

Ziel beim Einsatz von thermischen Solaranlagen ist es, einen möglichst großen Anteil des Wärmebedarfs durch Solarenergie zu decken. Dieses Bestreben wird zum einen durch konstruktive Maßnahmen verwirklicht, wie z. B. mit selektiven Absorberbeschichtungen, zum anderen durch bestimmte Regelungsstrategien. Letztere führen häufig zu Reglereinstellungen mit geringen Ein- und Ausschalttemperaturdifferenzen. Doch wie nutzbringend ist dies unter dem Aspekt einer gesamtenergetischen Betrachtung?

Geringe Ein- und Ausschalttemperaturdifferenzen der Solarkreispumpe wirken sich nicht nur positiv auf die Steigerung des solaren Ertrags aus. Je geringer die Ein- und Ausschalttemperaturdifferenzen gewählt werden, desto öfter wird die Pumpe in Betrieb sein und desto längere Pumpenlaufzeiten werden sich innerhalb eines Jahres ergeben. Die Pumpenlaufzeit wiederum beeinflusst die jährlich aufzuwendende Betriebsenergie in Form von elektrischem Strom. Beide Größen, Systemertrag und Energieaufwand für den Betrieb der Solaranlage, sind Einflussfaktoren auf die energetische Amortisationszeit. Die energetische Amortisationszeit ist eine Größe zur Beurteilung der Umwelteigenschaften von Anlagen zur Energiebereitstellung. Bei einer thermischen

Energetische Amortisation von thermischen Solaranlagen

Solarertrag und Regelungsstrategie

Solaranlage beurteilt sie nicht nur den Systemertrag und damit die durch den Betrieb der Solaranlage eingesparte Primärenergie. Sondern berücksichtigt auch den Anteil an Primärenergie, der für die Herstellung und den Betrieb der Solaranlage aufzuwenden ist. In folgendem Beitrag wird der Einfluss von verschiedenen Reglereinstellungen auf die Betriebsstunden und die anteilige Energieeinsparung an einer „Standard-Solaranlage“ untersucht. Dazu wurden TRNSYS-Simulationsrechnungen zur Variation der Einschalt- und Ausschalttemperaturdifferenzen durchgeführt. Im Anschluss daran erfolgt die Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf die energetische Amortisationszeit.

Energieeinsparung und Pumpenlaufzeit

Als „Standard-Solaranlage“ wird eine typische Solaranlage zur Trinkwassererwärmung für ein Einfamilienhaus mit 5 m² Kollektorfläche und einem Speichervolumen von 300 Litern definiert. Das Bereitschaftsvolumen beträgt 150 Liter. Alle Simulationen wurden in TRNSYS mit den gleichen Randbedingungen (siehe Tabelle 1) durchgeführt. Variiert wurden die Einschalt- und Ausschalttemperaturdifferenzen am Regler. Die

Einschalttemperaturdifferenz ist die Temperaturdifferenz zwischen Kollektorausstritt und Speicher, bei der die Pumpe einschaltet und das Wärmeträgerfluid durch den Kollektorkreis pumpt. Sie wurde variiert von 1 K bis 20 K. Wird die angegebene Ausschalttemperaturdifferenz erreicht, schaltet die Pumpe wieder aus. Diese Temperaturdifferenz wurde zwischen 1 K und 15 K variiert. Für nachfolgende Untersuchungen sind als Ausgabedaten der Simulationen die anteilige Energieeinsparung der Solaranlage und die Pumpenlaufzeit interessant. Aus der anteiligen Energieeinsparung der Solaranlage lässt sich das substituierte Primärenergieäquivalent (PEAsub) ermitteln, welches die durch die Solaranlage eingesparte Energie repräsentiert. Multipliziert man die anteilige Energieeinsparung mit der von der konventionellen (nicht solaren) Anlage benötigten Energiemenge, so erhält man den Anteil, der durch die Solaranlage eingespart wurde. Die benötigte Energiemenge einer konventionellen Anlage zur Trinkwassererwärmung sowie die Wärmeverluste des Trinkwasserspeichers wurden dem europäischen Normentwurf prEN 12977-2 [1] entnommen, in welchem ein Warmwasserbedarf von 2945 kWh und die Wärmeverluste des Speichers mit 644 kWh spezifiziert sind.

Jährlicher Primärenergiebedarf der Pumpe

Mit der aus den Simulationen erhaltenen Pumpenlaufzeit kann auf den jährlichen Primärenergiebedarf der Pumpe zurückgerechnet werden. Mit Ansatz einer typischen Leistungsaufnahme der Pumpe von 50 W erhält man den jährlichen Energiebedarf der Solarkreispumpe. Dieser lässt sich durch Multiplikation des Primärenergieäquivalentes für Strom von 3,8 kWh_{primär}/kWh [2] auf den jährlich benötigten Primärenergiebedarf der Pumpe umrechnen.

Beide Größen, das substituierte Primärenergieäquivalent und der jährlich benötigte Primärenergiebedarf der Pumpe gehen mit in die Berechnung der energetischen Amortisationszeit ein. Dabei wird der Primärenergiebedarf der Pumpe als ein Anteil des kumulierten Energieaufwandes für den Betrieb der Solaranlage KEAb im eingesetzten Primärenergieäquivalent PEA_{ein} (Gl. 1) berücksichtigt. Die energetische Amortisationszeit ergibt sich durch Gegenüberstellung des eingesetzten und des substituierten Primärenergieäquivalentes (Gl. 2).

$$PEA_{ein}(t) = KEA_h + KEA_b \cdot t + KEA_w \cdot t$$

(Gl. 1)

$$t = AZ = \frac{KEA_h}{Q_{conv, tot} - Q_{aux, tot} - KEA_b - KEA_w}$$

(Gl. 2)

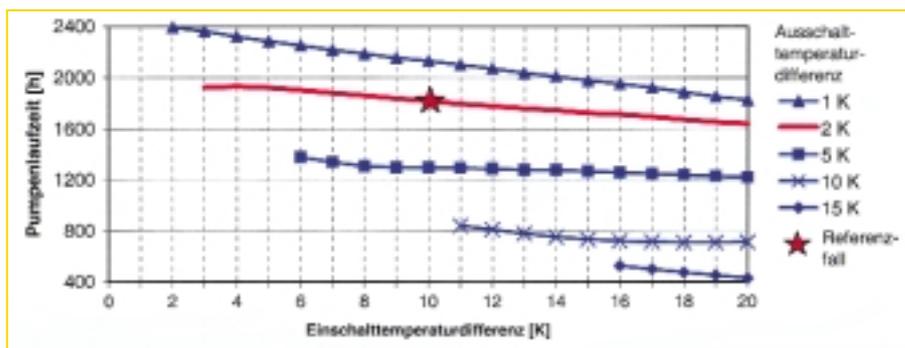


Bild 1 Laufzeiten der Solarkreispumpe in Abhängigkeit von der Einschalttemperaturdifferenz

Energieaufwand zur Herstellung

Für die übrigen Einflussgrößen auf die energetische Amortisationszeit der Solaranlage, wird ebenfalls mit typischen Werten der definierten „Standard-Solaranlage“ gerechnet. Der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung KEA_h wurde mit 3967 kWh, der kumulierte Energieaufwand für Wartung KEA_w mit 41 kWh/a und der Primärenergiebedarf des Solarreglers wird mit 57 kWh/a angesetzt.

Um die Ergebnisse der Simulationen besser vergleichen zu können, werden sie auf einen Referenzfall bezogen. Der Referenzfall weist eine Einschalttemperaturdifferenz von 10 K und eine Ausschalttemperaturdifferenz von 2 K auf. Tabelle 2 zeigt die für diesen Referenzfall ermittelten Ausgabedaten der Simulationsrechnung sowie die bestimmenden Größen der energetischen Amortisationszeit.

Betriebsstunden der Pumpe

Variiert man, wie oben beschrieben, die Einschalttemperaturdifferenz von 1 K bis 20 K und die Ausschalttemperaturdifferenz von 1 K bis 15 K, ergeben sich Pumpenlaufzeiten von 429 h bis 2395 h. Bezogen auf den Referenzfall (1821 h) entspricht dies einer Erhöhung von 32 % im Extremfall bei einer Ausschalttemperaturdifferenz von 1 K und einer Einschalttemperaturdifferenz von 2 K. Der andere Extremfall, kurze Pumpenlaufzeiten bei hohen Einschalt- (20 K) und Ausschalttemperaturdifferenzen (15 K), liefert eine Reduktion der Pumpenlaufzeit von 76 %. Bild 1 zeigt die Laufzeiten der Solarkreispumpe in Abhängigkeit von der Einschalttemperaturdifferenz bei fünf verschiedenen Ausschalttemperaturdifferenzen. Der Referenzfall ist in den nachfolgenden Bildern mit einem Stern gekennzeichnet.

Anteilige Energieeinsparung

Betrachtet man das Verhalten der anteiligen Energieeinsparung, so fällt auf, dass diese bei geringeren Einschalt-/Ausschalttemperaturdifferenzen wie im Referenzfall (Einschalt-/Ausschalttemperaturdifferenz: 10/2) nur geringfügig steigt (Bild 2). Umgerechnet auf das Primärenergieäquivalent ergibt sich für den Referenzfall mit einer anteiligen Energieeinsparung von 51,69 % ein substituiertes Primärenergieäquivalent von 2423 kWh/a. Niedrige Ein- und Ausschalttemperaturdifferenzen ergeben im Extremfall (Einschalt-/Ausschalttemperaturdifferenz: 2/1) eine anteilige Energieeinsparung von 53,04 %, was einem substituierten Primärenergieäquivalent PEA_{sub} von 2486 kWh/a entspricht. Bezogen auf den Referenzfall bedeutet dies eine Erhöhung der anteiligen Energieeinsparung um 2,6 % (absolut).

Erhöhter Primärenergiebedarf

Wird der daraus entstehende Gewinn dem Mehrverbrauch an Primärenergie durch die höheren Betriebsstunden der Solarkreis-

Randbedingungen für die Simulationsrechnungen	
Wetterdaten:	Testreferenzjahr Würzburg
Dachausrichtung:	Süd, Anstellwinkel 45 °
Warmwasserverbrauch:	200 Liter/Tag
	7.00 Uhr: 80 Liter; 12.00 Uhr: 40 Liter; 19.00 Uhr: 80 Liter
	Warmwassertemperatur: 45 °C Kaltwassertemperatur: 10 ± 3 °C (jahreszeitabhängig) jährlicher Trinkwasserwärmebedarf: 2945 kWh
Kollektorkreis:	Länge Vorlauf und Rücklauf jeweils 10 m verlegt im Innenbereich
Speicher:	Umgebungstemperatur: 15 °C
	Nachheizung: 15 kW, Volumenstrom: 1292 l/h
	Trinkwassersolltemperatur: 52,5 °C

Tabelle 1 Randbedingungen für die durchgeführten Simulationsrechnungen

Ergebnisse Referenzfall (Einschalttemperaturdifferenz: 10K, Ausschalttemperaturdifferenz: 2K)				
anteilige Energieeinsparung [%]	PEA sub [kWh/a]	Pumpenlaufzeit [h]	Primärenergiebedarf der Pumpe [kWh/a]	Energetische Amortisationszeit [a]
51,69	2423	1821	298	2,0

Tabelle 2 Ergebnisse der Simulationen für den Referenzfall

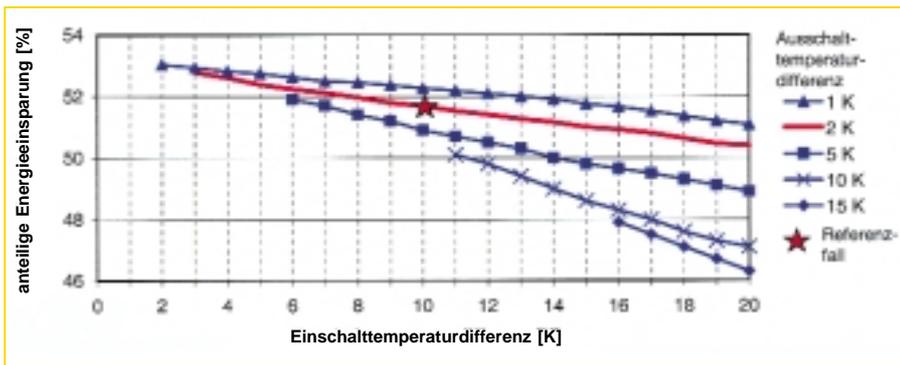


Bild 2 Anteilige Energieeinsparung in Abhängigkeit von der Einschalttemperaturdifferenz

pumpe gegenübergestellt, stellt man fest, dass durch die längeren Pumpenlaufzeiten ein gegenüber dem Referenzfall erhöhter Primärenergiebedarf von 109 kWh/a entsteht. Dieser überschreitet den erzielten höheren Ertrag von 63 kWh/a, so dass sich dadurch sogar ein Mehrverbrauch an Primärenergie von 46 kWh/a ergibt. Allerdings stellt dies den Extremfall dar. In Bild 3 ist dieser Sachverhalt für die Ausschalttemperaturdifferenzen 1 K, 2 K, 5 K, 10 K und 15 K aufgezeigt. Dargestellt ist die Differenz in kWh zwischen der Abweichung des substituierten Primärenergieäquivalentes im Referenzfall und der Abweichung des jährlichen Primärenergiebedarfs der Solarkreispumpe, in Bezug auf den Referenzfall. Bei einer Einschalttemperaturdifferenz von 11 K und einer Ausschalttemperaturdifferenz von 10 K beispielsweise, wird der Primärenergiebedarf der Pumpe durch kürzere Laufzeiten um 186 kWh/a gesenkt und es ergibt sich gegenüber dem Referenzfall eine Senkung des PEASub von 75 kWh/a, was zusammen einen Gewinn von 111 kWh/a ausmacht (Bild 3).

Energetische Amortisationszeit

Mit obigen Ergebnissen lässt sich die energetische Amortisationszeit nach Gl. 2 berechnen. Der tendenzielle Verlauf entspricht quasi den Aussagen in Bild 3. Eine Einsparung an Primärenergie bewirkt eine Senkung der energetischen Amortisationszeit. Die energetischen Amortisationszeiten liegen bei den untersuchten Varianten zwischen 1,90 und 2,15 Jahren. Diese Unterschiede erscheinen gering, doch muss hierbei berücksichtigt werden, dass eine Reduktion der energetischen Amortisationszeit um 0,1 Jahre, bei einer Anlage wie im Referenzfall, die eine energetische Amortisationszeit von 2,0 Jahren aufweist, immerhin einer Verbesserung von rund 5 % entspricht. Bild 4 zeigt, dass bei einer Wahl

von Einschalt-/Ausschalttemperaturdifferenz 11/10 K das Minimum erreicht wird. Erhöht man die Ausschalttemperaturdifferenz weiter auf 15 K, liegen die energetischen Amortisationszeiten wieder höher. Die Ergebnisse stellen den prinzipiellen Zusammenhang zwischen eingestellten Temperaturdifferenzen, anteiliger Energieeinsparung und Pumpenlaufzeiten dar, liefern jedoch keine allgemeingültige Aussage, da sie zusätzlich auch von anderen Parametern, wie der Größe der Anlage, der Rohrleitung (Länge und Querschnitt) und dem Massenstrom abhängen.

Welche Regel-Strategie ist nutzbringender?

Zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Reglereinstellungen bei thermischen Solaranlagen wurden mit TRNSYS Simulationsrechnungen durchgeführt. Dabei wurden Simulationen für eine Standard-Solaranlage zur Trinkwassererwärmung durchgeführt, bei denen die Ein- und Ausschalttemperaturdifferenzen der Solarkreispumpe variiert wurden. Die Einschalttemperatur-

peraturdifferenz, die zwischen 2 K und 20 K variiert wurde, entspricht der Temperaturdifferenz zwischen Kollektoraustritt und Speicher, bei der die Pumpe einschaltet. Die Ausschalttemperaturdifferenz entspricht der Temperaturdifferenz, bei der die Pumpe wieder abschaltet. Sie wurde zwischen 1 K und 15 K variiert.

Die Simulationsergebnisse wurden hinsichtlich Betriebsstunden und anteiliger Energieeinsparung der Solaranlage ausgewertet. Dabei wird der große Einfluss der Reglereinstellungen auf die Betriebsstunden der Solarkreispumpe deutlich. Die Bandbreite der jährlichen Betriebsstunden reicht von 429 h/a bis 2395 h/a. Die sich ergebende anteilige Energieeinsparung dagegen variiert von 46 % bis 53 %. Werden diese Ergebnisse auf die eingesparte bzw. aufzuwendende Primärenergie umgerechnet, ergeben sich bei einer Leistungsaufnahme der Pumpe von 50 W für den kumulierten Energieaufwand Werte von 82 kWh/a bis 455 kWh/a. Demgegenüber beträgt die eingesparte Primärenergie 2156 kWh/a und 2486 kWh/a.

Bei der Betrachtung geringer Ein- und Ausschalttemperaturdifferenzen ist festzustellen, dass die durch höheren Solarertrag eingesparte Primärenergie, die zusätzlich aufzuwendende Primärenergie für die längere Laufzeit der Pumpe nicht immer kompensiert. Die notwendige Primärenergie für den Betrieb der Solarkreispumpe fällt oft mehr ins Gewicht, so dass sich primärenergetisch sogar eine Verschlechterung ergeben kann. Aus diesem Grund sollten die Temperaturdifferenzeinstellungen am Regler eher größer gewählt werden.

Zusätzlich spricht noch ein Argument gegen Reglereinstellungen mit äußerst geringen Temperaturdifferenzen. Durch die Messungenauigkeit der verwendeten Tem-

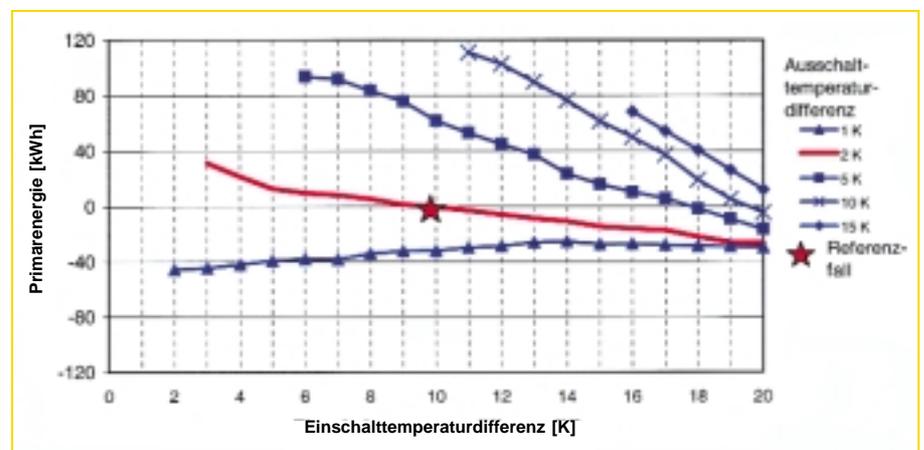


Bild 3 Veränderung der eingesparten Primärenergie bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen (bezogen auf Referenzfall)

peraturfühler, die durchaus im Bereich von 1 K liegen kann, kann es bei derartigen Einstellungen passieren, dass die Pumpe zu spät ausgeschaltet wird, und somit Wärme aus dem Speicher in den Kollektorkreis abgeführt wird.

Die Analyse zeigt deutlich, dass es wesentlich nutzbringender ist, die Ausschalttemperaturdifferenz höher zu wählen und gleichzeitig die Hysterese zwischen Einschalt- und Ausschalttemperaturdifferenz zu verringern, anstatt sich durch Reglereinstellungen mit geringen Temperaturdifferenzen auf die Maximierung des Solarertrages zu konzentrieren.

Literatur

- [1] prEN 12977-2: „Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 2: Prüfverfahren“, 1997
 [2] Bundesamt für Energiewirtschaft: Ökoinventare für Energiesysteme, 3. Auflage, Zürich 1996

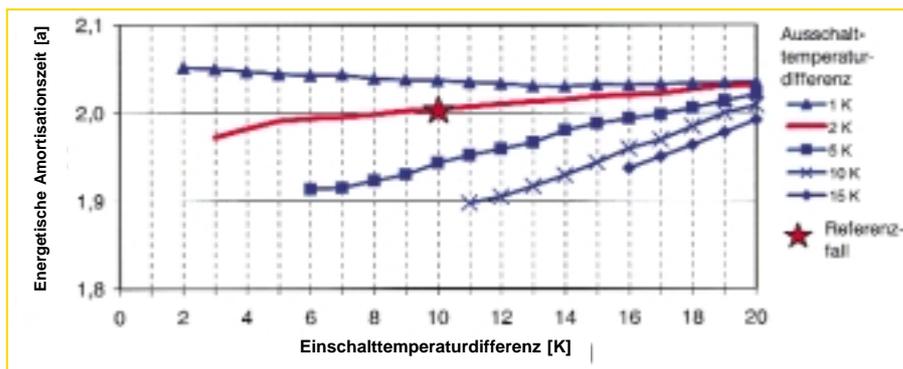


Bild 4 Energetische Amortisationszeit bei unterschiedlichen Ein- und Ausschalttemperaturdifferenzen

Unsere Autorin Dipl.-Ing. **Elke Streicher** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin beim Forschungs- und Testzentrum für thermische Solaranlagen (TZS) des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart (Telefon (07 11) 6 85-35 36, Telefax (07 11) 6 85-35 03). Direktor des ITW ist Prof. Dr.-Ing. Hans Müller-Steinhagen.

Autor Dipl.-Ing. **Harald Drück** ist seit 1994 auf dem Gebiet der Solartechnik tätig und leitet seit 1999 das TZS. Das TZS ist das größte Prüfzentrum für thermische Solartechnik in Deutschland und seit 2002 vom DAP für die Prüfung von thermischen Solaranlagen und ihren Bauteilen nach europäischen Normen akkreditiert.