

Solare Warmwasserbereitung

Bestimmung des Wärmeertrags solarer Warmwasserbereitungsanlagen mit dimensionslosen Kennzahlen

Von Martin Zogg und Medard Rieder, Burgdorf

Durch Erkennen der für die Gesamtanlage wesentlichen dimensionslosen Kennzahlen wurde mit Hilfe des in einem früheren Beitrag [1] vorgestellten Computersimulationsprogramms SIWW1 eine Berechnungsmethode für die Bestimmung des mittleren Jahreswärmeertrags von Anlagen zur solaren Warmwasserbereitung gefunden. Sie erlaubt die einfache Ermittlung des Jahreswärmeertrags und weiterer Jahresmittelwerte für einen beliebigen Standort in der Schweiz aufgrund von vier aus über 250 Computersimulationen gefundenen Korrelationen (Gln. 16, 17, 19 u. 21) für alle gängigen Kollektortypen und sinnvollen Kollektororientierungen (Neigungswinkel 0 bis 90°, Südabweichung -90° bis +90°) und die meisten für die Praxis interessanten Kombinationen von Absorberfläche, Warmwasserverbrauchsvolumen, Speichergrösse, thermische Isolation von Speicher und Rohrleitungen, Leitungslänge und fremdbeheiztem Speichervolumenanteil. Innerhalb des Gültigkeitsbereichs der Korrelationen (Bereiche (14), Tabelle 1) kann der mittlere Jahreswärmeertrag auf etwa ± 10% bestimmt werden.

In diesem Beitrag wird die neue Methode mit Betonung des theoretischen Hintergrunds vorgestellt. Für ein ausführlich durchgerechnetes Beispiel sei auf [5] verwiesen.

Massgebende dimensionslose Kennzahlen

Vereinfachtes Anlagemodell

Zum Erkennen der für solare Warmwasseranlagen wesentlichen Kennzahlen ist von einem gegenüber den wirklichen Verhältnissen wesentlich vereinfachten Anlagemodell auszugehen: Bild 1. Es zeichnet sich durch die folgenden Annahmen aus:

Unterhalb der Zusatzheizung mit Fremdenergie ist der Speicherinhalt vollständig durchmischt.

Die Temperaturdifferenz zwischen dem Speichermedium und der mittleren Temperatur im Kollektorkreislauf und im Absorber ist vernachlässigbar ($T_L = T_K$).

Die für die Wärmeverluste massgebenden Umgebungstemperaturen entsprechen für alle Anlagekomponenten der Temperatur des eintretenden Kaltwassers ($T_o = T_H = T_{We}$).

Die Wärmedurchgangskoeffizienten zur Bestimmung der Wärmeverluste des Kollektors, der Wärmeübertragungsleitungen und des Speichers sind nicht temperaturabhängig ($k_K = \text{konstant}$, $k_L = \text{konstant}$, $k_S = \text{konstant}$).

Um Missverständnissen vorzubeugen sei betont, dass diese rigorosen Vereinfachungen nur zur (möglichst gruppenweisen) Erfassung der wesentlichen Einflussgrössen getroffen werden. Mit den damit hergeleiteten dimensionslosen Kennzahlen werden im nächsten Kapitel Ergebnisse an realen Anlagen dargestellt!

Differentialgleichung für die Speichertemperatur

Zur Herleitung der Differentialgleichung für den zeitlichen Verlauf der Speichertemperatur stellen wir mit den erwähnten Vereinfachungen eine Wärmestrombilanz für das Speichermedium auf. Der vom Kollektorkreislauf an das Speichermedium abgegebene Wärmestrom ist das Produkt aus der Gesamtstrahlung auf die Kollektorebene \dot{e} , dem optischen Wirkungsgrad η_o und der Absorberfläche A_K (Einstrahlungsöffnung) abzüglich der Wärmeverluste im Kollektor (K) und in den Leitungen des Kollektorkreislaufs (L):

$$(1) \quad \dot{Q}_L = \dot{e} \eta_o A_K - (k_K A_K - k_L A_L) (T_S - T_{We})$$

Der Wärmeverlust im nichtbeheizten Speicherteil beträgt:

$$(2) \quad \dot{Q}_{Sv} = \beta k_S A_S (T_S - T_{We})$$

Darin ist β der Speichervolumenanteil unterhalb der Zusatzheizung. Das mit dem Massenstrom \dot{M}_W durch den Speicher fließende Wasser entnimmt dem Speichermedium den Wärmestrom:

$$(3) \quad \dot{Q}_{wW} = \dot{M}_W c_{pW} (T_S - T_{We})$$

Aufgrund der dritten Annahme lässt sich mit

$$(4) \quad M c_p = \beta M_S c_{pS} + M_L c_{pL} + M_K c_{pK}$$

die zeitliche Änderung des Wärmeinhalts des ganzen Systems bis zur Speicherzone mit der Zusatzheizung (im Bild 1 schraffiert) erfassen. Die Wärmestrombilanz liefert die folgende Differentialgleichung für die Speichertemperatur:

$$(5) \quad (dT_S/dt) M c_p = \dot{e} \eta_o A_K - (k_K A_K + k_L A_L + \beta k_S A_S + \dot{M}_W c_{pW}) (T_S - T_{We})$$

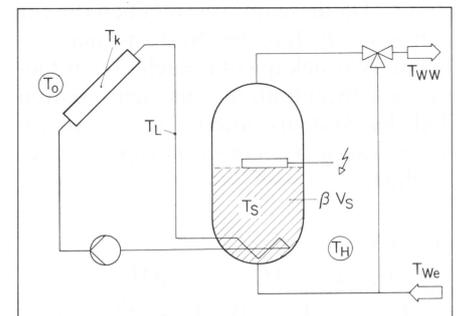
Verdankungen

Für die Finanzierung dieser Arbeit sei dem Nationalen Energieforschungs-Fonds der Schweiz und dem Kanton Bern bestens gedankt. Dem Schweizerischen Bundesamt für Energiewirtschaft danken wir für die Förderung dieses IEA-Projekts. Ein besonderer Dank gilt dem SOFAS-Forschungsausschuss für seine Unterstützung, Herrn J.-M. Suter vom Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung für seine Hinweise und Herrn O. Jacot vom Rechenzentrum der Ingenieurschule für seine guten Dienste.

<i>Pumpe und Steuerung</i>	auf die Absorberfläche bezogene Leistung der Umwälzpumpe = 4 [W/m ²], Pumpenwirkungsgrad = 0,5 [-], Einschalttemperaturdifferenz = 10 [K], Ausschalttemperaturdifferenz = 3 [K],
<i>Wärmeübertrager</i>	Oberfläche in den Rohren turbulente Strömung, = 0,5 · A _K ,
<i>Wärmeträger</i>	Volumenanteil Ethylenglykol = 35 [%], Volumenstrom so, dass sich bei einem Wärmestrom vom Absorber von 300 [W/m ²] eine Temperaturänderung von 5 [K] ergibt,
<i>Speicher</i>	Anzahl thermischer Schichten = 12, Volumen der nachgeheizten Schicht entspricht 120% des pro Tag benötigten Warmwasservolumens, maximale Temperatur = 70 [°C], Ausschalttemperatur Zusatzheizung = 60 [°C],
<i>Brauchwasser</i>	Kaltwassertemperatur = 10 [°C], Warmwassertemperatur = 55 [°C],
<i>Gebäude</i>	für Wärmeverluste massgebende Innentemperatur = 15 [°C].

Tabelle 1. Standardwerte und Dimensionierungsvorschriften für die mit den Kennzahlen A_z , C_s und E_z nicht erfassten Grössen

Bild 1. Anlage zur solaren Warmwasserbereitung mit einem Speicher



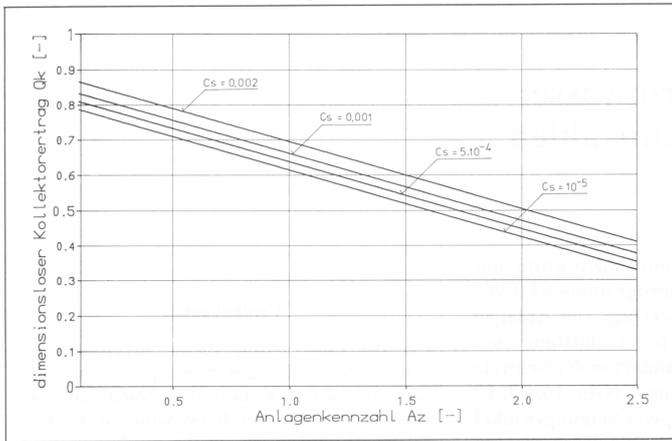


Bild 2. Dimensionsloser Kollektor ertrag nach der Gl. (16)

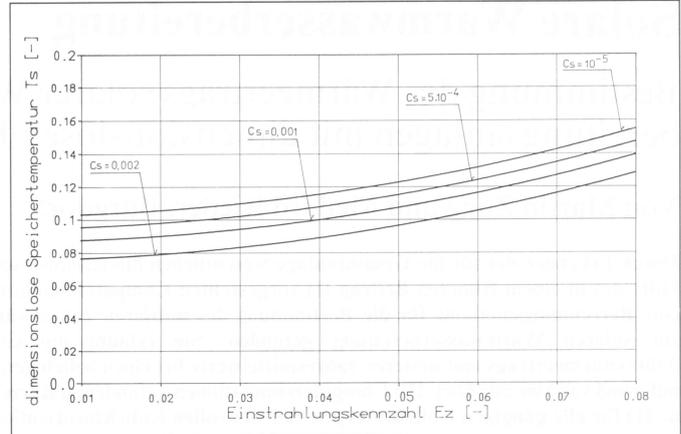


Bild 3. Dimensionslose Speichertemperatur nach der Gl. (17)

Dimensionslose Kennzahlen

Um die für eine solare Warmwasserbereitungsanlage massgebenden dimensionslosen Kennzahlen zu finden, ist die Gl. (5) in eine dimensionslose Form zu bringen. Dazu bilden wir zunächst mit der Zeitkonstanten des Systems

$$(6) t_o = \frac{M c_p}{k_K A_K + k_L A_L + \beta k_S A_S + \dot{M}_W c_{pW}}$$

eine dimensionslose Zeit:

$$(7) \tau = t/t_o$$

Zur Definition einer *dimensionslosen Temperatur* gibt es mehrere Möglichkeiten. Am zweckmässigsten ist das Verhältnis der momentanen Differenz zwischen der Speichertemperatur und der Kaltwassertemperatur zur Kaltwassertemperatur:

$$(8) T_s = \frac{T_s - T_{we}}{T_{we}}$$

Durch Einführen dieser Beziehungen in (5) erhält man für die zeitliche Abhängigkeit der Speichertemperatur einer solaren Warmwasserbereitungsanlage die folgende dimensionslose Differentialgleichung:

$$(9) dT_s/d\tau = \frac{\dot{e} \eta_o A_K t_o}{M c_p T_{we}}$$

Eine erste dimensionslose Kennzahl findet man durch Bezug der Zeitkonstanten nach (6) auf eine charakteristische Zeit t_c . Da diese im wesentlichen die für den solaren Teil des Systems massgebende Wärmekapazität nach (4) zur Gesamtwärmeentnahme aus dem solaren Teil des Systems enthält, sei sie als *dimensionslose Systemwärmekapazität* bezeichnet:

$$(10) C_s = \frac{M_K c_{pK} + M_L c_{pL} + \beta M_S c_{pS}}{(k_K A_K + k_L A_L + \beta k_S A_S + \dot{M}_W c_{pW}) t_c}$$

Weil mit den hier hergeleiteten Kennzahlen Jahreserträge erfasst werden sollen, ist es sinnvoll, als charakteristische Zeit ein Jahr oder rund 360 d (= $3,11 \cdot 10^7$ s) zu verwenden.

Eine zweite dimensionslose Kennzahl lässt sich aus der rechten Seite der Differentialgleichung (9) erkennen. Zunächst ist allerdings offen, was für das zeitlich veränderliche Produkt $\dot{e} \eta_p$ eingesetzt werden soll. Dieses Produkt stellt den im Absorber frei werdenden Wärmestrom dar. Das Integral über die Zeit ist der Wärmeertrag des Absorbers. Er kann für einen bestimmten Ort, eine bestimmte Kollektororientierung und einen bestimmten Kollektor aus Strahlungsdaten auf eine Horizontalebene berechnet werden. Da die Wärmeverluste des Kollektors nach den Modellannahmen 2 und 3 verschwinden, wenn die Absorbtemperatur der Kaltwassertemperatur entspricht, folgt für den auf die Absorberfläche (Einstrahlungsöffnung) bezogenen Jahreswärmeertrag des Kollektors bei Kaltwassertemperatur:

$$(11) q_{Kc} = \int_0^{t_c} \dot{e} \eta_o dt$$

Die Division durch die charakteristische Zeit t_c liefert daraus den mittleren Wärmestrom, welcher vom Kollektor an das Leitungssystem abgegeben wird. Diesen setzen wir anstelle des Momentanwerts $\dot{e} \eta_o$ in die rechte Seite der Gl. (9) ein. Mit der Zeitkonstanten aus der Gl. (6) erhalten wir damit eine zweite dimensionslose Kennzahl, die nach ihrer physikalischen Bedeutung als *Einstrahlungskennzahl* bezeichnet sei:

$$(12) E_z = \frac{q_{Kc} A_K}{(k_K A_K + k_L A_L + \beta k_S A_S + \dot{M}_W c_{pW}) T_{we} t_c}$$

Die Einstrahlungskennzahl E_z ist im wesentlichen das Verhältnis zwischen der am Absorber freiwerdenden Wärme zur Gesamtwärmeentnahme durch alle Wärmeverluste und das entnommene Warmwasser. Die Kennzahlen E_z und C_s sind nicht nur für die in einer Anlage erreichte Speichertemperatur T_s , sondern auch für die Temperatur im Leitungssystem T_L massgebend.

Für die vom Absorber an den Kollektorkreislauf abgegebene Wärme ist anstelle der Einstrahlungskennzahl das Verhältnis der Wärmeverluste am Kollektor zu der ans Leitungssystem übertragenen Wärme ausschlaggebend. Aufgrund der Modellannahmen erhalten wir dafür als dritte Kennzahl die *Anlagenkennzahl*:

$$(13) A_z = \frac{k_K A_K}{k_L A_L + \beta k_S A_S + \dot{M}_W c_{pW}}$$

Zur Erfassung der vom Kollektor an ein (nach den eingangs erwähnten Annahmen vereinfachtes) solares Warmwasserbereitungssystem abgegebenen Jahreswärme und der Wärmeverluste der Leitungen des Kollektorkreislaufs und des Speichers sind die nachstehenden 17 Einflussgrössen von Bedeutung:

$A_K, A_L, A_S, c_{pK}, c_{pL}, c_{pS}, k_K, k_L, k_S, M_K, M_L, M_S, \dot{M}_W, q_{Kc}, t_c, T_{we}$ und β .

Diese 17 Einflussgrössen liessen sich auf drei dimensionslose Kennzahlen, die dimensionslose Speicherkapazität C_s (10), die Einstrahlungskennzahl E_z (12) und die Anlagenkennzahl A_z (13) reduzieren. Wie im nächsten Kapitel aufgrund der Auswertung von über 250 Computersimulationen gezeigt wird, leisten diese dimensionslosen Kennzahlen für die Erfassung der mit realen solaren Warmwasserbereitungsanlagen gewinnbaren Jahresnutzwärme ausgezeichnete Dienste.

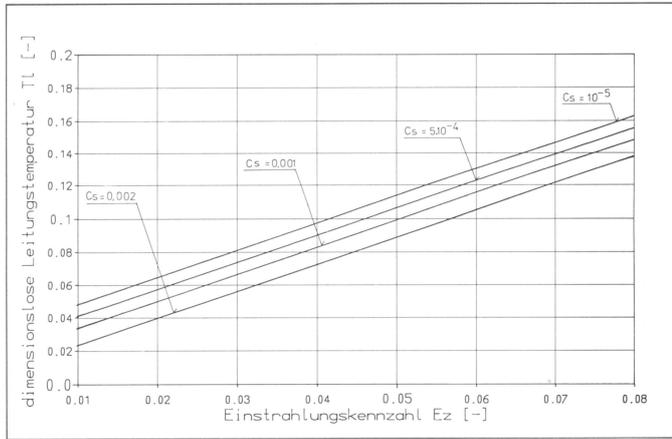


Bild 4. Dimensionslose Kollektorkreislauftemperatur nach der Gl. (19)

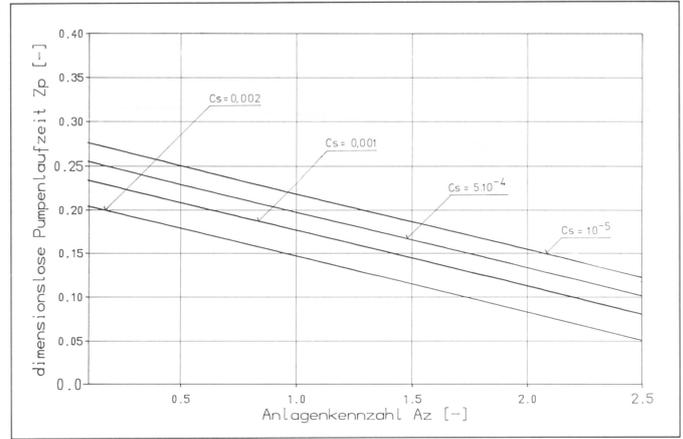


Bild 5. Dimensionslose Pumpenlaufzeit nach der Gl. (21)

Dimensionslose Darstellung von Simulationsergebnissen

Zur Erfassung der wesentlichen Abhängigkeiten diente das in [1] zusammenfassend und in [2] eingehender beschriebene Simulationsprogramm SIWW1. Mit diesem an ausgeführten Anlagen validierten Programm [1, 3] wurden dazu 258 Computersimulationen auf der Basis von Stundenwerten der Meteodaten (globale- und diffuse Strahlung auf Horizontalebene, Umgebungstemperatur) durchgeführt. Dabei wurden Anlagen mit 2,5 m² bis 80 m² Absorberfläche, 0,25 m³/d bis 4 m³/d Tagesverbrauchsvolumen an Warmwasser und 0,3 m³ bis 7,2 m³ Speichervolumen für Zürich-Kloten, Davos und Locarno-Monti simuliert. Die Neigung unterschiedlicher Flachkollektortypen (einfach- und doppelt verglast, selektive und nicht selektive Absorberfläche) wurde von 0° (horizontal) bis 90° (vertikal) und die Orientierung der Kollektoren von -90° (Ost) über 0° (Süd) bis 90° variiert. Einzelheiten zu den durchgeführten Simulationen können einem ausführlichen Bericht [4] entnommen werden.

Weil das Simulationsprogramm SIWW1 mit wesentlich mehr als den 17 in den Kennzahlen erfassten Eingabegrößen arbeitet [1, 2], wurden für die in die Kennzahlen Cs, Ez und Az nicht eingehenden Größen sinnvolle konstante Werte oder Dimensionierungsvereinbarungen festgelegt. Diese sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Auf ihre Bedeutung für den Wärmeertrag werden wir noch zurückkommen. Die Ergebnisse aller Computersimulationen lassen sich innerhalb der untersuchten Bereiche

$$(14) \quad 0,1 \leq A_z = 2,5 \\ 10^{-5} \leq C_s \leq 0,002 \\ 0,01 \leq E_z \leq 0,08 \\ k_L A_L \leq 1,5 k_S A_S$$

mit den folgenden dimensionslosen Korrelationen zusammenfassen:

Wärmeertrag der Kollektoren

Mit einer Division des auf die Absorberfläche (Einstrahlungsöffnung) bezogenen Jahreswärmeertrags der Kollektoren q_K durch den Jahreswärmeertrag q_{K_e} , den sie bei Kaltwassertemperatur T_{w_e} ergeben würden («Bruttowärmeertrag» bei Kaltwassereintrittstemperatur), erhalten wir als *dimensionslosen Kollektorertrag*:

$$(15) \quad Q_k = q_K / q_{K_e}$$

Die Computersimulationen zeigten, dass eine bestimmte Anlage bei gleichen Betriebsbedingungen unabhängig von ihrem Standort stets denselben dimensionslosen Kollektorertrag erbringt. Der Kollektorertrag lässt sich deshalb mit den anlagenspezifischen Kennzahlen Az und Cs ausdrücken (Bild 2):

$$(16) \quad Q_k = 0,805 + 48,1 C_s - 0,1901 A_z$$

Die Genauigkeit dieser Beziehung ist mit einer Standardabweichung von 5% und einer maximalen Abweichung von 13,5% durchaus mit der durch Messungen erzielbaren vergleichbar. Dies ist bemerkenswert, werden doch unterschiedlichste Anlagen mit Kollektorneigungswinkeln von 0 bis 90° und Kollektororientierungen von West bis Ost in drei verschiedenen Klimazonen erfasst!

Mittlere Temperatur im Speicher

Für die Bestimmung des Jahreswärmeverlusts des Speichers benötigen wir den Jahresmittelwert der Speichertemperatur. Die entsprechende *dimensionslose Speichertemperatur* haben wir mit der Gleichung (8) bereits definiert. Die mit den Simulationen errechneten Werte lassen sich im erwähnten Bereich von Ez und Cs durch die folgende Beziehung mit einer Standardabweichung von 3,78% und einer maximalen Abweichung von 12,3% wiedergeben (Bild 3):

$$(17) \quad T_s = 0,1026 - 15,63 C_s + 8,20 E_z^2$$

Wärmeverluste der Verbindungsleitungen und Energieeintrag durch die Pumpe

Zur Bestimmung der Wärmeverluste in den Verbindungsleitungen des Wärmeübertragungssystems und für die Berücksichtigung der durch die Pumpe in die Anlage gebrachten Energie benötigen wir die mittlere Temperatur im Kollektorkreislauf während der Wärmeübertragung an den Speicher und die Pumpzeit. Für diese beiden Grössen lassen sich die Simulationsergebnisse nur noch mit bescheidener Genauigkeit durch einfache Gleichungen wiedergeben. Da sie zusammen nur etwa 10% des Wärmeertrags einer sinnvoll ausgelegten Anlage darstellen, sind hier grössere Standardabweichungen und maximale Fehler durchaus zulässig. Die Genauigkeit der Voraussage des Jahreswärmeertrags kann dadurch lediglich bei Anlagen mit aussergewöhnlich langen Rohrleitungen leiden. In solchen Fällen empfiehlt sich eine Simulationsrechnung nach [7].

Die mittlere Temperatur im Kollektorkreislauf T_L bringen wir durch Bezug der gegenüber dem Kaltwasser erreichten Übertemperatur auf die Kaltwassertemperatur T_{w_e} in eine dimensionslose Form. Wir erhalten dann in Analogie zu Gleichung (8) als *dimensionslose Kollektorkreislauftemperatur*:

$$(18) \quad T_l = (T_L - T_{w_e}) / T_{w_e}$$

Im angegebenen Bereich von Ez und Cs lassen sich die Simulationsergebnisse mit einer Standardabweichung von 8,9% und einer maximalen Abweichung von 21,3% wie folgt annähern (Bild 4):

$$(19) \quad T_l = 0,032 - 14,81 C_s + 1,637 E_z$$

Die *dimensionslose Pumpenlaufzeit* können wir durch Bezug der Pumpzeit t_p auf die charakteristische Zeit t_c definieren:

$$(20) \quad Z_p = t_p / t_c$$

Da die Pumpenlaufzeit durch Vorgänge im Ein- und Ausschaltbereich mit gerin-

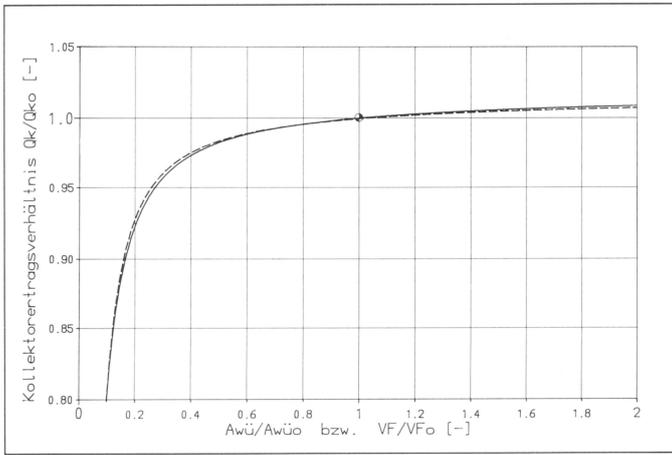


Bild 6. Einfluss der Oberfläche des Wärmeübertragers $A_{wü}$ (gestrichelt) und des Wärmeträgervolumenstroms V_F (ausgezogen) auf den dimensionslosen Kollektorsertrag Q_k . Bezugsgrößen: Tabelle 1.

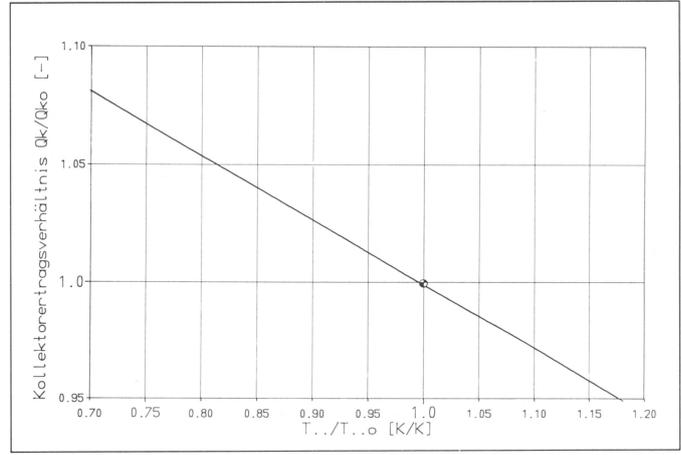


Bild 7. Einfluss der geforderten Warmwassertemperatur T_{Ww} auf den dimensionslosen Kollektorsertrag bei einer Ausschalttemperatur der Zusatzheizung von $T_{ZH} = T_{Ww} + 5$ K.

gem Wärmeertrag wesentlich mitgeprägt wird, streuen die Simulationsergebnisse für die dimensionslosen Pumpenlaufzeiten stark. Sie lassen sich deshalb nur grob annähern (Bild 5):

$$(21) Z_p = 0,283 - 42,2 C_s - 0,064 A_z$$

Im untersuchten Bereich von A_z und C_s beträgt hier die Standardabweichung 20,8% und der maximale Fehler 52,7%. Wie bereits erwähnt, fallen die grösseren Ungenauigkeiten in den Beziehungen (19) und (21) für den Jahreswärmeertrag von Solaranlagen kaum ins Gewicht, da die Summe der Wärmeverluste durch die

Tabelle 2: Mit der vorgestellten Berechnungsmethode bestimmbare Jahresmittelwerte. Die Genauigkeitsangaben beziehen sich auf die Ergebnisse der über 250 Computersimulationen. (* Für einen Anteil der Rohrleitungs-Wärmeverluste am Jahreswärmeertrag der Kollektoren von 5%).

Grösse	Sym- bol	mittlere Standard- abweichung	maximaler relativer Fehler
aus dimensionslosen Kennzahlen: Wärmeertrag der Kollektoren	Q_K	5,0%	$\pm 13,5\%$
Wärmeverluste der Rohr- leitungen	Q_{LV}		
Auskühlver- luste der Rohr- leitungen	Q_{LN}		
Pumpenenergie an Wärme- träger	Q_P		
Wärmeverluste des Speichers	Q_{SV}	3,8%	$\pm 12,3\%$
daraus über Wärmebilanzen: an den Speicher abgegebene Wärme	Q_S	ca. 7,5%*	ca. $\pm 18\%$ *
Fremdenergie- bedarf für Zusatzheizung	Q_{ZH}		

Rohrleitungen (bei üblichen Leitungslängen und guter Wärmeisolation) und der Pumpenergie gegenüber dem solaren Ertrag klein sind.

Vorgehen zur Ermittlung des Wärmeertrags

Eine zweckmässig dimensionierte Anlage zur solaren Warmwasserbereitung ergibt im allgemeinen Kennzahlen innerhalb der Bereiche (14). Falls die in der Tabelle 1 aufgeführten Daten hinreichend erfüllt sind, können mit den oben wiedergegebenen dimensionslosen Beziehungen die in der Tabelle 2 angegebenen Jahreswerte mit für die Praxis genügender Genauigkeit bestimmt werden. Dazu sind der Reihe nach zu berechnen (ausführlich durchgerechnetes Beispiel in [4 u. 5], PC-Programm in [7]:

1. Wärmekapazitäten des Absorbers $M_K c_{pK}$, des Leitungssystems $M_L c_{pL} = M_F c_{pF} + M_R c_{pR}$ und des Speicherinhalts $M_S c_{pS}$.
2. Unbeheizter Speichervolumenanteil β .
3. Wärmeverlustbeiwerte des Kollektors $K_K A_K$, der Verbindungsleitungen $K_L A_L$ und des Speichers $k_S A_S$.
4. Wärmeentnahmebeiwert durch Warmwasserverbrauch $\dot{M}_w c_{pw}$.
5. Bruttowärmeertrag der verwendeten Kollektoren bei der mittleren Kaltwassereintrittstemperatur q_{ke} für den jeweiligen Standort der Anlage und die einbaubedingte Neigung und Orientierung der Kollektoren (nach [6] oder [7] für einen beliebigen Standort in der Schweiz).
6. Dimensionslose Systemwärmekapazität C_s aus (10), Einstrahlungskennzahl aus (12) und Anlagekennzahl aus (13).
7. Dimensionsloser Kollektorsertrag Q_k aus (16), dimensionslose Speichertempe-

ratur T_s aus (17), dimensionslose Leitungstemperatur T_l aus (19) und dimensionslose Pumpenlaufzeit Z_p aus (21).

8. Kollektorsertrag (von den Kollektoren an den Wärmeträger abgegebene Wärme) Q_K mit (15) aus:

$$(21) Q_K = Q_k q_{ke} A_K$$

9. Wärmeverluste in den Verbindungsleitungen: mittlere Temperatur in den Leitungen T_L aus (18), Pumpenlaufzeit t_p aus (20), Wärmeverluste der Rohrleitungen Q_{LV} aus:

$$(22) Q_{LV} = t_p k_L A_L (T_L - T_H)$$

10. Nächtlicher Auskühlverlust der Verbindungsleitungen:

$$(23) Q_{LN} = 360 M_L c_{pL} (T_L - T_H)$$

11. Wärmeeintrag durch Umwälzpumpe aus:

$$(24) Q_p = t_p \eta_p P$$

12. Vom Kollektorkreislauf an den Speicher abgegebene Wärme Q_S aus:

$$(25) Q_S = Q_K + Q_p - Q_{LV} - Q_{LN}$$

13. Wärmeverlust des Speichers: mittlere Speichertemperatur T_S aus (8), Jahreswärmeverlust des Speichers Q_{SV} aus:

$$(26) Q_{SV} = t k_S A_S (T_S - T_H)$$

14. Durch das Warmwasser entnommene Jahreswärme Q_{Ww} aus:

$$(27) Q_{Ww} = 360 V_{Ww} \rho_w c_{pw} (T_{Ww} - T_{W0})$$

15. Für die Zusatzheizung benötigte Fremdenergie Q_{ZH} aus einer Wärmebilanz:

$$(28) Q_{ZH} = Q_{Ww} + Q_{SV} - Q_S$$

Grenzen der neuen Berechnungsmethode

Der im letzten Abschnitt vorgeschlagene Weg zur Bestimmung des Jahresertrags solarer Warmwasserbereitungsanlagen mit dimensionslosen Kennzahlen beruht auf den Näherungen (16), (17), (19) und (21) für die dimensionslosen Jahresergebnisse. Diese Beziehungen gelten nur innerhalb der Bereiche (14) für die massgebenden Kennzahlen und für zusätzliche Anlagendaten nach der Tabelle 1. Die Wirkung von Abweichungen der zusätzlichen Anlagendaten wird in [4 u. 5] ausführlich erörtert. An dieser Stelle seien daraus der Einfluss des Wärmeträgervolumenstroms sowie der Oberfläche des Wärmeübertragers und der geforderten Warmwassertemperatur herausgegriffen. Die in den Bildern 6 und 7 gezeigten Abhängigkeiten wurden durch Computersimulationen mit konstantem Wärmebezug Q_{Ww} an einer Anlage mit einfach verglasten Kollektoren, einer Absorberfläche von 20 m^2 , einem Speichervolumen von $2,4 \text{ m}^3$ und einem täglichen Warmwasserbedarf von 1 m^3 bei 55°C gewonnen (restliche Daten: [4], Abschnitt 5.1). Auf der Abszisse sind Verhältnisse der jeweiligen Werte zu den Standardwerten gemäss der Tabelle 1 aufgetragen. Auf der Ordinate erkennt man den Einfluss der variierten Grössen auf den Wärmeertrag der Kollektoren. Das Bild 6 verdeutlicht, dass die Oberfläche des Wärmeübertragers wie auch der Wärmeträgervolumenstrom gegenüber den Standardwerten nach der Tabelle 1 ohne wesentliche Ertragseinbussen reduziert werden könnten. Hier ist allerdings grösste Vorsicht geboten, da an den Wärmeübertragerflächen im allgemeinen eine in den Rechnungen nicht berücksichtigte Belagsbildung stattfindet. Der grösste Einfluss durch Abweichungen von den Standardwerten der Tabelle 1 ergibt sich für die geforderte Warmwassertemperatur T_{Ww} : Bild 7. Durch gewisse Komforteinbussen liesse sich hier noch etwas solare Energie gewinnen.

Sinnvoll bemessene Anlagen ergeben kaum Kennzahlen ausserhalb der Bereiche (15). Da sich kleinere Abweichungen von den Standardwerten der Tabelle 1 nur geringfügig auswirken, vermag die in diesem Bericht mitgeteilte neue Berechnungsmethode die meisten praktischen Anwendungen mit genügender Genauigkeit abzudecken (Vergleich mit Messergebnissen an einer ausgeführten Anlage in [4].

Bei erheblichen Abweichungen von den Werten der Tabelle 1 und ausserhalb der Bereiche (15) ist allerdings eine Computersimulation unumgänglich. Dafür wurde ein allgemein zugängliches Programmpaket zur Verwendung auf Personal Computern mit MS-DOS-Betriebssystem entwickelt. Dieses bietet bei der Projektierung solarer Warmwasserbereitungsanlagen auch bei der Beschränkung auf die hier vorgestellte Kennzahlmethode eine gute Auslegungshilfe.

Adresse der Verfasser: Martin Zogg, Dr. sc. techn. ETH, Dozent für Verfahrenstechnik und Medard Rieder, Masch.-Ing. HTL, Ingenieurschule Burgdorf, Abteilung Maschinentechnik, CH-3400 Burgdorf.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Zogg, M., Rieder, M., Hungerbühler, R.: Validiertes Computersimulationsprogramm für die solare Warmwasserbereitung, Schweizer Ingenieur und Architekt, 103(1985)49, 1221/1225.
- [2] Zogg, M., Hungerbühler, R.: Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie Computersimulation für Anlagen mit einem Speicher, Bundesamt für Energiewirtschaft, Ingenieurschule Burgdorf, Bern/Burgdorf 1984.
- [3] Rieder, M., Zogg, M.: Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie – Validierung der Computersimulationsprogramme SIWW1 und SIWW2, Bundesamt für Energiewirtschaft, Ingenieurschule Burgdorf, Bern/Burgdorf 1985.
- [4] Zogg, M., Rieder, M.: Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie: Kennzahl-Methode zur Berechnung des Wärmeertrags solarer Warmwasserbereitungsanlagen, Bundesamt für Energiewirtschaft, Ingenieurschule Burgdorf, Bern/Burgdorf 1986.
- [5] Zogg, M., Rieder, M.: Wärmeertrag solarer Warmwasserbereitungsanlagen, Teil 1: Kennzahlmethode, Technische Rundschau 78(1986), erscheint im Mai.
- [6] Bremer, P., Heimlicher, M.: Meteororm, Daten für den Solarplaner, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1985.
- [7] Zogg, M., Zahnd, Ch., Rieder, M.: Wärmeertrag solarer Warmwasserbereitungsanlagen, Teil 2: PC-Programmpaket zur Auslegung und Simulation, Technische Rundschau, 78(1986), in Vorbereitung.

SYMBOLVERZEICHNIS

A	Fläche, Oberfläche	$[\text{m}^2]$
c_p	spezifische Wärmekapazität	$[\text{J}/\text{kgK}]$
d	Durchmesser	$[\text{m}]$
\dot{e}	Strahlung	$[\text{W}/\text{m}^2]$
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
M	Masse	$[\text{kg}]$
\dot{M}	Massenstrom	$[\text{kg}/\text{s}]$
n	Anzahl Speicherschichten	$[-]$
P	elektrische Leistung der Umwälzpumpe	$[\text{W}]$
q	Wärmedichte (Q/A)	$[\text{J}/\text{m}^2]$
Q	Wärme	$[\text{J}]$
\dot{Q}	Wärmestrom	$[\text{W}]$
t	Zeit	$[\text{s}]$
t_c	charakteristische Zeit (Jahr)	$3,11 \cdot 10^7 [\text{s}]$
t_o	Zeitkonstante	$[\text{s}]$
T	Temperatur (in den Kennzahlen stets in $[K]!$)	$[\text{K}], [^\circ\text{C}]$
V	Volumen, Tagesverbrauchsvolumen	$[\text{m}^3]$
\dot{V}	Volumenstrom	$[\text{m}^3/\text{s}]$
β	Verhältnis beheiztes zu gesamtem Volumen	$[-]$
η_o	optischer Wirkungsgrad	$[-]$
η_p	Pumpenwirkungsgrad	$[-]$
ρ	Dichte	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
τ	dimensionslose Zeit, Gl. (7)	$[-]$
Dimensionslose Kennzahlen		
A_z	Anlagenkennzahl, Gl. (13)	$[-]$
C_s	dimensionslose Systemwärmekapazität Gl. (10)	$[-]$
E_z	Einstrahlungskennzahl Gl. (12)	$[-]$
Q_k	dimensionsloser Kollektorsertrag Gl. (15)	$[-]$
T_l	dimensionslose Kollektorkreislauftemp. Gl. (18)	$[-]$
T_s	dimensionslose Speichertemperatur Gl. (8)	$[-]$
Z_p	dimensionslose Pumpenlaufzeit Gl. (20)	$[-]$
Indices		
a	aussen	
e	Eintritt	
F	Wärmeträger	
H	Haus, im Gebäudeinnern	
i	innen	
I	Isolation	
K	Kollektor	
L	Leitung, Leitungssystem, Kollektorkreislauf	
N	Abkühlung nach Betrieb (Nacht)	
o	Umgebung	
P	Pumpe	
R	Rohre der Verbindungsleitung	
S	Speicher	
V	Verlust	
w	warm	
W	Wasser	
W_e	Kaltwasser	
W_w	Warmwasser	
ZH	Zusatzheizung	