

Ertragsoptimierung thermischer Solaranlagen durch modulierte Schalttemperaturdifferenz

Gewichtung von Leitungs- und Kollektortemperatur in einer Wärmebilanz

Volker Böhringer, Mühlacker

Volker Böhringer studierte an der Universität Stuttgart Elektrotechnik mit Schwerpunkt „Technische Elektronik“. Er arbeitete im Bereich Prozeß- und Automatisierungstechnik der Fraunhofer Gesellschaft Stuttgart. Nach praktischen Erfahrungen in einem mittelständischen Unternehmen ist er seit 1989 im Bereich Automatisierungstechnik freiberuflich tätig, seit 1993 geschäftsführender Gesellschafter der esaa GmbH, Automatisierungstechnik in Mühlacker.

Auszugsweiser Nachdruck aus:
HLH Bd. 48 (1997),
Nr. 1 – Januar,
Seite 24 – 30

Energieeinsparung hat sowohl eine wirtschaftliche als auch eine gesellschaftspolitische Bedeutung. Das Interesse des Verbrauchers an wirtschaftlicher und ressourcenschonender Energieerzeugung steigt, der Markt hat diese Entwicklung durch innovative Produkte zu unterstützen. Bei thermischen Solaranlagen kann durch eine intelligente Regelung bei praktisch gleichem Investitionsvolumen der Energieertrag der gesamten Anlage optimiert werden.

Die Anwendung von Solarkollektoren als zusätzliche Wärmequelle erfordert in mitteleuropäischen Breiten aufgrund ungünstiger Einstrahlungsbedingungen optimierte technische Systeme. In den neuentwickelten Solaranlagenregler SONJA[®] der esaa GmbH ist ein neuartiger Regelalgorithmus implementiert, der im Vergleich zu konventionellen Ansätzen über eine Wärmebilanz alle energietragenden Volumina einer thermischen Solaranlage berücksichtigt. Mit geringstem zusätzlichem Aufwand ist es möglich, jede beliebige Anlage bezüglich ihres Energieertrags auf einfachste Weise zu optimieren.

Die Regelung der Pumpe im Solarkreislauf thermischer Solaranlagen erfolgt konventionell mit einem 2-Punkt-Differenztemperaturregler, der die Pumpe einschaltet, wenn die mittlere Kollektortemperatur T_{Koll} um einen fest einzustellenden Wert über der Ausgangstemperatur des Wärmetauschers im Speicher $T_{WT,aus}$ liegt. Sinkt die Temperatur T_{Koll} unter einen zweiten, fest einzustellenden Wert ab (Hysterese), schaltet die Pumpe aus.

Diese Regelungen haben den Nachteil, daß in der morgendlichen Anfangsphase oder nach unterbrochener oder geringer Einstrahlung ein dem Volumen des Kollektors entsprechendes kaltes Wärmeträgervolumen aus der Speicherzuleitung in den Speicher geführt wird, so daß es dort zunächst zu einem Absinken der Speichertemperatur kommt. Weil der 2-Punkt-Differenztemperaturregler unmittelbar nach dem Absinken der Kollektortemperatur T_{Koll} die

Pumpe abschaltet kommt die im Kollektor im Wärmeträger gesammelte Wärmeenergie im ersten Abschnitt der Kollektor-Speicher-Leitung zu liegen. Bei nur geringer Einstrahlung oder durch wechselnde Bewölkung erreicht dieses Volumen bis zum nächsten Pumpvorgang nahezu wieder Umgebungstemperatur.

Der Wärmeaustrag aus dem Speicher für $T_{Umg} < T_{WT,aus}$ ist hierbei für jedes Pumpintervall:

$$\Delta Q \sim V_{Koll} \cdot (T_{WT,aus} - T_{Umg}) \quad (1)$$

Diese Randbedingungen liegen insbesondere zu Beginn des Tages sowie am Ende eines Tages aufgrund relativ hoher Speichertemperaturen vor.

Es gibt mehrere konventionelle Versuche, diese Verluste zu vermindern:

1. Bypass-Schaltungen im Solarkreislauf
2. Low-Flow-Systeme mit drehzahlgeregelten Pumpen
3. Regelungen mit statistischen Optimierungsansätzen.

Verbesserungen des Kollektorstufigen Wirkungsgrades durch Bypass-Schaltungen im Solarkreislauf erfordern einen hohen, zusätzlichen Investitionsaufwand. Sie haben ferner den Nachteil, daß auch dann mit hohen Leitungstemperaturen gefahren wird, wenn aufgrund geringer Einstrahlung kein Energiegewinn für den Speicher zu erwarten ist.

Low-Flow-Systeme mit drehzahlgeregelten Pumpen versuchen durch reduzierte Volumenströme im Solarkreislauf und dabei geringerer Leistungsaufnahme der Pumpe einen Teil dieser Verluste abzufangen.

Regelungen mit statistischen Optimierungsansätzen wie beispielsweise selbstlernenden Heizungsanlagen müssen schon deshalb versagen, weil aufgrund nicht vorhersehbarer Einflüsse wie Intensität der Einstrahlung, Wind, Regen etc. nicht im Sinne von Fuzzy-Logik optimiert werden kann.

Die „Nullbilanz-Bedingung“

Der Lösungsansatz der „esaa-Regelung“ basiert darauf, die thermische Solaranlage als integrales System zu betrachten und in seiner Gesamtheit auf maxi-

malen Wärmeertrag für den Speicher zu optimieren. Diese Optimierung geschieht durch Berücksichtigung aller bilanzrelevanten Komponenten der Anlage, das sind in erster Linie das Füllvolumen des Kollektors und das Volumen der Speicherzuleitung, einschließlich ihrer momentanen Temperaturen, d. h. letztendlich ihrer Energieinhalte. Die Wärmebilanz wird auf den Speicher, genauer auf den Ausgang des Wärmetauschers im Speicher bezogen. Diese Bedingung ist das wesentliche Einschaltkriterium für die Umwälzpumpe.

Für die Bilanz müssen dann einfach die Temperaturdifferenzen zwischen Wärmetauscher-Ausgang (WT,aus) und Kollektor (Koll) einerseits und zwischen Wärmetauscher-Ausgang und Speicherzuleitung (Ltg) andererseits, entsprechend den Volumina von Kollektor und Speicherzuleitung gewichtet, gegeneinandergestellt werden:

$$V_{Koll} \cdot (T_{Koll} - T_{WT,aus}) = V_{Ltg} \cdot (T_{WT,aus} - T_{Ltg}) \quad (2)$$

Daraus folgt die sogenannte „Nullbilanz-Bedingung“:

$$V_{Koll} \cdot (T_{Koll} - T_{WT,aus}) + V_{Ltg} \cdot (T_{Ltg} - T_{WT,aus}) = 0 \quad (3)$$

Wenn diese Bedingung erfüllt ist, ist die Wärmebilanz für den Speicher bei einem dann folgenden Pumpvorgang gerade ausgeglichen.

Um einen positiven Energieeintrag in den Speicher zu erreichen, muß die linke Seite der Bilanzgleichung größer sein als Null, d. h. die Bilanzgleichung muß um einen „Schwellenwert“ ΔT_1 wie folgt erweitert werden:

$$V_{Koll} \cdot (T_{Koll} - T_{WT,aus}) + V_{Ltg} \cdot (T_{Ltg} - T_{WT,aus}) - \Delta T_1 = 0 \quad (4)$$

Dieser Schwellenwert $V_{Koll} \cdot \Delta T_1$ bestimmt im wesentlichen die je Pumpvorgang in den Speicher eingebrachte Wärmemenge. Die „Nullbilanz-Temperatur“ des Kollektors ist dann

$$T_{Koll, Bilanz=0} = (V_{Ltg}/V_{Koll}) \cdot (T_{WT,aus} - T_{Ltg}) + T_{WT,aus} \quad (5)$$

und die Schaltbedingung lautet entsprechend:

$$T_{Koll} \geq (V_{Ltg}/V_{Koll}) \cdot (T_{WT,aus} - T_{Ltg}) + T_{WT,aus} + \Delta T_1 \quad (6)$$

Die Einschalttemperatur T_{Koll} ist damit eine Funktion der Bedingungen in der Anlage, und im Unterschied zur konventionellen Regelung nach dem 2-Punkt-Prinzip variiert die Einschalttemperaturdifferenz $T_{Koll} - T_{WT,aus}$. Aus der Einschaltbedingung folgt bei „kalter“ Leitung eine hohe Einschalttemperaturdifferenz, bei „warmer“ Leitung führt die esaa-Regelung die Einschalttemperaturdifferenz zurück und führt den Kollektor im Bereich seines maximalen Wirkungsgrads. Bei einem idealen Kollektor mit horizontaler Wirkungsgradkennlinie, d. h. unveränderlichem Wirkungsgrad wäre diese Bedingung ausreichend, reale Kollektoren haben jedoch eine mit steigender Temperaturdifferenz $T_{Koll} - T_{Umg}$ abfallende Wirkungsgradkennlinie, so daß flankierende Zusatzbedingungen erforderlich sind. Die Modulationsbreite der Einschalttemperaturdifferenz muß in Abhängigkeit vom Kollektortyp nach oben begrenzt werden. Bei der neuentwickelten Regelung ist dieses Konzept auf zweierlei Weise in eine Regelungsstrategie umgesetzt worden:

1. „Statische“ esaa-Regelung
2. „Dynamische“ esaa-Regelung.

Das Prinzip wird anhand der Bilder 1 bis 4 erläutert. Zur Vereinfachung ist der Sonderfall gleichen Leitungs- und Kollektortypen dargestellt.

Die Anfangsbedingungen entsprechen näherungsweise den Bedingungen nach Ablauf eines Pumpvorgangs. Die durchgezogene, entsprechend einer Funktion $y = 1 - \exp(-x)$ aufsteigende Kurve stellt den Verlauf der Temperatur T_{Koll} des Kollektors über der Zeit in erster Näherung dar. Die absteigende Kurve gibt den Verlauf der Leitungstemperatur T_{Ltg} bei kalter Umgebung wieder. Die horizontale Linie zeigt die als konstant angenommene Temperatur des Wärmetauscherausgangs $T_{WT,aus}$. Sie dient als Bezugstemperatur. Die Kurven der Null- bzw. Einschaltbedingung:

$$T_{Koll,Bilanz=0} = (V_{Ltg}/V_{Koll}) \cdot (T_{WT,aus} - T_{Ltg}) + T_{WT,aus} \quad (5)$$

und

$$T_{Koll,einsch} \geq T_{Koll,Bilanz=0} + \Delta T_1 \quad (7)$$

$$T_{Koll,einsch} \geq (V_{Ltg}/V_{Koll}) \cdot (T_{WT,aus} - T_{Ltg}) + T_{WT,aus} + \Delta T_1 \quad (8)$$

sind gestrichelt dargestellt.

Mit der Zeit steigt die Kollektortemperatur T_{Koll} entsprechend der Exponentialfunktion an. Beim Punkt P (Zeit t_P) hat die Temperatur des Kollektors die Einschalttemperatur des 2-Punkt-Differenztemperaturreglers erreicht. Zu diesem Zeitpunkt ist jedoch bei, wie im Beispiel, kalter Leitung die Energiebilanz noch nicht erfüllt, so daß sich die oben beschriebenen effektiven Wärmeverluste für den Speicher ergeben.

Die esaa-Regelung verzögert diesen Einschaltzeitpunkt so lange, bis die Nullbilanz-Bedingung (Punkt A) zuzüglich des gewünschten Energieeintrags (Punkt B) erfüllt ist. Dadurch wird sichergestellt, daß kein Wärmeverlust für den Speicher entsteht. Den Bilanzgewinn aus diesem einen Aufheiz-Pump-Zyklus verkörpert also die Strecke B-B', er entspricht unmittelbar dem Schwellenwert ΔT_1 .

Hat die Leitung nach einer gewissen Betriebsdauer eine höhere Temperatur erreicht, vermindert sich die Einschalttemperaturdifferenz beim Regler. Die Temperaturdifferenz $T_{Koll} - T_{WT,aus}$ kann dann, aufgrund der besseren Regelalgorithmen, auch unterhalb der fest eingestellten Einschalttemperatur des 2-Punkt-Reglers liegen, wodurch der Kollektor näher an seinem maximalen Wirkungsgrad gefahren wird und sich die Kollektorleistung verbessert.

Wird die Einstrahlung vor Erreichen des Schaltpunktes B durch Bewölkung stark vermindert oder unterbrochen, wird nicht gepumpt. Der Wärmehalt des Speichers bleibt erhalten. Pumpenergie wird nicht verbraucht. Wird der Punkt B erreicht, dann wird die gesamte im Kollektor enthaltene Wärmeenergie auf einmal in den Speicher geführt. Das sichert die spezielle Ausschaltbedingung:

$$T_{WT,ein} - 1^\circ C \leq T_{WT,aus} \quad (9)$$

die nach Abwarten einer dem Totvolumen der Leitung entsprechenden Totzeit greift. Diese Totzeit wird bei Inbetriebnahme durch die esaa-Regelung selbst ermittelt.

Durch Aktivieren einer „Set“-Funktion mit einer Taste werden die Regelalgorithmen ausgeblendet. Überschreitet die Temperaturdifferenz $T_{Koll} - T_{WT,ein}$ den eingestellten Sollwert (z. B. 50 °C) schaltet die Pumpe ein. Erreicht nun die Flanke des im Kollektor erwärmten Wärmeträgers den Wärmetauschereingang im Speicher, steigt die Temperatur $T_{WT,ein}$ an. Erreicht diese Temperatur einen bestimmten Wert, wird die bis zu diesem Zeitpunkt verstrichene Pumpenlaufzeit gespeichert. Die Totzeit ergibt sich durch Addition eines festen Wertes. Diese Totzeit wird gespeichert. Die „Set“-Funktion wird zurückgesetzt und die allgemeinen Regelalgorithmen werden aktiviert.

Flankierende Einschaltbedingungen

Die Wirkungsgradkennlinie realer Kollektoren fällt mit zunehmender Temperaturüberhöhung gegenüber der Umgebung, vor allem bei mäßiger Einstrahlung, stark ab. Bei herkömmlichen Flachkollektoren ist dieses Verhalten stark ausgeprägt, bei selektiv beschichteten und vor allem bei Vakuumröhrenkollektoren können höhere Temperaturdifferenzen gefahren werden. Dem Abfall der Wirkungsgradkennlinien wird mit Grenzwerten für die Kollektortemperatur als solche und mit Grenzwerten für die Temperaturüberhöhung gegenüber der Umgebung oder dem Speicher Rechnung getragen. Der Komplex dieser flankierenden Einschaltbedingungen wird mit ODER logisch an die wärmebilanzbasierte Einschaltbedingung geknüpft.

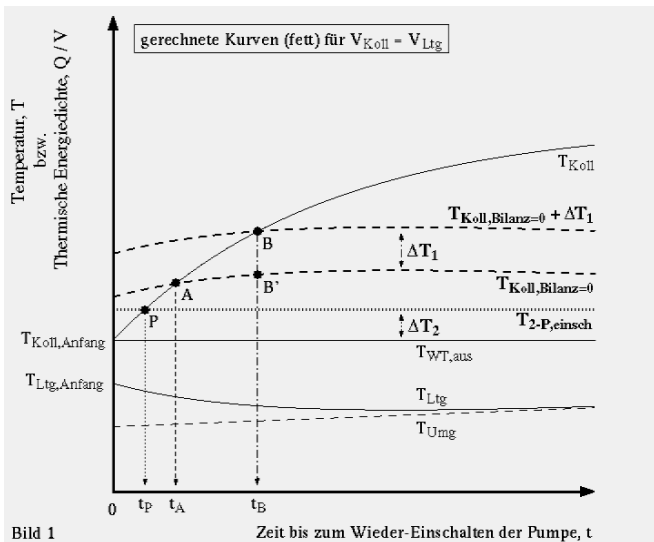


Bild 1
„Statische“ Regelung

Das Prinzip der „statischen“ Regelung

Der Hintergrund der „statischen“ Regelung ist in **Bild 1** im Temperatur-(thermische Energiedichte)-Zeit-Diagramm dargestellt.

Die flankierenden Einschaltbedingungen sind:

$$T_{Koll} \geq T_{WT,aus} \quad (10a)$$

UND

$$(T_{Koll} \geq \text{Wert1 ODER } T_{Koll} - \text{Wert2} \geq T_{Umg}) \quad (10b)$$

Dabei sind Wert1 und Wert2 bspw. 75 °C bzw. 35 °C.

Wird, etwa bei einer einfachen Anlage, die Außentemperatur nicht erfaßt, kann der Grenzwert für die Temperaturüberhöhung auch an die Speichertemperatur $T_{WT,aus}$ angeknüpft werden, entsprechend:

$$T_{Koll} \geq T_{WT,aus} \quad (11a)$$

UND

$$(T_{Koll} \geq \text{Wert1 ODER } T_{Koll} - \text{Wert3} \geq T_{WT,aus}) \quad (11b)$$

mit Wert3 bspw. 20 °C.

Die flankierenden Einschaltbedingungen erfüllen die bilanziert-basierte Einschaltbedingung nicht. Deshalb wird hier ausgeschaltet, sobald der aufgeheizte Wärmeträger aus dem Kollektor herausgepumpt ist (wie bei einer 2-Punkt-Regelung):

$$T_{Koll} - \text{Wert4} \leq T_{WT,aus} \quad (12)$$

Die „Werte“ können empirisch oder durch Variation der Parameter in Simulationsrechnungen optimiert werden.

kleiner werden, je mehr sich der Kollektor seinem Einstrahlungs/Verlust-Gleichgewicht mit der Umgebung nähert. Die „dynamische“ Regelung, das wird im folgenden hergeleitet, vermag das daraus resultierende Optimum maximaler effektiver mittlerer Wärmeleistung der Solaranlage zu erkennen und kann zu diesem Zeitpunkt die Pumpe einschalten. Die Wirkungsweise der „dynamischen“ esaa-Regelung wird anhand der Bilder 2 und 3 erläutert. Sie bauen unmittelbar auf Bild 1 auf.

Im Bild 2 ist wieder die Strecke B-B' eingezeichnet, die den mit dem „Schwellenwert“ ΔT_1 (resp. $\Delta(Q/V)$) identischen Bilanzgewinn aus der „statischen“ Regelung verkörpert.

Um diesen Bilanzgewinn zu realisieren, ist die gesamte Zeit seit Beginn des Aufheizens, seit dem letzten Pumpenstopp, also die Zeit t_B nötig gewesen. $\Delta T_1/t_B$ (resp. $\Delta(Q/V)/t_B$) repräsentiert also den mittleren Wärmestrom vom Kollektor zum Speicher bzw. die mittlere Wärmeleistung des Systems! Im Diagramm ist dieser Zusammenhang als Steigungsdreieck B-B'-B'' ausgedrückt: Die mittlere Wärmeleistung wird unmittelbar durch die Steigung $\Delta T_1/t_B$ der Hypothenuse B''-B (schräg ansteigende, strichpunktierte Linie) verkörpert.

Das Ziel, die mittlere Wärmeleistung zu maximieren, bedeutet, im einzelnen Aufheiz-Pump-Zyklus das Steigungsdreieck mit der steilstmöglichen Hypothenuse zu realisieren. Diese maximale Steigung ist offensichtlich dann gegeben, wenn die Hypothenuse im Steigungsdreieck zugleich Tangente an die Kollektor-Aufheizkurve ist. Das ist die schräg ansteigende, durchgezogene Linie durch die Punkte C' und C. Der Berührungspunkt der Tangente ist C. C' steht für die korrespondierende „Nullbilanz-Temperatur“. Das Aufheiz-Pump-Intervall hat jetzt die Länge t_C , die für den Bilanzgewinn relevante Temperaturdifferenz ist $T_C - T_{C'}$, und die effektive mittlere Wärmeleistung wird durch $(T_C - T_{C'})/t_C$ resp. $((Q/V)_C - (Q/V)_{C'})/t_C$ repräsentiert.

In dem aus der „dynamischen“ Regelung resultierenden Steigungsdreieck C-C'-C'' ist die Hypothenuse deutlich steiler als im Dreieck B-B'-B'', das aus der „statischen“ Variante erhalten wird. Wird über den Punkt C hin-

aus aufgeheizt, dann wird, das ist offensichtlich, die Steigung der Hypothenuse wieder kleiner und die effektive mittlere Wärmeleistung sinkt.

Im Bild 2 standen die Strecken $T_B - T_B$ und $T_C - T_C$ explizit für die den jeweiligen Bilanzgewinn repräsentierenden Temperaturdifferenzen. Im Bild 3 ist das verallgemeinert: Die Kurve $T_{Koll} - T_{Koll, Bilanz=0}$ beschreibt den Verlauf der Kollektor-Übertemperatur gegenüber der „Nullbilanz-Temperatur“ als Funktion der Zeit (rechte Skala). Sie hat zur Zeit t_A im Punkt A* den Wert Null.

Dividiert man diese Kurve durch die seit dem letzten Pumpenstopp vergangene Zeit t , dann erhält man die punktiert gezeichnete Kurve der nach dem Volumenverhältnis gewichtet gemittelten Aufheizraten von Speicherleitung und Kollektor, oder anders gesagt, die Kurve der effektiven, mittleren Wärmeleistung als Funktion der Zeit. Die Kurve steigt von anfänglich negativen Werten (rechte Skala) steil auf, hat im Punkt A* den Wert Null, und geht zur Zeit t_C im Punkt C** über ein Maximum.

Dieses Maximum der effektiven mittleren Wärmeleistung des Solarkreislaufs vermag die esaa-Regelung in ihrer „dynamischen“ Variante auszuschöpfen. Es liegt im Beispiel um gut 10% oberhalb des aus der „statischen“ Regelung resultierenden Punktes B**.

(Bezug ist Punkt A*, wo die gemittelte Aufheizgeschwindigkeit den Wert 0 hat.) Das Einschaltkriterium der „dynamischen“ esaa-Regelung ist also der Nulldurchgang der 2. Ableitung von $T_{Koll} - T_{Koll, Bilanz=0}$ über der Zeit.

Es läßt sich regelungstechnisch einfach umsetzen, indem bspw. in regelmäßigem zeitlichem Abstand $T_{Koll} - T_{Koll, Bilanz=0}/t$ ermittelt und der aktuelle Wert mit dem jeweils vorangegangenen verglichen wird. Erweist sich der aktuelle Wert als kleiner, schaltet die Pumpe ein.

Wie bei der „statischen“ wird auch bei der „dynamischen“ Variante der Regelung entsprechend der speziellen Ausschaltbedingung nach Gleichung (9) verfahren, die den aufgeheizten Wärmeträger aus dem Kollektor auf einmal in den Speicher führt.

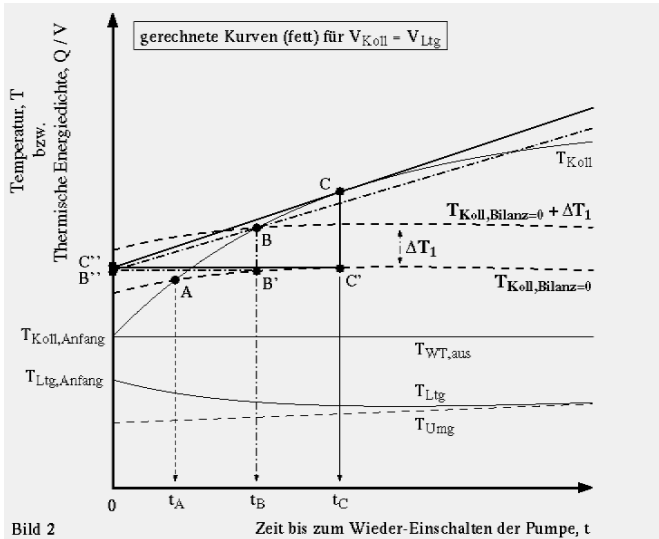


Bild 2
„Dynamische“
Regelung

Das Prinzip der „dynamischen“ Regelung

Die „dynamische“ Regelung basiert auf den Grundlagen der „statischen“. Ihr Ziel ist es, die im einzelnen Aufheiz-Pump-Zyklus maximal erreichbare Wärmeleistung zu realisieren.

Es ist offensichtlich, daß sich beim aktuellen Beispiel weitere effektive Wärmegewinne durch ein weiteres Sich-Aufheizen-Lassen des Kollektors erzielen ließen. Genauso offensichtlich ist, daß diese Zugewinne immer

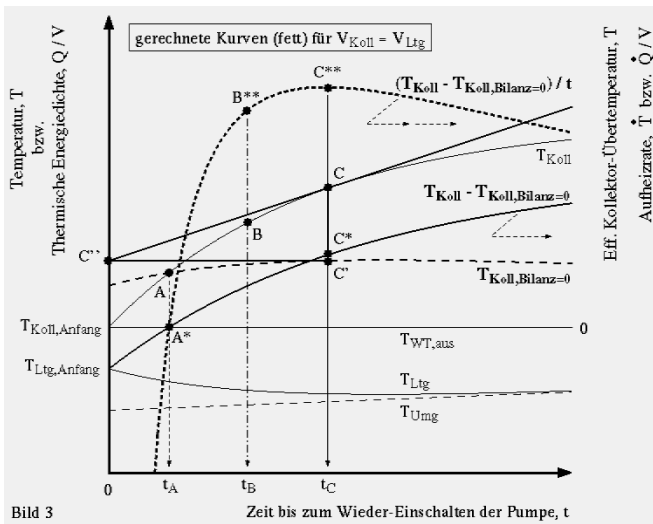


Bild 3
„Dynamische“
Regelung – Leitgröße
ist die Kollektortempe-
ratur

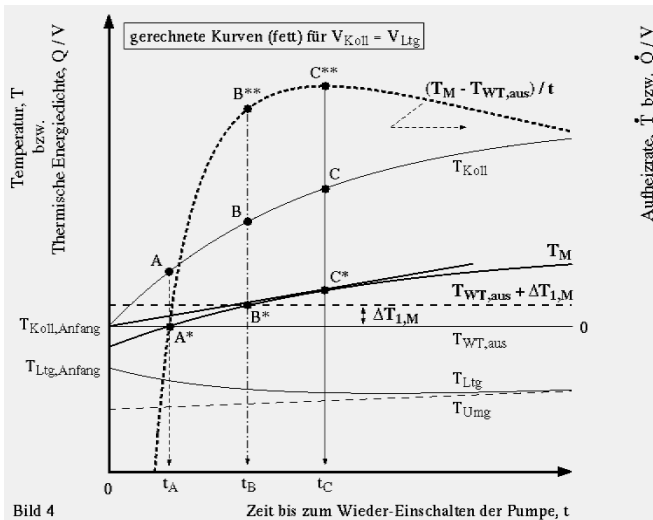


Bild 4
„Dynamische“
Regelung – Leitgröße
ist die, nach Volumen-
verhältnissen gewicht,
gemittelte Temperatur
von Kollektor und Speicherzuleitung

Auch die flankierenden Ein- und Ausschaltbedingungen (Gleichungen (10) bis (12)) gelten entsprechend.

**Energiegehalt statt Kollektor-
temperatur als Zielgröße**

Die oben ausgeführte Ableitung von „Nullbilanz-Bedingung“ und Schaltbedingung war auf die Kollektortemperatur orientiert. Das ist zum einen die unmittelbare Regelgröße, zum anderen lassen sich irgendwelche Modifikationen (s. u.) in diese Form der Gleichung besonders einfach integrieren.

Die Darstellung im **Bild 4** entspricht inhaltlich dem Bild 3. Leitgröße ist aber nicht mehr die Kollektortemperatur, sondern die nach Volumenverhältnissen ge-

wichtet gemittelte Temperatur bzw. thermische Energiedichte der Summe des Wärmeträgers in Speicherzuleitung und Kollektor. Der Bezug für die Bilanzierung ist unmittelbar die Wärmetauscherausgangstemperatur.

Die Umwandlung der Ausgangsgleichung (2) führt zur „Nullbilanz-Bedingung“ in der Form:

$$(V_{Koll} \cdot T_{Koll} + V_{Ltg} \cdot T_{Ltg}) / (V_{Koll} + V_{Ltg}) - T_{WT,aus} = 0 \quad (13)$$

und wenn ΔT_1 eingeführt ist, zur entsprechenden Schaltbedingung:

$$(V_{Koll} \cdot T_{Koll} + V_{Ltg} \cdot T_{Ltg}) / (V_{Koll} + V_{Ltg}) - T_{WT,aus} - \Delta T_1 \cdot V_{Koll} / (V_{Koll} + V_{Ltg}) = 0 \quad (14)$$

Das in den Gleichungen (13) und (14) enthaltene Glied:

$$T_M = (V_{Koll} \cdot T_{Koll} + V_{Ltg} \cdot T_{Ltg}) / (V_{Koll} + V_{Ltg}) \quad (15)$$

bedeutet die nach den Volumenverhältnissen gewichtet gemittelte Temperatur T_M bzw. die gemittelte thermische Energiedichte $(Q/V)_M$ der Summe aus Kollektor und Speicherzuleitung. Auch der Schwellenwert ΔT_1 erscheint modifiziert:

$$\Delta T_{1,M} = \Delta T_1 \cdot V_{Koll} / (V_{Koll} + V_{Ltg}) \quad (16)$$

Damit ergibt sich die gemittelte „Nullbilanz-Temperatur“ der Summe aus Kollektor und Speicherzuleitung (Gleichung (15) in (13)) zu:

$$T_M = T_{WT,aus} \quad (17)$$

und entsprechend die Schaltbedingung zu:

$$T_{M,einsch} \geq T_M + \Delta T_{1,M} \quad (18)$$

$$T_{M,einsch} \geq T_{WT,aus} + \Delta T_{1,M} \quad (19)$$

Die Kurve T_M in Bild 4 beschreibt den Verlauf der gemittelten Temperatur bzw. der thermischen Energiedichte in Kollektor plus Speicherzuleitung als Funktion der Zeit. Sie steht für die gesamte Wärme in demjenigen Teil des Solarkreislaufs, der im Pumpvorgang durch den Wärmetauscher transportiert wird. Mit zunehmender Aufheizung des Kollektors, also zunehmendem Wärmeeintrag in den Solarkreislauf, steigt die Kurve an.

Dividiert man die T_M -Kurve durch die seit dem Pumpenstopp vergangene Zeit t , dann erhält man die punktiert gezeichnete Kurve der effektiven mittleren Wärmeleistung als Funktion der Zeit. Sie zeigt zugleich die gemittelten Aufheizraten von Speicherzuleitung plus Kollektor. Die Kurve steigt gleichfalls von anfänglich negativen Werten steil auf, hat im Punkt A^* den Wert Null und geht zur Zeit t_C im Punkt C^{**} über ein Maximum.

Wie gezeigt, können die verschiedenen Varianten der Regelung in unterschiedlicher Weise hergeleitet und regelungstechnisch umgesetzt werden.

Erweiterung der neuentwickelten Regelalgorithmen

Den bisherigen, grundsätzlichen Betrachtungen hat ein einfachst konzipierter Solarkreislauf zugrunde gelegen, doch kann das neue Regelungskonzept auch auf differenziertere Strukturen angewandt und diesen, i. allg. durch additive Glieder im Regelalgorithmus, speziell angepaßt werden. Dazu ein Beispiel: Typischerweise liegen bei einer thermischen Solaranlage Speicher- und Kollektorzuleitung in Kollektornähe im Freien bzw. in Räumen, die dem ähnliche Temperaturen haben (z. B. Dachböden). In Wärmespeichernähe liegen sie typischerweise im Inneren eines Gebäudes. Daraus können sich unterschiedliche Bedingungen für den Wärmeaustausch der Speicherzuleitung mit der Umgebung ergeben, was nahelegt, sie für die Bilanzrechnung entsprechend zu unterteilen.

Die Einschaltbedingung wird, für bspw. zwei solche Abschnitte, entsprechend erweitert:

$$T_{Koll,einsch} \geq (V_{Ltg1} / V_{Koll}) \cdot (T_{WT,aus} - T_{Ltg1}) + (V_{Ltg2} / V_{Koll}) \cdot (T_{WT,aus} - T_{Ltg2}) + T_{WT,aus} + \Delta T_1 \quad (20)$$

Zur praktischen Umsetzung

In beiden Varianten kann die esaa-Regelung in vorhandene Anlagenkonzepte eingefügt werden und diese optimieren, ohne daß deren spezifische Eigenschaften wie Kennlinien der Bauteile etc. bekannt zu sein brauchen. Lediglich die Volumina von Kollektor und Speicherzuleitung (evtl. gegliedert) werden vorausgesetzt.

Der zusätzliche Installationsaufwand beschränkt sich auf zwei (u. U. auch mehrere) Leitungsfühler, wobei einer der Fühler bei Regelungen mit Wärmemengenzählern bereits vorhanden ist. Darüber hinaus kann noch die Umgebungstemperatur des Kollektors erfaßt, bzw. die in Heizungsregelungen bereits erfaßte Außentemperatur einbezogen werden.

Die Inbetriebnahme erfordert lediglich, das Kollektorfüllvolumen und das Volumen der Speicherzuleitung bzw., falls diese unterteilt werden soll, die entsprechenden Teilvolumina, über ein Eingabe- und Anzeigefeld einzugeben.

Ergebnisse erster Simulationsrechnungen

Erste Simulationsrechnungen bei der Fraunhofer-Gesellschaft, Institut für Solare Energiesysteme, haben bereits bei der Grundversion des „statischen“ esaa-Reglers (und mit noch willkürlichen, keinesfalls optimalen Parametern) gezeigt, daß (Zitat aus dem Untersuchungsbericht): *„mit einem intelligent modulierenden Regler (dT_on wird den Umgebungsbedingungen angepaßt) der Wirkungsgrad der Solaranlage und damit der Anlagenwirkungsgrad gesteigert werden kann.“*

An allen simulierten Tagen, einschließlich eines wolkenlosen Sommertages, konnten bessere Wärmeerträge als mit einer 2-Punkt-Regelung erzielt werden. Die Verlustbeiwerte der Leitungen haben einen entscheidenden Einfluß auf die mit der esaa-Regelungsstrategie zu erzielenden Ertragsverbesserungen. Sie hängen sehr stark von der Ausführung der Wärmedämmung und den Wärmebrücken ab. Je schlechter z. B. die Wärmedämmung der Anlage (geworden) ist, desto effizienter, im Vergleich zum 2-Punkt-Regler, arbeitet die esaa-Regelung.

Bei realen Anlagen kann daher von einem Optimierungspotential von über 10% ausgegangen werden.

Zusammenfassung

In der neuentwickelten Solaranlagen-Regelung SONJA® der esaa GmbH sind Regel-Algorithmen auf der Basis einer Wärmebilanz über den Kollektor, den Speicher und, das ist entscheidend, die Speicherzuleitung implementiert. Die Temperaturen von Kollektor und Speicherzuleitung gehen, entsprechend den mit ihnen korrespondierenden Volumina an Wärmeträger gewichtet, in diese Wärmebilanz ein. Das verbessert den Energieertrag konventioneller thermischer Solaranlagen nachhaltig. Zusätzliche Installationen beschränken sich auf, je nach Konzeption der Anlage, einen bis mehrere Leitungsfühler. Die Inbetriebnahme erfolgt in einfacher Weise durch Eingabe des Kollektorvolumens und des Leitungsvolumens. [H 598]

Ausblick: Die Vorteile des wärmebilanzierten Reglers kommen vor allem zu Zeiten zum Tragen, an denen die solare Wärmebedarfsdeckung unzureichend ist. Übers Jahr wirkt der Regler daher ausgleichend: Der signifikanten Ertragsverbesserung in der dunklen und kalten Jahreszeit steht keine entsprechende, unerwünschte Steigerung des Wärmeüberschusses im Sommer gegenüber. Ganz besonders bietet sich der Regler auch zur Nachrüstung bestehender Anlagen an.