

Dimensionierung von Plattenwärmeübertragern in thermischen Solarsystemen

Klaus Vajen, Andreas Ratka, Martin Uecker
Universität Marburg, FB Physik
D-35032 Marburg, Tel.: 06421/284131, Fax: 06421/286535

Ziel

In thermischen Solaranlagen mit Aperturflächen von mehr als rund 20 m² werden häufig Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager (WÜT) zwischen Kollektorkreis und Speicher eingesetzt. Im vorliegenden Beitrag werden die Auswirkungen der Übertragerdimensionierung und des Verhältnisses der Fluid-Kapazitätsströme in Speicher- und Kollektorkreislauf auf die von einem System Flachkollektor+WÜT gelieferte Leistung quantifiziert.

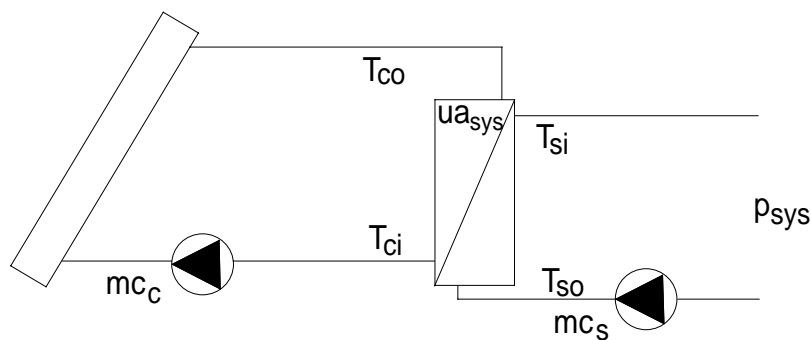


Abb.1: Schaltplanskizze mit einigen der verwendeten Bezeichnungen. Das hier behandelte Solarsystem besteht aus Kollektor und Wärmeübertrager und schließt den Speicher nicht mit ein.

Grundüberlegungen

Die auf die Kollektor-Aperturfläche bezogene Übertragerleistung des Wärmeübertragers ua_{sys} zwischen Kollektor- und Speicherkreis beeinflusst den Arbeitspunkt des Kollektors und damit die vom System Kollektor+WÜT gelieferte Leistung, vgl. Abb.2. Bei konstanter Speicher-Austrittstemperatur T_{so} und konstantem Kapazitätsstrom mc_c im Kollektorkreis gilt: Je geringer die spezifische Übertragerleistung ua_{sys} und der Kapazitätsstrom mc_s im Speicherkreis sind, desto höher wird die Kollektor-Eintrittstemperatur T_{ci} . Mit steigendem T_{ci} sinkt allerdings der

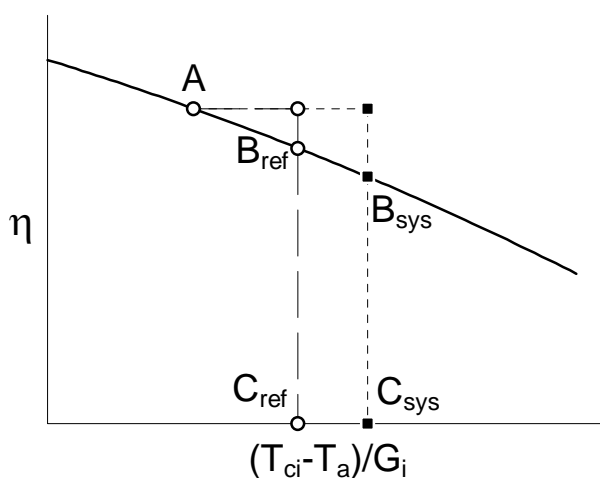


Abb.2: Auswirkungen des Einsatzes verschiedener Wärmeübertrager auf den Arbeitspunkt eines Kollektors. Ohne Einsatz eines WÜT gilt $T_{ci}=T_{so}$, Arbeitspunkt auf der Wirkungsgradkennlinie sei A. Der Referenz-WÜT erhöht die Kollektoreintrittstemperatur T_{ci} , der Wirkungsgrad sinkt auf den Punkt B_{ref} . Ein kleinerer WÜT (oder ein geringerer Massenstrom im Speicherkreis) führt zum Arbeitspunkt B_{sys} . Das Verhältnis der Strecken $B_{sys}C_{sys}/B_{ref}C_{ref}$ ist gleich dem Verhältnis der von den jeweiligen Systemen gelieferten Leistungen p_{sys}/p_{ref} .

Kollektorwirkungsgrad und damit auch die insgesamt dem Speicher pro Aperturfläche zugeführte Leistung p_{sys} . Letztere hängt somit von $u_{\text{a,sys}}$ und dem Verhältnis $m_{\text{c,s}}/m_{\text{c,c}}$ ab.

Als Bezug soll hier ein Referenzsystem definiert werden. Dieses verfüge über einen Wärmeübertrager mit der spezifischen Übertragerleistung von $u_{\text{a,ref}} = 100 \text{ W/Km}^2_{\text{col}}$, das Verhältnis der Kapazitätsströme $m_{\text{c,s}}/m_{\text{c,c}}$ sei gleich 1. Die von diesem System gelieferte aperturflächenbezogene Leistung wird im folgenden mit p_{ref} bezeichnet.

Mit Hilfe des Quotienten $p_{\text{sys}}/p_{\text{ref}}$ können die dem Speicher von verschiedenen Systemen zugeführten Leistungen verglichen werden. Die Quotientenbildung eliminiert weitgehend den Einfluß konstruktiver Details, wie z.B. Länge und Isolierung der Rohrverbindungen.

Modellgleichungen

Den folgenden Überlegungen liegt ein stationäres Modell eines Flachkollektors mit quadratischem Wärmeverlustterm und eines idealen [1x1]-Gegenstromwärmeübertragers zugrunde. Die Fluideigenschaften sind als temperaturunabhängig angenommen. Rohrleitungsverluste werden nicht berücksichtigt, das Modell wäre aber diesbezüglich erweiterbar. Verglichen werden nur die einem Speicher zugeführten Leistungen, unabhängig vom gelieferten Temperaturniveau und der Speichereinschichtung.

Die aperturflächenspezifische Leistung eines Kollektors p_{col} kann ausgedrückt werden durch

$$p_{\text{col}} = F_{\text{R}} \left[\tau \alpha G_{\text{i}} - U_{\text{l},1} (T_{\text{ci}} - T_{\text{a}}) - U_{\text{l},2} (T_{\text{ci}} - T_{\text{a}})^2 \right]$$

Mit $F_{\text{R}} = F'' F'$, $F' \tau \alpha = \eta_0$, $F' U_{\text{l},1} = k_1$, $F' U_{\text{l},2} = k_2$ ergibt sich

$$p_{\text{col}} = F'' \left[\eta_0 G_{\text{i}} - k_1 (T_{\text{ci}} - T_{\text{a}}) - k_2 (T_{\text{ci}} - T_{\text{a}})^2 \right] \quad (1)$$

Diese Formulierung der Kollektorwirkungsgradgleichung hat verschiedene Vorteile: Der Kollektordurchflußfaktor F'' ist für alle Flachkollektoren mit selektiv beschichteten Absorbern bei allen Umgebungsbedingungen (T_{ci} , T_{a} , G_{i}) nahezu gleich und hängt nur noch vom jeweiligen Kapazitätsstrom im Kollektorkreis ab. Wird als Arbeitsfluid eine Mischung aus 40% Propylenglykol und 60% Wasser verwendet, ergeben numerische Berechnungen mit Hilfe eines stationären Kollektormodells:

$$F'' = 0.95 \quad (\text{high - flow, } \dot{V} = 40 \text{ l/m}^2_{\text{col}}\text{h}) \quad F'' = 0.82 \quad (\text{low - flow, } \dot{V} = 10 \text{ l/m}^2_{\text{col}}\text{h}).$$

η_0 und die Wärmeverlustkoeffizienten k_1 und k_2 sind aus Kollektortests nach DIN 4757 bekannt.

Für die durch den Wärmeübertrager vom Kollektor auf den Speicherkreislauf übertragene Leistung $p_{\text{wüt}}$ gilt im Gleichgewicht:

$$p_{\text{wüt}} = p_{\text{col}} = \dot{m} c_{\text{s}} (T_{\text{si}} - T_{\text{so}}) \quad (2)$$

Diese Leistung wird im folgenden als p_{sys} bezeichnet. Für die primäre Austrittstemperatur eines idealen Gegenstromwärmeübertragers, hier T_{ci} , gilt

$$T_{ci} = T_{si}(1-x) + T_{so} x \quad (3)$$

$$\text{mit } x = \frac{\frac{\dot{m}c_s}{\dot{m}c_c} e^{-\alpha} - 1}{e^{-\alpha} - 1} \quad \text{und} \quad \alpha = ua_{wüt} \left(\frac{1}{\dot{m}c_c} - \frac{1}{\dot{m}c_s} \right)$$

Durch Einsetzen von (3) in (1), Auflösen nach T_{si} und Einsetzen in (2) folgt

$$p_{sys} = \frac{\dot{m}c_s}{-2k_2(1-x)} * \left\{ \frac{\dot{m}c_s}{F''(1-x)} + k_1 + 2k_2(T_{so} - T_a) - \sqrt{4k_2 \left[(T_{so} - T_a) \frac{\dot{m}c_s}{F''(1-x)} + \eta_0 G_i \right] + \left(k_1 + \frac{\dot{m}c_s}{F''(1-x)} \right)^2} \right\}$$

Für ein Referenzsystem mit $\dot{m}c_s/\dot{m}c_c = 1$ folgt analog:

$$p_{ref} = \frac{ua_{ref}}{-2k_2} * \left\{ \frac{ua_{ref}}{F''} + k_1 + 2k_2(T_{so} - T_a) - \sqrt{4k_2 \left[(T_{so} - T_a) \frac{ua_{ref}}{F''} + \eta_0 G_i \right] + \left(k_1 + \frac{ua_{ref}}{F''} \right)^2} \right\}$$

Ergebnisse

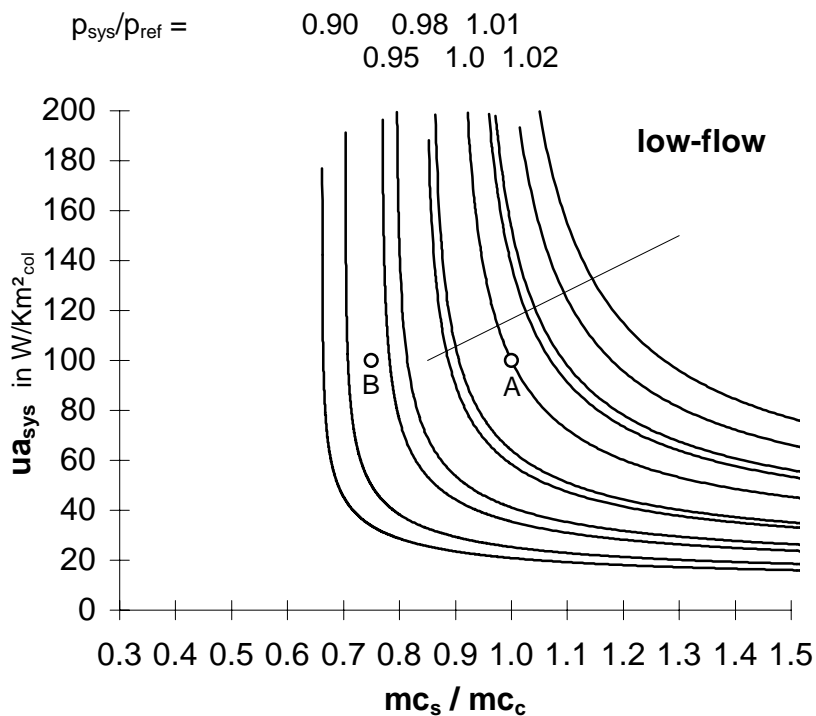
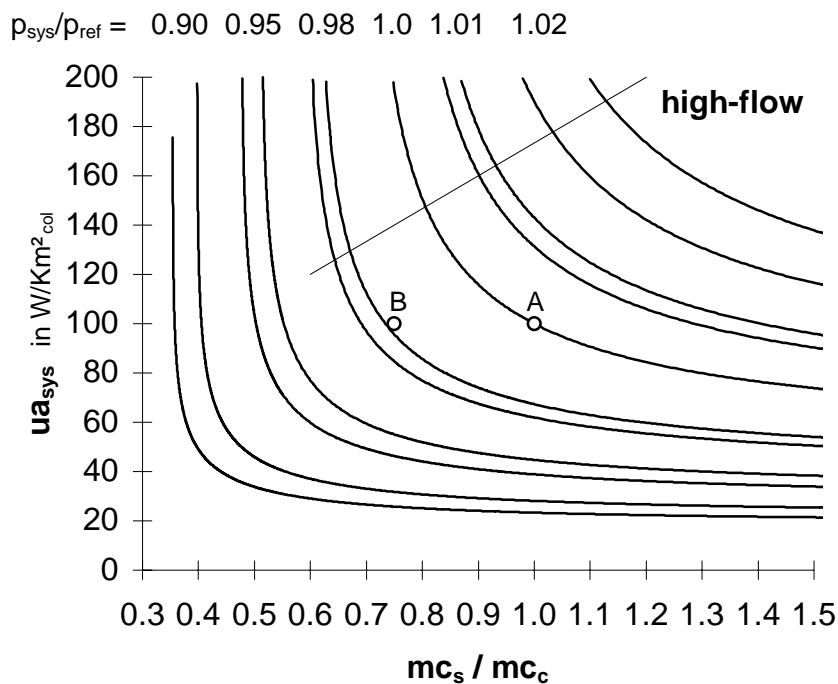
Aus den Modellgleichungen folgt, daß sich die gleiche Systemleistung p_{sys} mit verschiedenen Konfigurationen erreichen läßt: Ein geringeres ua_{sys} läßt sich durch ein höheres $\dot{m}c_s$ ausgleichen und umgekehrt. Bezieht man p_{sys} auf die für gleiche Umgebungsbedingungen gelieferte Leistung des oben definierten Referenzsystems p_{ref} , können in einer Auftragung $ua_{sys} (\dot{m}c_s/\dot{m}c_c)$ Höhenlinien mit jeweils konstantem p_{sys}/p_{ref} dargestellt werden, vgl. Abb.3.

Es zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen high- und low-flow betriebenen Anlagen bezüglich der Auswirkungen der Systemdimensionierung. Bei high-flow betriebenen Anlagen liegen die Bereiche jeweils gleicher Systemleistung in der Darstellung von Abb.3 relativ weit auseinander, bei low-flow Systemen hingegen können bereits geringe Dimensionierungsfehler zu beträchtlichen Ertragseinbußen führen.

Als Beispiel sollen im folgenden, ausgehend von einer Systemauslegung mit $ua_{sys}=100$ W/Km²_{col} und einem Verhältnis $\dot{m}c_s/\dot{m}c_c=1$ (Punkt A in beiden Diagrammen), die Auswirkungen einer Verringerung des Speichermassenstroms um 25% (=> Punkt B) auf die Systemerträge untersucht werden.

Bei einem high-flow System führt die o.g. Maßnahme zu einer Leistungseinbuße von knapp 2%. Dem stehen allerdings andererseits auch Vorteile gegenüber:

- der Wärmeübertrager und die Pumpe im Speicherkreis können kleiner ausgelegt werden
- die Temperaturerhöhung des in den Speicher rückfließenden Wassers, $T_{si}-T_{so}$, steigt um nahezu 25%
- die Speicherschichtung wird durch die geringere Umwälzmenge weniger beeinflusst.



Beim low-flow System hingegen würde beim Übergang von A=>B in Abb.3 eine Verringerung der Systemleistung um rund 7% folgen. Die Ertragseinbuße stünde in keinem sinnvollen Verhältnis mehr zu den o.g. Vorteilen.

Abb.3:
Linien mit konstantem p_{sys}/p_{ref} eines typischen Flachkollektor+WÜT-Systems bei verschiedenen spezifischen Wärmeübertragerleistungen ua_{sys} und Kapazitätsstromverhältnissen mc_s/mc_c . Die Kapazitätsströme im Kollektorkreis, mc_c , sind jeweils konstant und entsprechen typischen high- bzw. low-flow Bedingungen. $p_{sys}/p_{ref}=1$ ergibt sich genau dann, wenn die Kollektoreintrittstemperaturen T_{ci} im betrachteten und im Referenzsystem gleich sind. In diesem Fall haben die Umgebungsbedingungen (T_{so} , T_a , G_i) in beiden Anlagen den gleichen Einfluß auf die Systemleistung und verschwinden bei der Quotientenbildung.

Für $p_{sys}/p_{ref} \neq 1$ erhält man Bereiche, innerhalb derer sich das Leistungsverhältnis abhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen einstellt. Die 'linke' bzw. 'untere' Grenze eines Bereichs ergibt sich für niedrige Einstrahlungen (hier: $G_i=300 \text{ W/m}^2$) und kleine Temperaturdifferenzen (hier: $T_{co}-T_a=1 \text{ K}$). Für die 'rechte' bzw. 'obere' Grenze gilt $G_i=1000 \text{ W/m}^2$ und $T_{co}-T_a=30 \text{ K}$. Eine Verbesserung der solaren Systemleistung kann, ausgehend vom Punkt 'A' im oberen Bild, sowohl durch eine Erhöhung des Massenstroms im Speicherkreis als auch eine Vergrößerung des WÜT erbracht werden. Letztere Maßnahme bliebe bei einer low-flow Anlage (s. unteres Bild) nahezu folgenlos.

Empfehlenswerte Auslegungspunkte liegen in den Kurvenbereichen, wo eine Vergrößerung des Wärmeübertragers keine wesentlichen Leistungsgewinne mehr erwarten läßt. Dies gilt in etwa entlang der dünn eingezeichneten, von 'links unten' nach 'rechts oben' verlaufenden Linien.

Verständlich wird dieses sehr unterschiedliche Verhalten durch eine Betrachtung der jeweiligen Fluid-Temperaturverläufe im Wärmeübertrager, vgl. Abb.4.

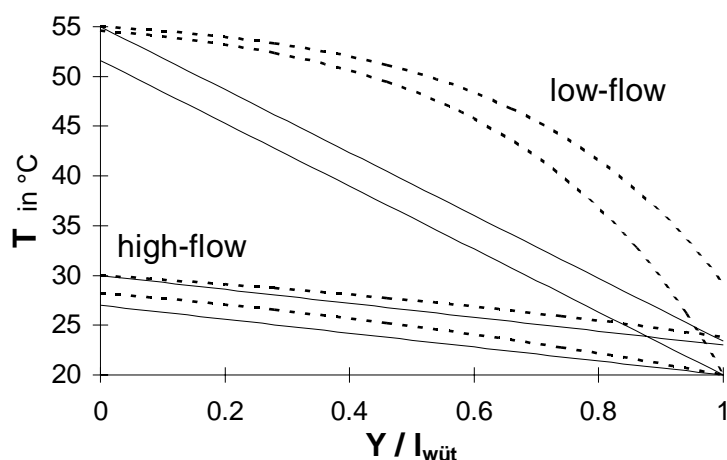


Abb.4: Temperaturverläufe der Fluide des Kollektor- (jeweils obere Kurve) und Speicherkreislaufts im Wärmeübertrager ($ua_{\text{sys}}=100 \text{ W/Km}^2_{\text{col}}$), aufgetragen über dessen normierte Länge, für typische high- und low-flow Bedingungen. Die durchgezogenen Linien gelten für $mc_s/mc_c=1$, die gestrichelten für $mc_s/mc_c=0.75$. $Y/l_{\text{wüt}}=0$ entspricht dem kollektorseitigen Fluideinlauf in den WÜT.

Bei einem high-flow System führt eine Verringerung von mc_s nur zu einem geringfügigen Anstieg der Kollektoreintrittstemperatur T_{ci} (bei $Y/l_{\text{wüt}}=1$: jeweils obere gestrichelte Kurve im Vergleich zur oberen durchgezogenen). Bei einer low-flow Anlage hingegen kann der Wärmeübertrager in einem solchen Fall über weite Strecken 'mangels Temperaturdifferenz' fast keine Leistung mehr übertragen, T_{ci} steigt erheblich und führt zu einem deutlich niedrigeren Kollektor- und damit auch Systemertrag.

Folgerungen

Für solarthermische Systeme läßt sich ein generalisiertes $p_{\text{sys}}/p_{\text{ref}}$ -Höhenliniendiagramm ermitteln, mit dem sich die Auswirkungen der Dimensionierung des Wärmeübertragers und des Kapazitätsstromverhältnisses auf die Systemleistung ermitteln lassen. Das vorgestellte Verfahren, nicht allerdings die Werte in Abb.3, ist auch auf Systeme mit Vakuumröhren übertragbar.

Die Abhängigkeiten der $p_{\text{sys}}/p_{\text{ref}}$ -Kurven von den jeweiligen Umgebungsbedingungen (T_{so} , T_a , G_i) sind innerhalb des Bereichs relevanter Betriebszustände typischer Flachkollektoren klein. Dadurch ist es in vielen Fällen möglich, vom Verhältnis der Systemleistungen direkt auf das Verhältnis der jährlichen Solarerträge zu schließen. In Simulationsrechnungen ist dann eine Variation der WÜT-Dimensionierung und des Kapazitätsstromverhältnisses nicht erforderlich.

Bei auf hohe solare Deckungsraten ausgelegten low-flow Anlagen gilt dies nur eingeschränkt, weil hier zur Beurteilung neben energetischen auch exergetische Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind. In solchen Systemen können das Temperaturniveau des dem Speicher zugeführten Fluids und Verwirbelungen bei der Speichereinschichtung entscheidenden Einfluß haben.

Empfehlenswerte Auslegungspunkte liegen in Abb.3 in den Kurvenbereichen, wo eine Vergrößerung des Wärmeübertragers keine wesentlichen Leistungsgewinne mehr erwarten läßt. Der Pumpstromaufwand im Speicherkreis ist zu beachten und in Relation zum erwarteten thermischen Energiegewinn (bzw. Verlust) zu setzen.

In vielen Fällen läßt sich bei high-flow Anlagen durch die relativ kostengünstige Vergrößerung des Wärmeübertragers die Systemleistung steigern, für low-flow Systeme gilt dies in etwas geringerem Umfang, vgl. Abb.3. Allerdings: Verglichen mit dem Aufwand, der häufig betrieben wird, um bspw. η_0 um einen Prozentpunkt zu steigern, ist ein großzügig dimensionierter Wärmeübertrager meist ebenso wirkungsvoll und darüberhinaus einfacher umzusetzen.

Das vorgestellte Verfahren sollte nicht als alleiniges Kriterium für die Dimensionierung von Wärmeübertragern und Speichermassenströmen herangezogen werden, es liefert aber deutliche Hinweise auf sinnvolle Auslegungen.

Faustformeln

Je niedriger die angestrebte solare Deckungsrate ist, desto größer sollte mc_s/mc_c und dann auch ua_{sys} gewählt werden. Dimensionierungen für Flachkollektorsysteme sollten in etwa entlang folgender Linien in Abb.3: erfolgen

high-flow: $ua_{sys} \approx 120 \text{ W/Km}^2_{col}$ $mc_s/mc_c \approx 0.6$ bis $ua_{sys} \approx 200 \text{ W/Km}^2_{col}$ $mc_s/mc_c \approx 1.2$

low-flow: $ua_{sys} \approx 100 \text{ W/Km}^2_{col}$ $mc_s/mc_c \approx 0.85$ bis $ua_{sys} \approx 150 \text{ W/Km}^2_{col}$ $mc_s/mc_c \approx 1.3$

Demnach sind, nach Kenntnis der Autoren, sehr viele der in Deutschland in thermischen Solar-systemen eingesetzten Wärmeübertrager unterdimensioniert.

Nomenklatur

F''	-	Kollektordurchflußfaktor, $F''=F_R/F'$ Hier: $F''(\text{high-flow}) = 0.95$, $F''(\text{low-flow}) = 0.82$
G_i	W/m^2	Einstrahlung in die Kollektorebene, hier: $G_i=300$ bzw. 1000 W/m^2
k_1 , k_2	$\text{W/m}^2_{col}\text{K}$ $\text{W/m}^2_{col}\text{K}^2$	Wärmeverlustrkoeffizienten nach DIN 4757 (vgl. U_1) hier: $k_1=3.5 \text{ W/m}^2_{col}\text{K}$, $k_2=0.015 \text{ W/m}^2_{col}\text{K}^2$
mc_c	W/Km^2_{col}	Aperturflächenbezogener Kapazitätsstrom im Kollektorkreislauf (40% Propylenglykol, 60% Wasser). Hier: $mc_c = 42.8 \text{ W/Km}^2_{col}$ bei $V_c=40 \text{ l/m}^2_{col}\text{h}$ (high-flow) $mc_c = 10.7 \text{ W/Km}^2_{col}$ bei $V_c=10 \text{ l/m}^2_{col}\text{h}$ (low-flow)
mc_s	W/Km^2_{col}	Aperturflächenbez. Kapazitätsstrom im Speicherkreislauf (Wasser)
p_{sys} , p_{ref}	W/m^2	Aperturflächenbezogene Leistung eines Solarsystems (Kollektor+WÜT) mit definiertem ua_{sys} (bzw. ua_{ref}) und mc_s/mc_c
T_a	$^\circ\text{C}$	Umgebungstemperatur, hier: $T_a=15^\circ\text{C}$
T_{ci} , T_{co}	$^\circ\text{C}$	Ein- bzw. Austrittstemperatur Kollektor
T_{si} , T_{so}	$^\circ\text{C}$	Ein- bzw. Austrittstemperatur Speicher, hier: $16 \leq T_{so}/^\circ\text{C} \leq 45$
$U_{1,1}$ $U_{1,2}$	$\text{W/m}^2_{col}\text{K}$ $\text{W/m}^2_{col}\text{K}^2$	Wärmeverlustrkoeffizienten. $k_1:=F'U_{1,1}$, $k_2:=F'U_{1,2}$
ua_{sys} , ua_{ref}	W/Km^2_{col}	$ua_{sys,ref} := (UA_{wüt})/A_{col}$, Wärmedurchgangskoeffizient mal Übertragerfläche des WÜT durch Aperturfläche. Hier: $ua_{ref}=100 \text{ W/Km}^2_{col}$
η_0	-	Optischer Wirkungsgrad nach DIN 4757, hier: $\eta_0=0.78$

Danksagungen

Dank gilt den Mitgliedern der Forschungsgruppe Solarenergie am FB Physik der Universität Marburg und insbesondere H.Ackermann für ihre vielfältige Unterstützung bei der Ermittlung und Darstellung der vorgelegten Ergebnisse sowie M.Mack (ISFH) und R.Orths (Wagner Solar-technik, Cölbe) für interessante, anregende Diskussionen und Hinweise.