

Forschungsprogramm

Solarwärme

Dimensionierung von Expansionsgefässen

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

Juli 1998

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein neues Verfahren zur Dimensionierung von Membran-Ausdehnungsgefässen (MAG) vorgestellt. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber den bisher angewendeten ist, dass es ausser der präzisen Dimensionierung des Gefässvolumens und des Gefässvordruckes auch explizite Angaben über das Reservevolumen und den zulässigen Bereich des Fülldruckes als Funktion der Temperatur macht. Dies ermöglicht die Kontrolle des Füllzustandes der Anlage in jedem beliebigen Betriebszustand. Der Anlagendruckverlust und die Temperaturverteilung im Kollektorfeld werden ebenfalls berücksichtigt.

1. Einleitung:

Die meisten Solaranlagen werden mit geschlossenem Solarkreislauf und einem frostsicheren Wärmeträgermedium betrieben. Der Druck wird oft über ein Membran-Ausdehnungsgefäss, im Folgenden MAG oder Expansionsgefäss genannt, aufrechterhalten. Zur Planung einer Solaranlage gehört neben der energetischen und hydraulischen Auslegung auch die Dimensionierung des Expansionsgefässes. Damit eine Anlage über Jahre wartungsfrei funktioniert, muss der richtige Betriebsdruck im Solarkreis bei allen Betriebszuständen gewährleistet sein. Die Erfahrung zeigt, dass die Ursachen von Schadenfällen in Solaranlagen zum grossen Teil mit dem Expansionsgefäss zusammenhängen:

- Gefässvordruck zu hoch oder zu niedrig
- Fülldruck zu hoch oder zu niedrig
- Gefässvolumen falsch dimensioniert
- Anschluss des Gefässes auf der Druckseite der Pumpe statt auf der Saugseite

Die Ermittlung der Fehlerquelle ist oft schwierig und somit auch der Entscheid, wer allfällige Garantieleistungen zu erbringen hat.

Die in Normen [3,11] und in der Fachliteratur [1,7,8,9,10] beschriebenen Verfahren zur Auslegung von Expansionsgefässen verwenden einfache Näherungsformeln oder Tabellen. Unsicherheiten und Ungenauigkeiten, die sich durch die Vereinfachungen ergeben, werden durch grosszügige Sicherheitsfaktoren kompensiert. Die Verfahren basieren auf unterschiedlichen Annahmen und führen daher auf unterschiedliche Resultate. Insbesondere ist es nicht möglich, anhand einer Manometerablesung Aussagen über den Füllzustand einer Anlage zu machen. Experimentelle Untersuchungen des Stillstandsverhaltens einer Solaranlage [5] gaben den Anlass zur Entwicklung des nachfolgend beschriebenen Verfahrens. Die Formeln gelten für Grössen in SI-Einheiten (Drücke in *Pascal* , Temperaturen in *Kelvin*). Im erläuternden Text wurden zur besseren Verständlichkeit die in der Praxis verwendeten technischen Einheiten *bar* und $^{\circ}\text{C}$ verwendet.

2. Grundlagen für die Dimensionierung

2.1. Charakteristische Größen einer Solaranlage

Zur Dimensionierung des Expansionsgefäßes müssen die folgenden Daten bekannt sein:

Volumen des Kollektorfeldes inkl. der Sammelleitungen	V_K	[l]
Volumen der Rohrleitungen	V_L	[l]
Volumen der Wärmeübertrager	V_{WT}	[l]
Max. Höhendifferenz zwischen Kollektorfeld und Expansionsgefäß	h_K	[m]
Max. Höhendifferenz zwischen Vorlaufleitung und Expansionsgefäß	h_L	[m]
Druckverlust zwischen Kollektorfeldaustritt und Expansionsgefäß	Δp	[bar]
Zulässiger Druck (absolut) im Expansionsgefäß bzw. Schliessdruck des Sicherheitsventils.	p_{zul}	[bar]

Einige Daten sind kaum von der Anlagengrösse abhängig, und können als Konstanten in die Berechnung eingesetzt werden:

Glykolkonzentration und Glykolfabrikat	%	[-]
Max. Abweichung der Kollektorausstritt von der Vorlauftemperatur	ΔT	[K]
Max. zulässige Vorlauftemperatur	T_{Vzul}	[K]
minimale mittlere Kreislauftemperatur im Winter	T_R	[K]

2.2. Extremale Betriebszustände einer Solaranlage

Das Feld der möglichen Betriebszustände einer Solaranlage ist durch vier Extremzustände begrenzt:

2.2.1. Ruhezustand bei minimaler Kreislauftemperatur

Durch die Volumenverminderung infolge Abkühlung sinkt der Druck im Solarkreis. Der Druck darf an keiner Stelle des Kreislaufes unter den Atmosphärendruck sinken. Der minimale Druck soll um einen Sicherheitszuschlag von ca. $s_0 = 0.1 \text{ bar}$ höher sein als der Atmosphärendruck.

$$p_{min} = p_{Atm} + s_0 \cong 1.1 \text{ bar} \quad (2.1)$$

2.2.2. Anfahren aus dem Ruhezustand

Die folgende Situation kann an kalten, sonnigen Wintertagen auftreten: Der Speicher ist durch einen Holzschnitzelkessel vollständig auf $70 \text{ }^\circ\text{C}$ geladen. Die Solarkreispumpe schaltet daher erst bei einer Kollektortemperatur von beispielsweise $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ein, während sich der übrige Kreislauf noch auf der tiefsten anzunehmenden Temperatur befindet. Der Systemdruck ist wegen der niedrigen mittleren Kreislauftemperatur tief, muss aber immer noch höher als der Dampfdruck sein, sonst kommt es in der Startphase zu lokaler Dampfbildung in den Kollektoren.

Diese Situation ist für die Auslegung bei der Verwendung üblicher Wärmeträgermedien und Arbeitstemperaturen nicht massgebend, weil der Dampfdruck $p_D < 0.6 \text{ bar}$ bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ wesentlich kleiner als der erforderliche Minimaldruck $p_{min} = 1.1 \text{ bar}$ bei kalter Anlage ist. Die Volumenausdehnung des Mediums kann in dieser Abschätzung getrost vernachlässigt werden.

2.2.3. Betrieb bei maximaler Kreislauftemperatur

Das Wärmeträgermedium darf bei Betrieb der Anlage nicht kochen. Der Druck an der obersten Stelle des Solarkreislaufes muss also mindestens dem Dampfdruck p_D des Mediums entsprechen. Ist der Druck zu tief, bilden sich Dampfblasen, welche in den betroffenen Kollektoren die Zirkulation des Mediums behindern oder ganz blockieren.

a) Austritt des Kollektorfeldes: Bei Kollektorfeldern, die nach Tichelmann angeschlossen sind, werden die mittleren Kollektoren weniger stark durchströmt und damit schlechter gekühlt als die ersten und letzten einer Reihe [4,6]. Dadurch ist die Austrittstemperatur der mittleren Kollektoren höher als die Vorlauftemperatur. Bei anderen Anschlussarten ist die Abweichung grösser. Ein Kollektorfeld sollte auch aus energetischen Gründen hydraulisch so gestaltet sein, dass die maximale Austrittstemperatur des am wenigsten durchströmten Kollektors die zulässige Vorlauftemperatur höchstens um 20% übersteigt. Massgebend ist also einerseits die zulässige Vorlauftemperatur T_{Vzul} des Solarkreises, andererseits die maximale positive Abweichung der Austrittstemperatur ΔT einzelner Absorber von der Vorlauftemperatur. Genügende Sicherheit gegen Dampfbildung ist gewährleistet, wenn der Betriebsdruck um einen Sicherheitszuschlag s_B von ca. 0.1 bar höher ist als der Dampfdruck bei der höchsten anzunehmenden Temperatur. Damit kann der erforderliche Betriebsdruck p_{BK} am obersten Punkt des Kollektorfeldes berechnet werden:

$$p_{BK} = p_D(T_{Vzul} + \Delta T) + s_B \quad (2.2)$$

b) Rohrleitungen des Solarkreises: Liegt das Kollektorfeld tiefer als der oberste Punkt des Kreislaufes, so muss der erforderliche Betriebsdruck p_{BL} am obersten Punkt des Leitungssystems zusätzlich die folgende Bedingung erfüllen:

$$p_{BL} = p_D(T_{Vzul}) + s_B \quad (2.3)$$

Der Dampfdruck als Funktion der Temperatur und der Glykolkonzentration kann aus den Datenblättern des Herstellers entnommen, oder durch eine genügend genaue Näherungsformel berechnet werden.

2.2.4. Anlagenstillstand

Bei Anlagenstillstand wird das Medium durch Dampfbildung aus dem Absorber über die Leitungen in das Expansionsgefäss verdrängt und der Druck im Kreislauf steigt über den maximalen Druck bei Normalbetrieb an. Der zulässige Druck im Expansionsgefäss p_{zul} darf dabei nicht überschritten werden. Das Dampfvolumen V_D entspricht bei korrekter Verrohrung der Kollektoren [5] etwa dem Absorberinhalt inklusive der Sammelleitungen V_K . In ungünstigen Fällen muss mit einem um 50% grösseren Volumen gerechnet werden. Das Expansionsgefäss muss das entsprechende Volumen aufnehmen können.

2.3. Volumenausdehnung des Wärmeträgermediums

Bei der Auslegung des Expansionsgefäßes muss die Volumenausdehnung des Wärmeträgermediums berücksichtigt werden. Die Volumenausdehnung der Rohre und Behälter beträgt nur wenige Prozent des Wertes von üblichen Wärmeträgermedien und kann somit vernachlässigt werden. Die Temperaturdifferenzen zwischen der maximal zulässigen mittleren Betriebstemperatur T_B und der tiefsten mittleren Anlagentemperatur T_R bzw. der Fülltemperatur T_F führen infolge des Dichteunterschiedes zu einer Volumenänderung gegenüber dem Volumen bei Betriebstemperatur. Die maximale mittlere Betriebstemperatur darf für die Anforderungen dieser Rechnung in guter Näherung mit der zulässigen Vorlauftemperatur T_{Vzul} gleichgesetzt werden.

$$\Delta V(T_{Vzul}, T_R) = \alpha(T_{Vzul}, T_R) V'_A \quad (2.4)$$

mit dem Volumenausdehnungskoeffizient

$$\alpha_R(T_{Vzul}, T_R) = \frac{\rho(T_R) - \rho(T_{Vzul})}{\rho(T_{Vzul})} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_F(T_{Vzul}, T_R) = \frac{\rho(T_F) - \rho(T_{Vzul})}{\rho(T_{Vzul})} \quad (2.5)$$

Bei Anlagen mit im Speicher integriertem Wärmeübertrager muss vom Volumen der gesamten Anlage V_A der Inhalt des Wärmeübertragers V_{WT_int} abgezogen werden, da dieser den Temperaturschwankungen der Leitungen und des Kollektors nicht in derselben Masse unterworfen ist.

$$V_A = V_K + V_L + V_{WT} \quad V'_A = V_A - V_{WT_int} \quad (2.6)$$

2.4. Reservevolumen

Das Expansionsgefäß muss ein Reservevolumen enthalten, damit der Flüssigkeitsverlust bei allfälligen Repraturarbeiten, beispielsweise beim Auswechseln der Solarkreispumpe, ausgeglichen werden kann. Man wählt aus praktischen Gründen das Reservevolumen im Verhältnis β zum Anlagenvolumen bzw. ein minimales Reservevolumen.

$$V_{Res} = \max\{\beta V_A, V_{Res_min}\} \quad (2.7)$$

3. Betriebszustände des Expansionsgefäßes

Das Expansionsgefäß muss einerseits die entsprechenden Minimaldrücke im Kreislauf aufrechterhalten, andererseits darf der zulässige Druck im Expansionsgefäß nicht überschritten werden.

3.1. Erforderlicher Druck im Expansionsgefäß bei kalter Anlage:

Der Druck im Expansionsgefäß unterscheidet sich von den Drücken an anderen Stellen des Kreislaufes durch die statische Druckdifferenz infolge des Höhenunterschiedes h_K und h_L zwischen dem Kollektorausritt bzw. dem obersten Punkt des Kreislaufes und dem Expansionsgefäß. Bei Kollektorfeldern, die von unten nach oben durchströmt werden, ist der oberste Punkt

des Kreislaufes meistens mit dem Kollektorausstritt identisch. Massgebend sind die erforderlichen Drücke im Solarkreis bei kalter Anlage und die Höhenunterschiede.

$$p_R = \max \{ p_{\min} + \rho g h_K, p_{\min} + \rho g h_L, p_{\min} + s_R \} \quad (3.1)$$

3.2. Erforderlicher Druck im Expansionsgefäß bei Betrieb:

Neben den statischen Drücken muss noch der Druckverlust Δp zwischen Kollektorausstritt und dem Anschluss der Expansionsleitung berücksichtigt werden. Im Betrieb bei maximaler mittlerer Kreislauftemperatur ist der minimal erforderliche Betriebsdruck im Expansionsgefäß:

$$p_B = \max \{ p_{BK} + \rho g h_K + \Delta p, p_{BL} + \rho g h_L + \Delta p, p_{LB}, p_{\min} \} \quad (3.2)$$

Die Definitionen von p_R und p_B berücksichtigen auch den Fall, wo das Kollektorfeld unterhalb des Expansionsgefäßes liegt. In diesem Fall sorgt der Zuschlag $s_R > s_0$ zum minimalen Anlagendruck $p_{\min}$ dafür, dass für die Einstellung des Vordruckes nicht ein einziger Wert, sondern ein Bereich $p_{0\max} - p_{0\min} = s_R - s_0 > 0$ vorgeschlagen wird.

Damit ein möglichst kleines Gefäßvolumen gewählt werden kann, muss der Betriebsdruck im Expansionsgefäß klein sein. Dies kann durch zwei Massnahmen erreicht werden:

- Anordnen des Expansionsgefäßes möglichst hoch oben, in der Nähe des obersten Punktes im Kreislauf.
- Anschluss des Expansionsgefäßes auf der Saugseite der Pumpe.

3.3. Zulässiger Druck im Expansionsgefäß bei Anlagenstillstand:

Wenn dem Expansionsgefäß kein Puffergefäß vorgeschaltet ist, wird das Luftvolumen im Expansionsgefäß durch das rückströmende Medium von der Betriebstemperatur um ΔT_S auf seine Stillstandstemperatur erwärmt. Der zulässige Druck ist daher um das Verhältnis der beiden Temperaturen vermindert. Da mit absoluten Temperaturen gerechnet wird, kann die Betriebstemperatur des Expansionsgefäßes in guter Näherung der minimalen mittleren Kreislauftemperatur T_R gleichgesetzt werden.

$$p_S = p_{zul} \frac{T_R}{T_R + \Delta T_S} \quad (3.3)$$

Wird dem Expansionsgefäß ein Puffergefäß mit ausreichendem Inhalt vorgeschaltet, darf mit dem zulässigen Druck als Stillstandsdruck gerechnet werden.

$$p_S = p_{zul} \quad (3.4)$$

Der Inhalt des Puffergefäßes muss dem Dampfvolumen entsprechen, damit der gesamte erwärmte Inhalt aus den Kollektoren und den Rohrleitungen im Falle eines Anlagenstillstandes im Puffergefäß Platz hat.

4. Dimensionierung des Gefässvolumens

4.1. Minimal erforderliches Gefässvolumen

Die drei extremalen Betriebszustände des Expansionsgefässes, durch die Drücke in (3.1), (3.2) und (3.3) bzw. (3.4) definiert, liefern drei Gleichungen zur Bestimmung des minimal erforderlichen Gefässvolumens:

1. Begrenzen des maximalen Druckes auf den zulässigen Druck bei Anlagenstillstand. Bei korrekter Rohrführung entspricht das Dampfvolumen V_D dem Volumen des Kollektorfeldes V_K .

$$p_{0max} V_{0min} = p_S V_S = p_S (V_B - V_D - V_{Res}) \quad (4.1)$$

2. Vermeiden von Dampfblasen im Betrieb bei maximal zulässiger Vorlauftemperatur. Der erforderliche Druck beim Kollektoraustritt darf auch dann nicht unterschritten werden, wenn das gesamte Reservevolumen aufgebraucht ist.

$$p_{0max} V_{0min} \geq p_B V_B \quad (4.2)$$

3. Garantieren eines minimalen Druckes bei der tiefsten anzunehmenden Kreislaufftemperatur. Auch diese Bedingung muss erfüllt sein, wenn das gesamte Reservevolumen aufgebraucht ist.

$$p_{0max} V_{0min} \geq p_R (V_B + \alpha_R V'_A) \quad (4.3)$$

Zunächst ergibt sich das im Expansionsgefäss eingeschlossene Luftvolumen V_B im Betrieb. Hier entscheidet sich, ob der Druck im Ruhezustand p_R oder im Betriebszustand p_B die entscheidende Grösse ist:

$$V_B = \max \left\{ \frac{p_S (V_D + V_{Res})}{p_S - p_B}, \frac{p_S (V_D + V_{Res}) + p_R \alpha_R V'_A}{p_S - p_R} \right\} \quad (4.4)$$

Das erforderliche Gefässvolumen hängt vom Druck der Gasfüllung bei leerem Gefäss ab. Das Gefässvolumen lässt sich optimal ausnützen, wenn der Vordruck so gross wie möglich ist. Auch bei kalter Anlage muss mindestens eine kleine Menge Wärmeträgermedium im Expansionsgefäss vorhanden sein, über die sich der Druck des Gaspolsters auf den Kreislaufinhalt übertragen kann. Man wählt deshalb den Vordruck um einen Betrag s_0 von beispielsweise 0.1 bar kleiner als den sich tatsächlich einstellenden Betriebsdruck p_R .

$$p_{0max} = p_R - s_0 = \frac{p_S (V_B - V_D - V_{Res})}{V_B + \alpha V'_A} - s_0 \quad (4.5)$$

Einsetzen von V_B in (4.2) ergibt das minimal erforderliche Volumen des Expansionsgefässes:

$$V_{0min} = \frac{p_S}{p_{0max}} (V_B - V_D - V_{Res}) \quad (4.6)$$

Gewählt wird das nächstgrössere Normgefäss mit dem Volumen V_0 .

5. Wahl des Gefässvordruckes

Durch die Wahl von $V_0 > V_{erf}$ ergibt sich ein zulässiger Bereich für den Gefässvordruck, dessen Untergrenze sich wiederum aus den drei Bestimmungsgleichungen (4.1), (4.2) und (4.3) berechnet lässt. Der Vordruck muss mindestens so gross sein, dass einerseits der Druck bei Anlagenstillstand p_S nicht überschritten wird und andererseits die beiden Drücke p_R und p_B mindestens erreicht werden. Der minimale Vordruck ergibt sich aus der Gleichung (4.1) mit dem Volumen V_B aus (4.4).

$$p_{0min} = \frac{p_S}{V_0} (V_B - V_D - V_{Res}) \quad (5.1)$$

Der maximale Gefässvordruck ist, weil unabhängig vom Gefässvolumen, nach wie vor durch (4.5) gegeben. Der zulässige Bereich des Vordruckes ist:

$$p_0 \in \{p_{0min}, p_{0max}\} \quad (5.2)$$

Je höher der Vordruck gewählt wird, desto grösser ist der zulässige Bereich des Fülldruckes und desto besser wird das Gefässvolumen ausgenützt.

6. Zulässiger Bereich des Fülldruckes

Der zulässige Bereich des Fülldruckes ist durch die Gleichungen (4.1), (4.2) und (4.3) bestimmt, wobei an Stelle von p_{0max} und V_{erf} die effektiven Grössen p_0 und V_0 eingesetzt sind.

$$p_0 V_0 = p_S V_S = p_S (V_B - V_D - V_{Res}) \quad (6.1)$$

$$p_0 V_0 \geq p_B V_B \quad (6.2)$$

$$p_0 V_0 \geq p_R (V_B + \alpha_R V'_A) \quad (6.3)$$

Der Fülldruck ist abhängig von der aktuellen mittleren Kreislauftemperatur während des Füllens. Der Ausdehnungskoeffizient α_F berücksichtigt die Volumenausdehnung des Mediums bei einer Erwärmung von der Fülltemperatur auf die maximale Betriebstemperatur. Der Zustand bei Fülltemperatur ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$p_0 V_0 = p_F (V_B + \alpha_F V'_A) \quad (6.4)$$

Aus den Gleichungen (6.1) und (6.4) erhält man den maximalen Fülldruck, der durch den Zustand bei Anlagenstillstand begrenzt ist.

$$p_{Fmax} = \frac{p_S p_0 V_0}{p_0 V_0 + p_S (V_D + \alpha_F V'_A)} \quad (6.5)$$

Die Gleichungen (6.2) und (6.3) liefern zwei Bedingungen für das im Expansionsgefäß eingeschlossene Luftvolumen V_B als Funktion des Vordruckes und des Gefäßvolumens:

$$V'_B = \min \left\{ \frac{p_0 V_0}{p_B}, \frac{p_0 V_0}{p_R} - \alpha_R V'_A \right\} \quad (6.6)$$

Durch Einsetzen von V'_B in (6.4) erhält man den minimal erforderlichen Fülldruck. Die Solaranlage enthält bei diesem Druck das Reservevolumen V_{Res} .

$$p_{F \min} = \frac{p_0 V_0}{V'_B + \alpha_F V'_A - V_{Res}} \quad (6.7)$$

Die unterste Grenze für den Druck im Expansionsgefäß ist durch die Bedingung gegeben, dass die Drücke p_B und p_R auch dann erreicht werden müssen, wenn das Reservevolumen V_{Res} aufgebraucht ist:

$$p_{F \min_leer} = \frac{p_0 V_0}{V'_B + \alpha_F V'_A} \quad (6.8)$$

Die Darstellung des Fülldruckes als Funktion der Temperatur ermöglicht die einfache und sichere Inbetriebnahme und periodische Kontrolle des Füllzustandes der Anlage. Falls sich das Manometer nicht auf derselben Höhe wie das Expansionsgefäß befindet, sondern beispielsweise 1 m darüber, muss der entsprechende statische Druck von 0.1 bar von p_F subtrahiert werden.

7. Berechnen des gesamten Wärmeträgervolumens:

Der Wärmeträgerinhalt V_{FL} der Solaranlage setzt sich aus dem Kollektorinhalt V_K , dem Inhalt der Rohrleitungen V_L und des Wärmeübertragers V_{WT} und dem Flüssigkeitsinhalt des Expansionsgefäßes zusammen:

$$V_{Fl} = V_K + V_L + V_{WT} + \left(V_0 - \frac{p_0 V_0}{p_F} \right) \quad (7.1)$$

8. Berechnungsbeispiel:

Eine Solaranlage sei durch folgende Daten charakterisiert:

Volumen des Kollektorfeldes	V_K	40	[l]
Volumen der Rohrleitungen	V_R	50	[l]
Volumen des externen Wärmeübertragers	V_{WT}	5	[l]
Max. Höhendifferenz zwischen Kollektorfeld und Expansionsgefäß	h_K	10	[m]
Max. Höhendifferenz zwischen Vorlaufleitung und Expansionsgefäß	h_L	10	[m]
Druckverlust zwischen Kollektorfeldaustritt und Expansionsgefäß	Δp	0.1	[bar]
Zulässiger Druck (absolut) im Expansionsgefäß bzw. Schliessdruck des Sicherheitsventils.	p_{zul}	3.9	[bar]
Glykolkonzentration (Propylenglykol Dowcal 20)	%	33	[-]
Max. Abweichung der Kollektorausstritt von der Vorlauftemperatur	ΔT	5	[K]
Max. zulässige Vorlauftemperatur	T_{Vzul}	100	[°C]
Minimale mittlere Kreislauftemperatur im Winter	T_R	0	[°C]

Stoffdaten des Mediums:

Dampfdruck bei $T_{Vzul} + \Delta T$	p_{DK}	1.168	[bar]
Dampfdruck bei T_{Vzul}	p_{DL}	0.975	[bar]
Dichte bei T_{Vzul}	ρ	978	[kg/m ³]

Um mit Drücken in *bar* an Stelle von *Pascal* rechnen zu können, wird mit der Erdbeschleunigung $g = 9.81 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{bar} / \text{s}^2 \cdot \text{Pa}$ gerechnet. Absolutdrücke sind mit *bar*, Überdrücke mit *bar_ü* bezeichnet.

Der minimale Druck im Ruhezustand an einer beliebigen Stelle des Solarkreises ist durch (2.1) auf $p_{min} = 1.1 \text{ bar}$ festgelegt. Die erforderlichen Betriebsdrücke im Kollektor bzw. am obersten Punkt des Leitungssystems ergeben sich aus den Dampfdrücken und der Sicherheitszuschlag gegen Dampfbildung aus (2.2) $p_{BK} = 1.168 + 0.1 = 1.268 \text{ bar}$ und (2.3) $p_{BL} = p_{min} = 1.1 \text{ bar}$. Meistens ist p_{BK} massgebend, weil in den meisten Anlagen der oberste Punkt des Leitungssystems mit dem Kollektorausstritt identisch ist.

Der Volumenausdehnungskoeffizient beträgt nach (2.5) $\alpha_R = 6.13 \cdot 10^{-2} [-]$ und das Anlagenvolumen ohne den Flüssigkeitsinhalt des Expansionsgefässes nach (2.6) $V'_A = 40 + 50 + 5 = 95 \text{ l}$.

Das Reservevolumen ergibt sich aus (2.7) mit $\beta = 0.05$ und $V_{Res_min} = 3 \text{ l}$ zu 4.8 l . Mit den nun bekannten Daten werden gemäss (3.1) und (3.2) die erforderlichen Drücke im Expansionsgefäß berechnet: $p_R = 1.078 + 978 \cdot 9.81 \cdot 10^{-5} \cdot 10 = 2.06 \text{ bar}$ und

$$p_B = 1.268 + 978 \cdot 9.81 \cdot 10^{-5} \cdot 10 - 0.1 = 2.13 \text{ bar}$$

Da ein Puffergefäß vorgesehen ist, darf nach (3.4) für den Stillstandsdruck der zulässige Druck im Expansionsgefäß eingesetzt werden: $p_S = p_{zul} = 3.9 \text{ bar}$

Aus (4.4) wird das im Expansionsgefäss eingeschlossene Luftvolumen berechnet. Bei den vorliegenden Randbedingungen ist der Ruhedruck p_R massgebend:

$$V_B = \frac{3.9 \cdot (40 + 4.8) + 2.06 \cdot 6.13 \cdot 10^{-2} \cdot 95}{3.9 - 2.06} = 101.4 \text{ l}$$

Unter Verwendung des maximalen Gefässvordruckes aus (4.5) $p_{0max} = 2.06 - 0.1 = 1.96 \text{ bar}$

folgt aus (4.6) das minimal erforderliche Gefässvolumen:

$$V_{0min} = \frac{3.9}{1.96} (101.4 - 40 - 4.8) = 112.7 \text{ l}$$

Durch die Wahl des nächstgrösseren Normvolumens $V_0 = 140 \text{ l}$ ist nach (5.1) ein minimaler

Vordruck von $p_{0min} = \frac{3.9}{140} (101.4 - 40 - 4.8) = 1.58 \text{ bar}$ möglich. Der Vordruck soll aber

möglichst hoch, beispielsweise $1.9 \text{ bar} = 0.9 \text{ bar}_{\ddot{u}}$ eingestellt werden.

Bei einer Fülltemperatur von 30°C und dem entsprechenden Volumenausdehnungskoeffizient

$\alpha_F = 0.0493 [-]$ ergibt sich aus (6.5) der der maximale Fülldruck:

$$pF \text{ max} = \frac{3.9 \cdot 1.9 \cdot 140}{1.9 \cdot 140 + 3.9(40 + 0.0493 \cdot 95)} = 2.36 \text{ bar} = 1.36 \text{ bar}_{\ddot{u}}$$

Das sich einstellende Luftvolumen bei Betrieb ist durch (6.6) gegeben:

$$V'_B = \frac{1.9 \cdot 140}{2.06} - 6.13 \cdot 10^{-2} \cdot 95 = 123.3 \text{ l} \quad \text{Damit ergibt sich der minimale Fülldruck gemäss}$$

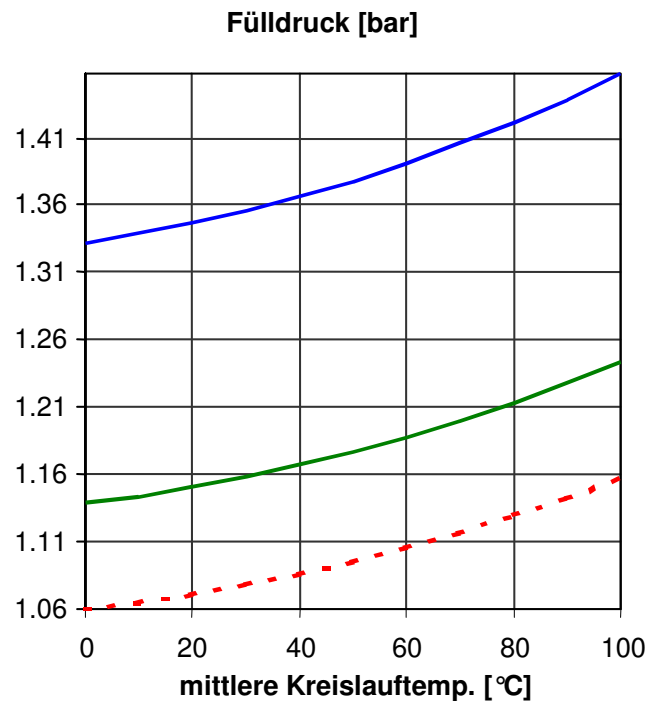
$$(6.7) \text{ zu } pF \text{ min} = \frac{1.9 \cdot 140}{123.3 + 0.0493 \cdot 95 - 4.8} = 2.16 \text{ bar} = 1.16 \text{ bar}_{\ddot{u}}$$

Die Anlage muss nachgefüllt werden, wenn das Reservevolumen aufgebraucht und der Druck

$$(6.8) \text{ unterschritten ist: } p_{F \text{ min}_{\text{leer}}} = \frac{1.9 \cdot 140}{123.3 + 0.0493 \cdot 95} = 2.079 \text{ bar} = 1.079 \text{ bar}_{\ddot{u}}$$

Bei maximalem Fülldruck beträgt der Flüssigkeitsinhalt der Anlage (7.1) :

$$V_{Fl} = 40 + 50 + 5 + \left(140 - \frac{1.9 \cdot 140}{2.36} \right) = 122 \text{ l}$$



Dem Reservevolumen entspricht die Druckdifferenz zwischen den unteren beiden Kurven. Fällt der Druck unter die gestrichelte Kurve, muss die Anlage auf eventuelle Lecks untersucht und das fehlende Wärmeträgermedium nachgefüllt werden. Bei einem auf 1.58 bar eingestellten Vordruck würde die beiden ausgezogenen Kurven, die den zulässigen Bereich begrenzen, zusammenfallen, und man hätte keinen Spielraum mehr für die Einstellung des Fülldruckes.

Bibliographie:

- [1] Bundesamt für Konjunkturfragen
Solare Warmwassererzeugung, Impulsprogramm PACER, 1995
- [2] DIN 4757, Sonnenheizungsanlagen
Teil 1, 1980
- [3] DIN 4807, Ausdehnungsgefäße
Teil 2, 1991
- [4] J.A. Duffie, W.A. Beckmann
Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Edition, Wiley, 1991
- [5] R. Eismann, P. von Felten
Stillstandsverhalten von Solaranlagen, , BFE, ENET, 1998
- [6] R. Eismann, P. von Felten
Messprojekt 52m2 low-flow Solaranlage, Schlussbericht, BFE, ENET, 1998
- [7] H. Hadamovsky, D.Jonas
Solarstrom Solarwärme, 1. Auflage, Vogel Buchverlag, 1996
- [8] N.V. Khartchenko
Thermische Solaranlagen, Springer, 1995
- [9] H. Ladener
Solaranlagen, 5.Auflage, ökobuch Verlag, Staufen, 1996
- [10] Recknagel, Sprenger, Schramek
Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 68. Auflage, Oldenbourg, 1997
- [11] Schweizerischer Verein von Wärme und Klima-Ingenieuren SWKI
Richtlinie 93-1
- [12] SWISSOLAR, SOFAS, PROMAS, BFE, E2000
Empfehlungen zu Nutzung von Sonnenenergie, 1997