die auf die Vertikale bezogene Strömungsrichtung darf daher innerhalb des Feldes nur einmal umgekehrt werden, wobei die Vor- oder Rücklaufleitung mitgezählt werden muss, wenn deren Anschluss am obersten Punkt des Feldes erfolgt. Aus dieser Forderung ergeben sich drei zulässige Typen der hydraulischen Schaltung von Kollektorfeldern und Absorbern.

- A** Anspeisung des Kollektorfeldes unten,
Austritt der Vorlaufleitung oben.

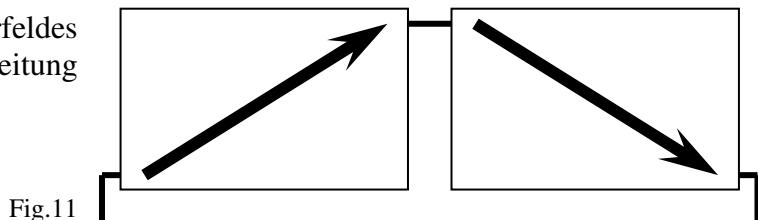


- B** Anspeisung des Kollektorfeldes oben,
Austritt der Vorlaufleitung unten.



Hier muss ein allfälliger Siphon beim Anschluss der Rücklaufleitung angeordnet werden und eine Sperrung des Solarkreises erfolgt in der Rücklaufleitung, sodass das flüssige Medium infolge Dampfbildung in den Kollektoren über die Vorlaufleitung in das Expansionsgefäß strömen kann. Das Expansionsgefäß muss zwischen dem Kollektoraustritt und dem Rückschlagventil bzw. dem Sperrventil oder einer volumetrischen Pumpe angeordnet sein. Die Rohrführung nach Typ B hat also zwei offensichtliche Vorteile: Beim Einsatz eines Rückschlagventils wird die Rücklaufleitung automatisch gesperrt, sodass auf ein gesteuertes Ventil verzichtet werden kann. In jedem Fall darf das Expansionsgefäß auf der Saugseite der Pumpe angeordnet werden.

- C** Anspeisung des Kollektorfeldes und Austritt der Vorlaufleitung unten.



Typ C ist eine Kombination der beiden Typen A und B. Ein Kollektorfeld vom Typ A bzw. B darf nur Teilstücke und Kollektorelemente vom selben Typ A bzw. B enthalten. Aus Kollektorelementen, deren Absorber selbst gemäß Typ C verschaltet sind, sollten daher keine Kollektorfelder gebaut werden. Dies würde einer Serieschaltung horizontal angeordneter Kollektoren entsprechen: Bei einem Anlagenstillstand kann das Wärmeträgermedium nicht durch den entstehenden Dampf aus den Kollektoren verdrängt werden, sondern gelangt hauptsächlich durch Verdampfen in die Vor und Rücklaufleitungen, wo es unter Wärmeabgabe wieder kondensiert. Dabei wird der ganze Kreislauf über weite Strecken auf Siedetemperatur aufgeheizt. Innerhalb des Feldes entstehen noch höhere Temperaturen als Folge der durch Addition der Wassersäulen erhöhten Drücke !

5 Messanordnung und Messmethoden

Zum Vergleich wurde auch die Anordnung gemäss (Fig.12) experimentell untersucht.

Die Vor- und Rücklaufleitungen sind auf der Rückseite des Kollektorfeldes verlegt (Fig.4).

Ursprünglich war kein Siphon eingebaut. Zum Schutz des Expansionsgefäßes vor zu hohen Temperaturen ist ein Puffergefäß vorgeschaltet.

Die Messanordnungen für Druck und Temperaturmessungen wurde in allen Experimenten beibehalten. Die Figur zeigt eine Auswahl der installierten Sensoren.

Die Temperatur T_1 wurde $0.4m$ vor dem Kollektoreintritt, T_2 am Ende der integrierten Sammelleitung beim Kollektoraustritt gemessen. Die Temperatur T_3 wurde $4m$ vom Kollektoraustritt entfernt in der horizontal verlaufenden Vorlaufleitung gemessen.

Die Globalstrahlung in der Kollektorebene betrug bei allen Experimenten $910 \pm 10 \text{ W/m}^2$.

Der gesamte Kollektorinhalt inklusive der integrierten Sammelleitungen beträgt $43l$, der Inhalt des gesamten Kreislaufs $130l$.

Die Temperaturen werden mit Pt-100 Widerstandsfühlern gemessen. Der Einfluss der Messleitungen wird durch eine 3-Leiter-Kompensationsschaltung eliminiert.

Der Druck im Solarkreis wird mit kapazitiven Drucktransmittern (SETRA C 207) gemessen, die ein Stromsignal von $4..20 \text{ mA}$ liefern.

Um Dampfschläge nachweisen zu können, wurde der Verlauf der Drücke vor der Pumpe sowie am Ein- und Austritt des Kollektorfeldes mit einem Speicheroszilloskop (LeCroy) aufgezeichnet. Dadurch konnte eine genügende zeitliche Auflösung von 4ms erreicht werden. Parallel dazu wurden die Drücke mit dem Datenlogger registriert.

Das Expansionsvolumen wurde rechnerisch aus dem Druckverlauf bestimmt. Die magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräte (KROHNE) sind für diesen Zweck nicht geeignet.

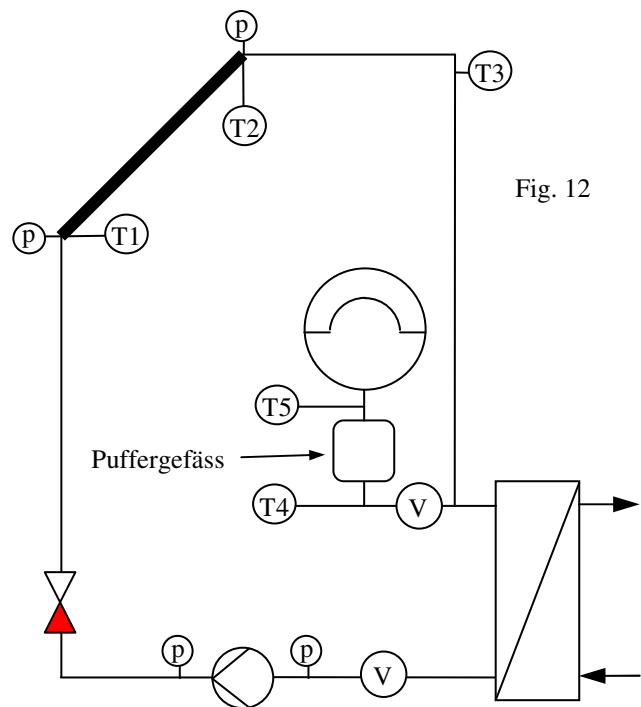


Fig. 12

6 Messresultate

Messung	Anordnung gemäss		
	Fig.2: Mit Siphon	Fig.6: Vorlaufleitung gesperrt	Fig.12: ohne Siphon
Expansionsvolumen [l]	43	43	59
Kollektoreintritt T1 [°C]	80	140	74
Vorlaufleitung T3 [°C]	135	<100	151
Vor Puffergefäß T4 [°C]	82	50	124
Vor Exp.gefäß T5 [°C]	78	<50	82

Das Expansionsvolumen setzt sich zusammen aus dem Dampfvolumen und der Volumenzunahme des flüssigen Mediums infolge thermischer Ausdehnung.

Die Temperatur T2 in der oberen integrierten Sammelleitung am Kollektoraustritt liegt zwischen der Siedetemperatur des Mediums, je nach Druck zwischen 135 und 155°C, und der Temperatur des überhitzten Dampfes von bis zu 160°C. Welche Temperatur sich jeweils einstellt, lässt sich nicht vorhersagen und hängt auch nicht prinzipiell davon ab, ob die Anlage ein Siphon am Kollektoraustritt aufweist oder ob die Vorlaufleitung im Stillstand gesperrt ist.

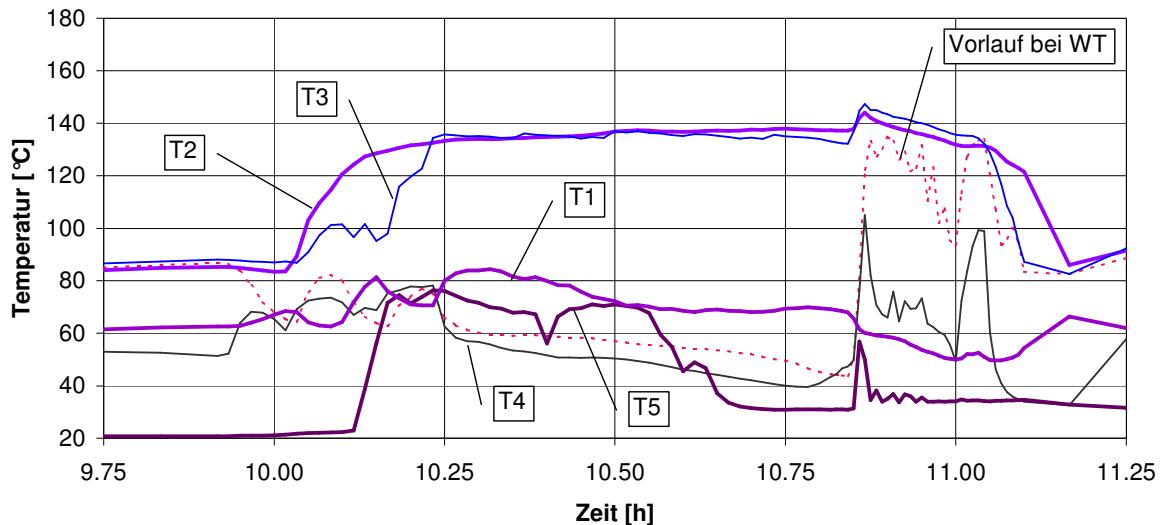
Die experimentellen Anordnungen zeigen deutliche Unterschiede sowohl Stillstandsverhalten als auch beim Anfahren aus dem Stillstand.

6.1 Siphon am Kollektoraustritt

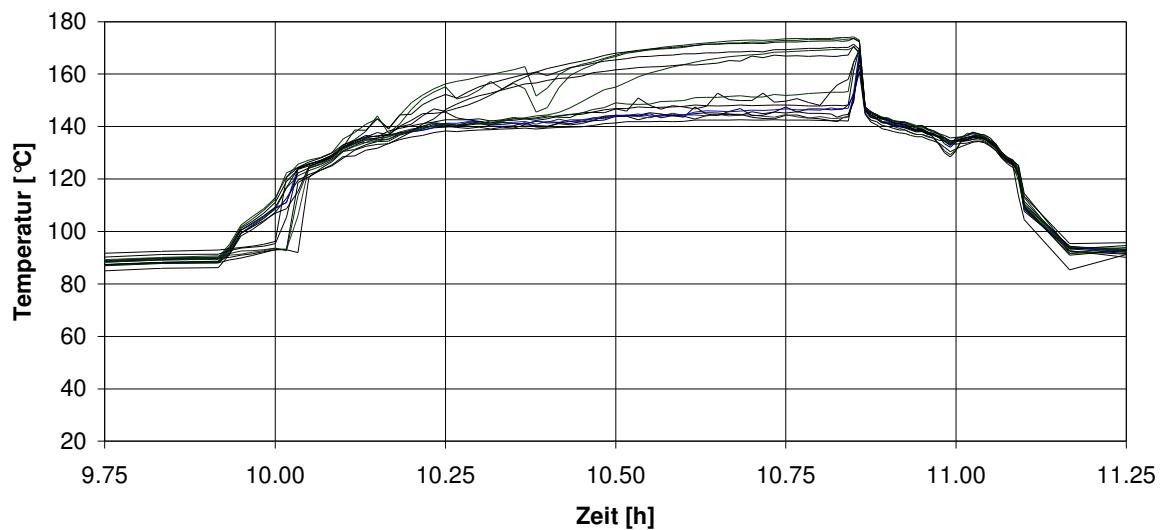
In den Experimenten sind keine Dampfschläge beobachtet worden. Bei Anlagen mit höheren spezifischen Durchflüssen ist eventuell ein langsames Anfahren der Solarkreispumpe erforderlich. Es gibt mehrere Gründe für das Ausbleiben von Dampfschlägen:

- Die Vorlaufleitung wird mindestens im Bereich des Siphons durch die Kondensationswärme auf Temperaturen knapp unterhalb des Siedepunktes aufgeheizt. Beim Anfahren strömt überhitzter Dampf in Teile der Leitung mit hoher Temperatur und kann daher nicht schlagartig kondensieren.
- Andererseits tritt ebenfalls auf Siedetemperatur erwärmtes Medium aus der Rücklaufleitung in den überhitzten Absorber. Dieser wird zwar lokal sofort auf Sattdampftemperatur gekühlt, eine Kondensation des bereits vorhandenen Dampfes findet aber nicht statt. Der Absorber wird vorerst dadurch gekühlt, dass eintretendes Medium verdampft wird. Daher beobachtet man in der Regel einen Druckanstieg über einige Minuten in der Größenordnung von 1 bar. Die tatsächliche Grösse des Druckanstieges kann durch die Grösse des Expansionsgefäßes beeinflusst werden.
- Der grösste Einfluss kommt aber daher, dass der Inhalt des Solarkreises beim Anfahren sanft aus dem hydrostatischen Gleichgewicht bewegt wird.

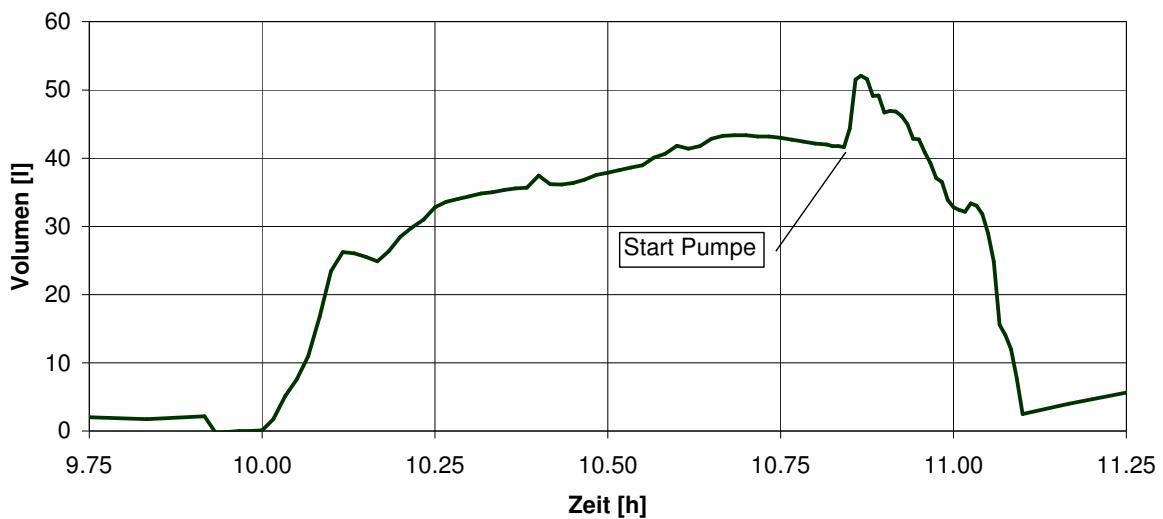
Temperaturen im Solarkreis



Temperaturen im Solarkreis



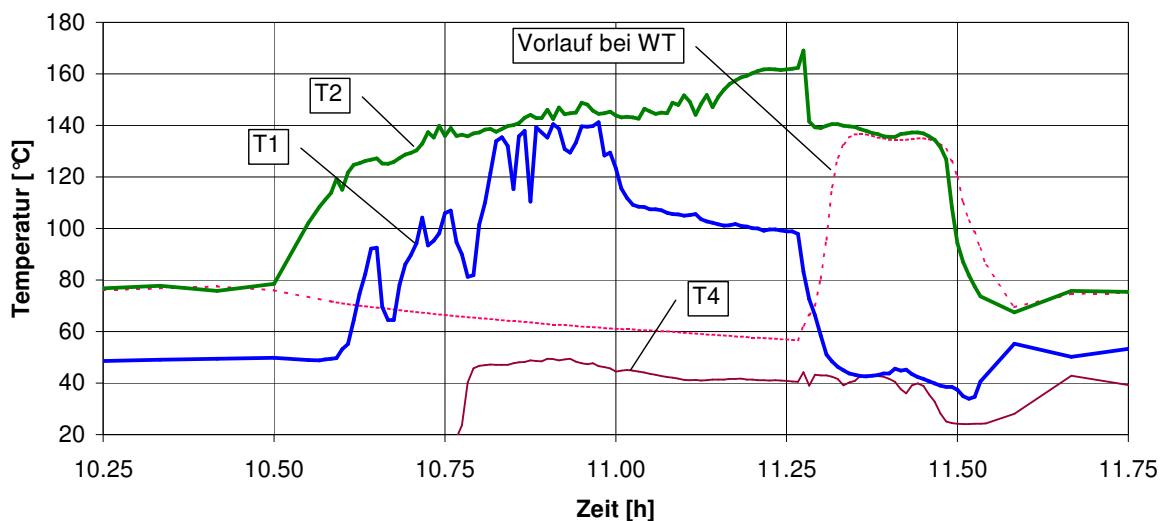
Expansionsvolumen



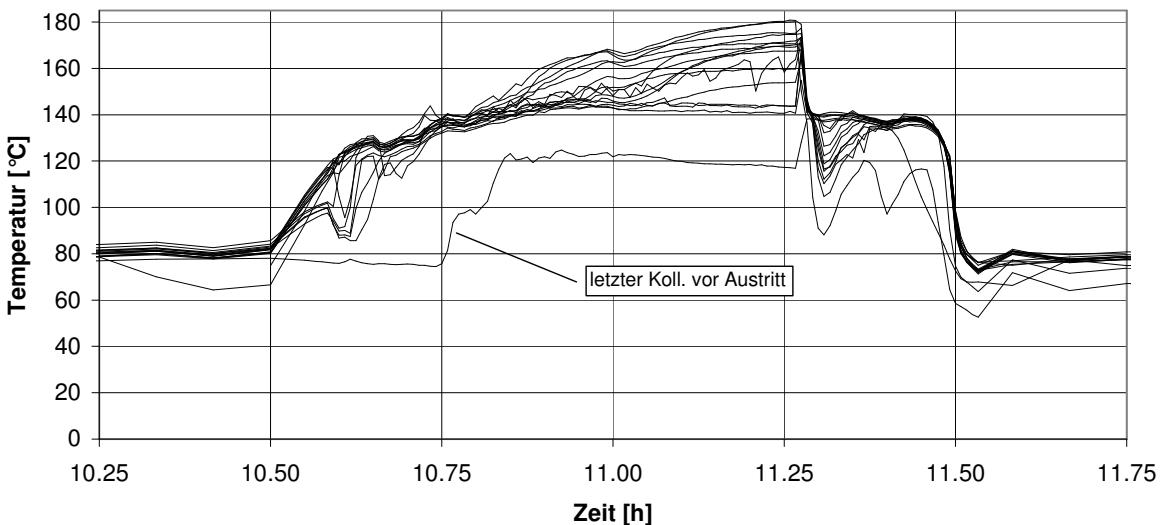
6.2 Vorlaufleitung gesperrt

Bei gesperrter Vorlaufleitung herrscht ein starkes Temperaturgefälle zwischen dem überhitzten Dampf im Absorber, dem Sattdampf in der Sammelleitung und der restlichen Flüssigkeit in der oberen Sammelleitung. Die Temperatur unmittelbar beim Kollektoraustritt entspricht der Siedetemperatur. Bereits 1m hinter dem Fühler entspricht die Temperatur der Vorlauftemperatur vor Beginn des Anlagenstillstandes. Der Inhalt der Vorlaufleitung kühlte während des Stillstandes infolge der Wärmeverluste langsam ab. Deutlich erkennbar ist der Anstieg der Temperatur beim Kollektoreintritt während der Verdampfungsphase, die mit ca. 0.5 h wesentlich kürzer ist als im Experiment ohne Siphon.

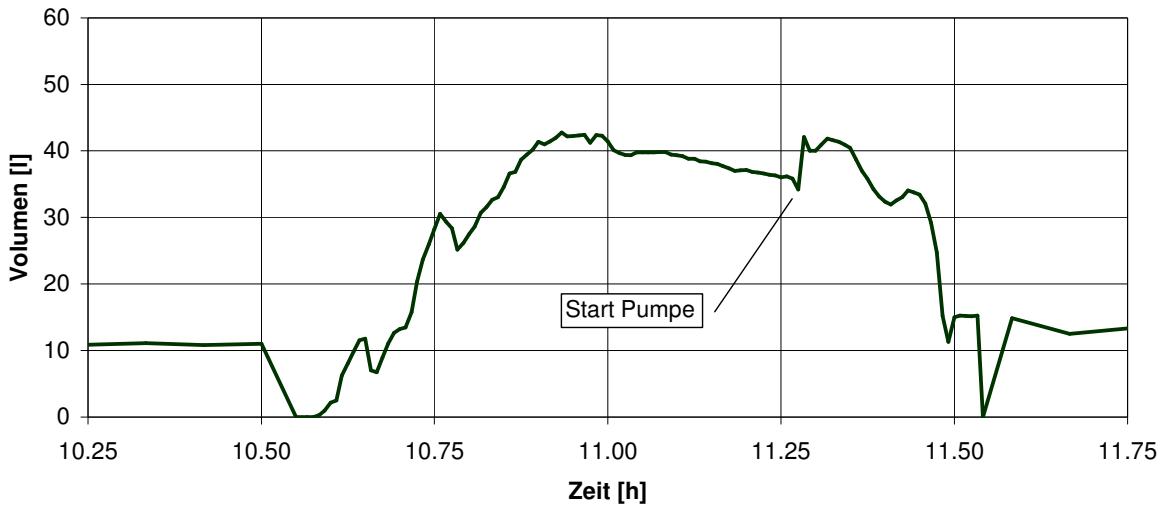
Temperaturen im Solarkreis



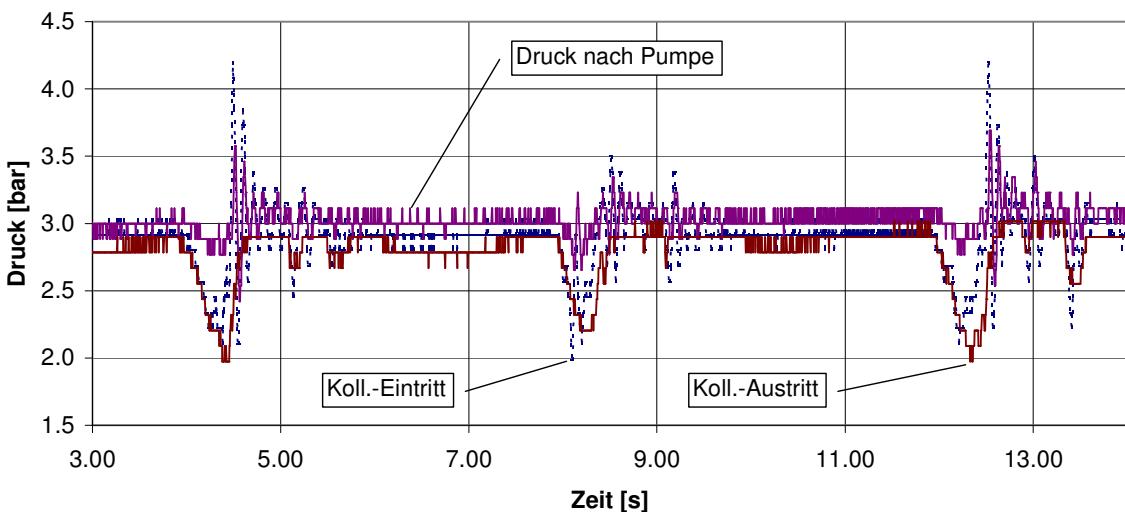
Absorbertemperaturen



Expansionsvolumen



Dampfschläge beim Anfahren



Beim Öffnen des Ventils wird das Wärmeträgermedium infolge der hydrostatischen Druckdifferenz rasch in Förderrichtung bewegt. Dampf strömt ebenso rasch in Teile der Vorlaufleitungen, deren Temperatur deutlich unter der Siedetemperatur liegen, während andererseits flüssiges Medium durch die Rücklaufleitung in den überhitzten Absorber strömt. Die Folge sind Dampfschläge infolge schlagartiger Kondensation. Während einiger Minuten sind der langsame Druckänderung Dampfschläge in Abständen von 1 bis 5 Sekunden überlagert. Dem Druckabfall infolge Kondensation folgt ein Druckstoss infolge Impulsänderung der Flüssigkeitssäulen. Die Messungen erlauben keine Aussage über die Energie der Dampfschläge am Ort ihres Auftretens. Ihre Amplituden dürften aber wesentlich grösser als die gemessenen sein.

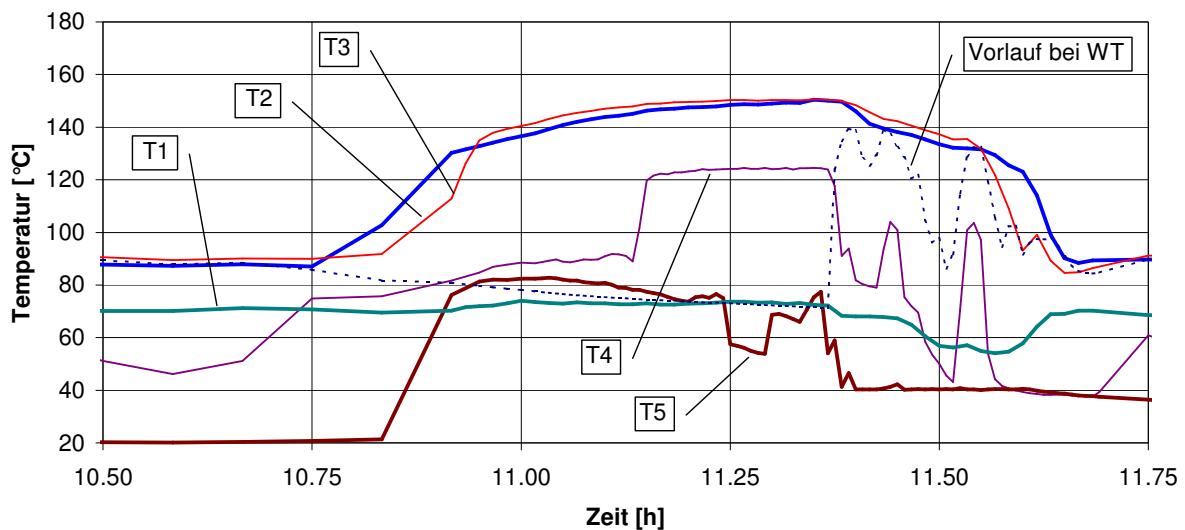
6.3 Ohne Siphon

Bei allen Anlagen, bei denen das Rückschlagventil zwischen dem Anschluss des Expansionsgefäßes und dem Kollektoreintritt angeordnet ist (Fig.9), muss mit grossen thermischen Belastungen gerechnet werden. Ein Siphon ist in diesem Fall wirkungslos. Auch das Expansionsvolumen ist aufgrund der hohen Temperaturen und des grossen Volumens der Vorlaufleitung wesentlich grösser als das Kollektorvolumen.

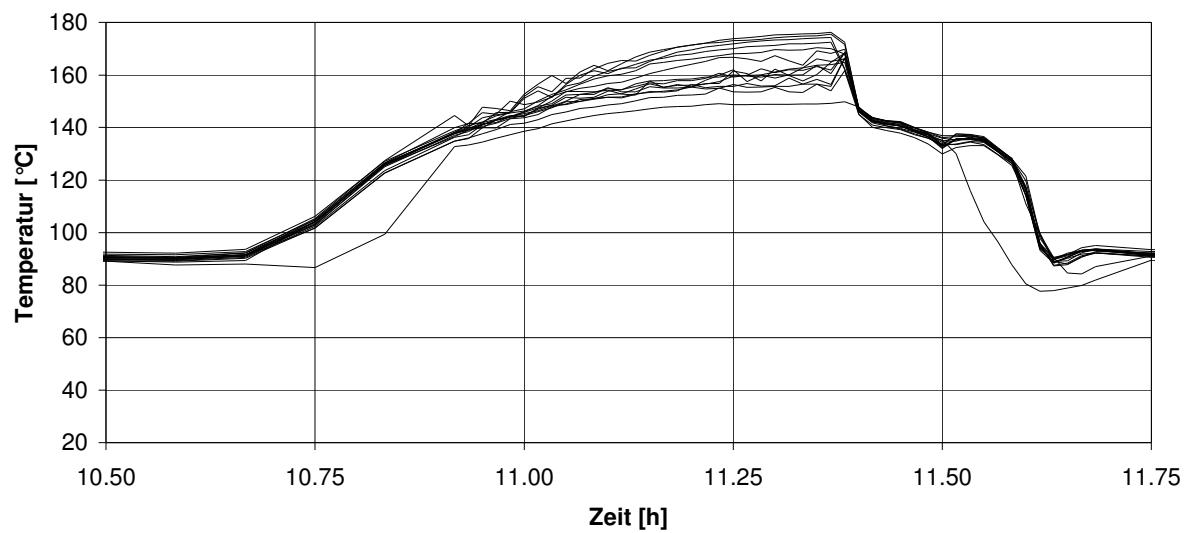
Beim Anfahren aus dem Stillstand wurden keine Dampfschläge registriert. Hingegen traten extreme Temperaturen weit über 100 Grad im gesamten Kreislauf auf.

Nachdem grosse Teile der Absorber auf Sattdampftemperatur gekühlt sind, sinkt der Druck unter den Stillstandsdruck vor dem Anfahren. Dies wiederum hat zur Folge, dass sich in der Vorlaufleitung ausgedehnte Dampfblasen bilden, während im Absorber der Dampf langsam kondensiert. Die Förderleistung einer Kreiselpumpe sinkt, weil einerseits durch das Verlagern der Dampfphase in die Vorlaufleitung ein hydrostatischer Gegendruck entsteht, andererseits durch Kavitation im Laufrad. Im Extremfall kann die Pumpe nicht mehr fördern und die Anlage geht erneut in den Stillstand.

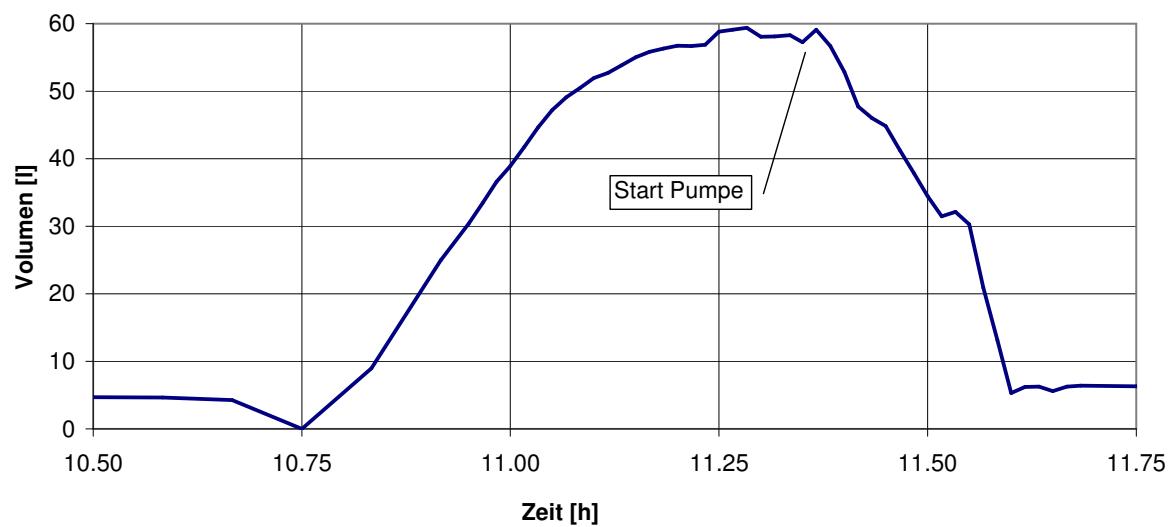
Temperaturen im Solarkreis



Temperaturen im Solarkreis



Expansionsvolumen



Bibliographie:

- [1] Bundesamt für Konjunkturfragen
Solare Warmwassererzeugung, Impulsprogramm PACER, 1995
- [2] DIN 4757, Sonnenheizungsanlagen
Teil 1, 1980
- [3] R. Eismann, P. von Felten
Dimensionierung von Expansionsgefäßen, BFE, ENET, 1998
- [4] R. Eismann, P. von Felten
Messprojekt 52m2 low-flow Solaranlage, Schlussbericht, BFE, ENET, 1998
- [5] SWISSOLAR, SOFAS, PROMES, BFE, E2000
Empfehlungen zu Nutzung von Sonnenenergie, 1997