

# Methodik zur Ermittlung der energetischen Amortisationszeit von thermischen Solaranlagen

*E. Streicher, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen*

*Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)*

*Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart*

*Tel.: 0711 / 685-3536, Fax: 0711 / 685-3503*

*Email: streicher@itw.uni-stuttgart.de, Internet: <http://www.itw.uni-stuttgart.de>*

## 1 Einleitung

Die Vorteile, welche die Nutzung der Sonnenenergie anstelle der Nutzung von fossilen Energieträgern aufweist, sind weitläufig bekannt. In diesem Zusammenhang darf jedoch nicht vergessen werden, dass zur Herstellung und zum Betrieb von thermischen Solaranlagen ebenfalls ein gewisser Energieaufwand nötig ist. Dieser Energieaufwand wird bei der Ermittlung der energetischen Amortisationszeit berücksichtigt.

## 2 Methodik zur Ermittlung der energetischen Amortisationszeit

Unter der energetischen Amortisationszeit versteht man die Zeit, welche die Anlage in Betrieb sein muss, um die Primärenergie einzusparen, die für Herstellung und Betrieb aufgewendet wurde. Sie ergibt sich durch Ermittlung der eingesetzten Primärenergie, welche anschließend der Energie gegenübergestellt wird, die durch die Solaranlage eingespart wird.

Das eingesetzte Primärenergieäquivalent ( $PEA_{\text{ein}}$ ) setzt sich aus dem kumulierten Energieaufwand für die Herstellung ( $KEA_h$ ), welcher auch den Transport und die Installation der Anlage beinhaltet, dem kumulierten Energieaufwand für den Betrieb der Anlage ( $KEA_b$ ) sowie dem kumulierten Energieaufwand für die Wartung ( $KEA_w$ ) zusammen. Prinzipiell gehört zum eingesetzten Primärenergieäquivalent auch der kumulierte Energieaufwand für die Entsorgung bzw. das Recycling der Solaranlage. Da hierfür bisher jedoch keine belastbare Datenbasis vorliegt, wird dieser Anteil im allgemeinen nicht berücksichtigt.

$$PEA_{\text{ein}}(t) = KEA_h + KEA_b \cdot t + KEA_w \cdot t \quad (1)$$

Dem eingesetzten Primärenergieäquivalent wird ein substituiertes Primärenergieäquivalent ( $PEA_{\text{sub}}$ ) gegenübergestellt. Dieses entspricht der Energie, die durch die Solaranlage eingespart wird und setzt sich wie folgt zusammen:

$$PEA_{\text{sub}}(t) = (Q_{\text{conv,tot}} - Q_{\text{aux,tot}}) \cdot t \quad (2)$$

Dabei stellt  $Q_{\text{conv,tot}}$  den auf den Primärenergieverbrauch umgerechneten Energiebedarf dar, den ein konventionelles System zur Deckung des Warmwasserbedarfes aufweisen würde. Wird die notwendige Energie für die Nachheizung der Anlage ( $Q_{\text{aux,tot}}$ ) von diesem Wert subtrahiert, ergibt sich der Anteil, der durch den Betrieb der Solaranlage eingespart wurde.

Setzt man das eingesetzte Primärenergieäquivalent mit dem substituierten Primärenergieäquivalent gleich und löst dieses Gleichungssystem nach der Zeit auf, erhält man die Gleichung für die Berechnung der energetischen Amortisationszeit.

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

### 3 Beispielrechnung zur energetischen Amortisationszeit

Im nachfolgenden wird die Methodik zur Ermittlung der energetischen Amortisationszeit anhand einer Beispielrechnung an zwei fiktiven thermischen Solaranlagen erläutert.

Eingangsgrößen	Formelzeichen	Einheit	ANLAGE 1	ANLAGE 2
<b>EINGESETZTE PRIMÄRENERGIE</b>				
Materialien		[kWh]	2871	3896
Transport		[kWh]	51	275
Zusammenbau und Installation		[kWh]	292	417
Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung	KEA <sub>h</sub>	[kWh]	<b>3214</b>	<b>4588</b>
Kumulierter Energieaufwand für den Betrieb der Anlage	KEA <sub>b</sub>	[kWh/a]	<b>312</b>	<b>312</b>
Kumulierter Energieaufwand für die Wartung	KEA <sub>w</sub>	[kWh/a]	<b>41</b>	<b>41</b>
<b>SUBSTITUIERTE PRIMÄRENERGIE</b>				
Jährlich benötigte Brennstoffmenge	Q <sub>conv,tot</sub>	[kWh/a]	4687	4687
Nachheizwärmebedarf	Q <sub>aux,tot</sub>	[kWh/a]	2109	2109
Substituierte Primärenergie	PEA <sub>sub</sub>	[kWh/a]	<b>2578</b>	<b>2578</b>
<b>ENERGETISCHE AMORTISATIONSZEIT</b>	<b>AZ</b>	<b>[a]</b>	<b>1,4</b>	<b>2,1</b>

Tabelle 1: Berechnung der energetischen Amortisationszeit von zwei unterschiedlichen thermischen Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, unterscheiden sich die beiden Anlagen lediglich im kumulierten Energieaufwand für die Herstellung. Alle anderen Einflussgrößen auf die energetische Amortisationszeit wie der kumulierte Energieaufwand für den Betrieb der Anlage und für die Wartung, sowie die durch die Solaranlage substituierte Primärenergie sind bei beiden Anlagen gleich groß. Bei Anlage 1 mit dem geringeren kumulierten Energieaufwand für die Herstellung ergibt sich eine energetische Amortisationszeit von 1,4 Jahren. Anlage 2 hingegen, deren kumulierter Energieaufwand für die Herstellung um 43% höher liegt, benötigt 2,1 Jahre bis die eigentliche "Erntezeit" beginnt.

In nachfolgendem Kapitel wird beschrieben, wie die einzelnen Eingangsgrößen ermittelt werden.

#### 3.1 Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung KEA<sub>h</sub>

Der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung der einzelnen Komponenten berechnet sich durch Multiplikation der Gewichtsanteile der verwendeten Materialien mit den entsprechenden Primärenergieaufwandszahlen.

Tabelle 2 zeigt die Auswirkungen der Verwendung unterschiedlicher Kollektormaterialien auf den kumulierten Energieaufwand des Kollektorfeldes. Hierbei wurden bei beiden Kollektorfeldern die gleichen Gewichtsanteile der einzelnen Komponenten angesetzt. Deswegen kann der Einfluss eines Materials direkt abgelesen werden. Ausgehend von einem im Hinblick auf den KEA guten Kollektor (Anlage 1) werden einzelne Materialien des Kollektorfeldes variiert und der Einfluß der Varianten auf den KEA dargestellt.

KOLLEKTOR-FELD	ANLAGE 1					ANLAGE 2				
	Material	Einheit	Menge	KEA [kWh/ Einheit]	KEA [kWh]	Material	Einheit	Menge	KEA [kWh/ Einheit]	KEA [kWh]
Absorber	Kupfer	[kg]	16	26,83	429	Kupfer	[kg]	16	26,83	429
	Sputtern	[m <sup>2</sup> ]	5	5,30	27	Galvanische Beschichtungen (Schwarzchrom)	[m <sup>2</sup> ]	5	12,37	62
Rahmen	Glasfaserverstärkter Kunststoff	[kg]	7	29,73	208	Aluminiumprofile	[kg]	20	42,14	843
	Acrylnitril-Butadien-Styrol	[kg]	13	31,67	412					
Abdeckung	Glas	[kg]	46	3,69	170	Glas	[kg]	46	3,69	170
	Glas härten	[m <sup>2</sup> ]	5	5,50	28	Glas härten	[m <sup>2</sup> ]	5	5,50	28
Dämmung	Mineralwolle	[kg]	10	4,97	50	Mineralwolle	[kg]	5	4,97	25
						Polyurethan	[kg]	5	27,88	139
	Silikon	[kg]	1	28,19	28	Silikon	[kg]	1	28,19	28
	<b>SUMME</b>				<b>1351</b>	<b>SUMME</b>				<b>1724</b>

  

<b>MONTAGE-SET</b>	Stahlprofile hochlegiert	[kg]	16	26,82	429	Aluminium	[kg]	16	42,14	674
	<b>SUMME</b>				<b>429</b>	<b>SUMME</b>				<b>674</b>

Tabelle 2: Vergleich der für das Kollektorfeld eingesetzten Materialien und deren KEAs

Variiert wurde zum einen das Beschichtungsverfahren des Absorbers. Das Sputter-Verfahren führt zu einem kumulierten Energieaufwand von 27 kWh, wohingegen die Verwendung einer galvanischen Beschichtung mit Schwarzchrom einen kumulierten Energieaufwand von 62 kWh ergibt. Betrachtet man den energetischen Mehraufwand von 35 kWh im Zusammenhang mit dem gesamten Kollektorfeld, stellt man fest, dass durch das Sputter-Verfahren nur 2% am gesamten kumulierten Energieaufwand des Kollektorfeldes eingespart werden können.

Eine weitere Abwandlung erfolgte im Material der Rahmenkonstruktion. Diese besteht bei Anlage 1 aus einem Kunststoffverbund während bei Anlage 2 Aluminiumprofile verwendet wurden, welche zu einem beträchtlichen Mehrenergieaufwand von 223 kWh (17% bezogen auf das Kollektorfeld von Anlage 1) führen.

Oft wird nicht ausschließlich Mineralwolle als Wärmedämmung des Kollektors verwendet, sondern Polyurethan mit zusätzlicher Mineralwolleauflage am Absorber, wie dies bei Anlage 2 der Fall ist. Allein die Verwendung von Polyurethan bewirkt eine Erhöhung des kumulierten Energieaufwandes von 114 kWh (8%).

Wie in Tabelle 2 exemplarisch für das Kollektorfeld durchgeführt, wird der kumulierte Energieaufwand in dieser Weise für jede einzelne Komponente ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass beispielsweise bei einer Indachmontage die Ziegel, die durch die Indachmontage des Kollektors eingespart werden, der Solaranlage wieder gutgeschrieben werden und daher vom kumulierten Energieaufwand der Anlage in Abzug gebracht werden, wie dies bei Anlage 1 durchgeführt wurde. Das gleiche gilt für den Speicher. Durch den Einsatz der Solaranlagen reduziert sich das notwendige Speichervolumen der konventionellen Heizungsanlage. Daher wird beiden Anlagen der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung eines Warmwasserspeichers von 135 l Inhalt gutgeschrieben.

Eingangsgrößen	Einheit	ANLAGE 1	ANLAGE 2
Kollektoren	[kWh]	1351	1724
Ziegelgutschrift bei Indachmontage	[kWh]	-408	0
Montagesatz Kollektoren	[kWh]	429	674
Speicher	[kWh]	1521	1521
Speichergutschrift	[kWh]	-839	-839
Solarstation	[kWh]	507	507
Verrohrung	[kWh]	309	309
Summe Materialien	[kWh]	2871	3896
Transport	[kWh]	256	275
Transportgutschrift bei Indachmontage	[kWh]	-205	0
Summe Materialien und Transport	[kWh]	2922	4171
Zusammenbau und Installation	[kWh]	292	417
<b>KUMULIERTER ENERGIEAUFWAND FÜR DIE HERSTELLUNG KEA<sub>h</sub></b>	<b>[kWh]</b>	<b>3214</b>	<b>4588</b>

Tabelle 3: Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes für die Herstellung

Zusätzlich muss bei der Berechnung der kumulierte Energieaufwand für den Transport der Solaranlagen vom Hersteller bis zum Einbauort berücksichtigt werden. Dabei wird vereinfachend die Annahme getroffen, dass 300 km mit einem 16-Tonnen-LKW vom Hersteller bis zum Großhändler und 100 km mit einem Lieferwagen vom Großhändler bis zum Einbauort zurückgelegt werden. Der dabei ermittelte Energieaufwand steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Gesamtgewicht der Solaranlage, das mit Verpackung anzusetzen ist. Bei einer Indachmontage erfolgt auch hier für den eingesparten Transport der Ziegel eine Gutschrift. Dabei wird ein Pauschalansatz von 400 Transportkilometern in einem 16-Tonnen-LKW angesetzt, was einem eingesparten kumulierten Energieaufwand von 205 kWh entspricht.

Ebenfalls einzurechnen sind der Zusammenbau und die Installation der Anlage. Da diesbezüglich keine belastbaren Daten vorliegen und der Aufwand je nach Anlagentyp variiert, wird annähernd mit einem Pauschalansatz von 10% der Energieaufwendungen für die Herstellung inkl. Transport der Materialien gerechnet [1].

### 3.2 Der kumulierte Energieaufwand für den Betrieb KEA<sub>b</sub>

Der elektrische Energiebedarf beim Betrieb der Solaranlage setzt sich aus dem Energiebedarf der Pumpe und des Reglers zusammen. Für die Laufzeit der Pumpe werden pauschal 1500 h pro Jahr angesetzt. Der dabei erhaltene Energieaufwand wird mit dem Primärenergieäquivalent für Strom von 3,8 kWh<sub>primär</sub>/ kWh multipliziert.

BETRIEBSENERGIE	ANLAGE 1 + ANLAGE 2			
	Leistung [W]	Laufzeit [h/a]	PEA [kWh <sub>primär</sub> /kWh]	KEA [kWh/a]
Pumpe	43	1500	3,80	245
Regler	2	8760	3,80	67
<b>SUMME</b>	<b>KEA BETRIEB</b>			<b>312</b>

Tabelle 4: Leistung, Laufzeit und KEA von Pumpe und Regelung

### 3.3 Der kumulierte Energieaufwand für die Wartung KEA<sub>w</sub>

Bisherige Erfahrungen zeigen, dass der Aufwand für Wartung und Instandhaltung hauptsächlich aus allgemeinen Überprüfungsarbeiten besteht. Da diese hauptsächlich Lohnkosten verursachen, wird bei der Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes für Wartung und Instandhaltung lediglich eine Fahrt mit dem PKW mit einer Streckenlänge von 30 km (einfach) berücksichtigt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass diese Inspektion alle zwei Jahre durchgeführt wird. Diese Annahmen führen zu einem jährlichen kumulierten Energieaufwand von 41 kWh/a.

### 3.4 Die jährlich benötigte Brennstoffmenge

Die benötigte Energiemenge eines konventionellen Systems zur Trinkwassererwärmung sowie die Wärmeverluste des Speichers wurde dem europäischen Normentwurf prEN 12977-2 [2] entnommen, in welchem ein einheitliches europäisches Referenzsystem spezifiziert ist. Dabei ergibt sich für die Referenzanlage zur Warmwassererwärmung ein Gesamtwärmebedarf von 3589 kWh pro Jahr. Dieser setzt sich aus einem Warmwasserbedarf von 2945 kWh und den Wärmeverlusten des Speichers von 644 kWh zusammen. Der Energiebedarf  $Q_{conv}$  leitet sich unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der konventionellen Warmwassererwärmungsanlage  $\eta_{conv}$  ab. Hier wurde von einem Heizkessel mit durchschnittlichem Jahresnutzungsgrad der Trinkwassererwärmung von  $\eta_{conv,BW} = 0,85$  ausgegangen. Mit einem Primärenergieäquivalent für Gas von 1,11 kWh<sub>primär</sub>/ kWh ergibt sich eine jährlich benötigte Brennstoffmenge  $Q_{conv,tot}$  von 4687 kWh/a.

### 3.5 Der Nachheizwärmebedarf

Da die Solaranlage den gesamten Warmwasserwärmebedarf nicht decken kann, ist eine Nachheizung mit konventioneller Technik erforderlich. Die benötigte konventionelle Energiemenge wird unter der Annahme einer anteiligen Energieeinsparung der Anlagen von 55% ermittelt. Mithilfe des Jahresnutzungsgrades  $\eta_{conv,sol}$  wird der noch benötigte Energieaufwand  $Q_{aux}$  berechnet. Vereinfachend wird hier der Jahresnutzungsgrad des konventionellen Systems übernommen und mit  $\eta_{conv,sol} = 0,85$  gerechnet.

Bei einer anteiligen Energieeinsparung von 55% ergibt sich unter Berücksichtigung des Primärenergieäquivalentes für Gas von 1,11 kWh<sub>primär</sub>/ kWh, ein

Nachheizwärmebedarf  $Q_{\text{aux,tot}}$  von 2109 kWh/a. Beträgt die anteilige Energieeinsparung 50%, hat dies einen Nachheizwärmebedarf von 2343 kWh/a zur Folge. Wohingegen eine Erhöhung der anteiligen Energieeinsparung auf 60% zu einem Nachheizwärmebedarf von 1875 kWh/a führt. Interessant in diesem Zusammenhang ist die Auswirkung auf die energetische Amortisationszeit: variiert man bei Anlage 2 (siehe Tabelle 2) den Nachheizwärmebedarf, so verändert sich die energetische Amortisationszeit lediglich um 0,2 Jahre. Bei 50% anteiliger Energieeinsparung beträgt die energetische Amortisationszeit 2,3 Jahre, bei 60% anteiliger Energieeinsparung ergibt sich eine Reduktion von 2,1 auf 1,9 Jahre. Beachtlich ist, dass der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung der Anlage einen wesentlich größeren Einfluss auf die energetische Amortisationszeit hat, und sich durch geeignete Materialwahl sehr leicht eine Reduktion von 0,7 Jahren und mehr erzielen lässt (Tabelle 2).

#### **4 Zusammenfassung**

Die Untersuchung belegt, dass sich die energetische Amortisationszeit mit einer geeigneten Auswahl der Materialien einzelner Komponenten der Solaranlage deutlich beeinflussen lässt. Dabei können bei der betrachteten Anlagengröße durchaus Werte von 1,4 Jahren erreicht werden, die durch weitere Optimierung sogar noch gesenkt werden können. Denkbar wäre beispielsweise eine Reduktion der Betriebsenergie durch den Einsatz spezieller stromsparender Solarpumpen, die intermittierend mit kurzen Pumpenlaufzeiten betrieben werden [3].

#### **Literatur:**

- [1] VDI Berichte 1218, S. 149-163, H.-J. Wagner, F. Peuser, R. Croy, "Energie- und Emissionsbilanzen von Solaranlagen zur Wassererwärmung", 1995
- [2] prEN 12977-2: "Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 2: Prüfverfahren", 1997
- [3] BINE projektinfo 13/01, "Stromsparende Pumpen für Heizungen und Solaranlagen", 2001

englischer Titel:

### **Method to determine the Energy Payback Period of Domestic Solar Hot Water Systems**