



Energetische Amortisationszeit und Umweltverträglichkeit, Teil 1

Umwelteigenschaften von thermischen Solaranlagen

Für den Vergleich von Solaranlagen gibt es mehrere Kriterien wie z. B. thermische Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Handhabung etc. Ein wichtiger Aspekt sind aber auch die Umwelteigenschaften der Solaranlage, denn gerade bei einer umweltfreundlichen Technologie sollten energetische Amortisationszeit und Umweltverträglichkeit berücksichtigt werden. In einer zweiteiligen Artikelserie wird erläutert, wie die Umwelteigenschaften von thermischen Solaranlagen beurteilt werden können. Im Mittelpunkt des ersten Teils steht die energetische Amortisation.

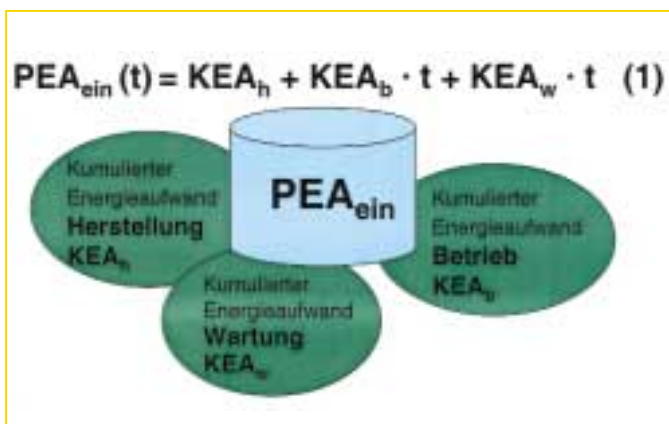
Zwei Gesichtspunkte werden näher betrachtet: die energetische Amortisationszeit und die Umweltverträglichkeit der Solaranlage. Zunächst wird die Methodik zur Bestimmung der energetischen Amortisationszeit von solaren Kombianlagen dargestellt. Dabei wird insbesondere auf die Besonderheiten eingegangen, die sich durch unterschiedliche Anlagenkonzepte bei der Realisierung solarer Heizungsunterstützung ergeben. Weiterhin werden Bewertungsansätze für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Solaranlagen vorgestellt. Dazu wird neben der Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien auch auf Verpackung, Recycling und Entsorgungskonzepte eingegangen.

Bestimmung 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 der Solaranlage aufgewendet wurde. Sie ergibt sich durch Ermittlung der eingesetzten Primärenergie, welche anschließend der Energie gegenübergestellt wird, die durch die Solaranlage eingespart wird (substituierte Primärenergie). Die eingesetzte Primärenergie ergibt sich durch Ermittlung des eingesetzten Primärenergieäquivalentes (PEA_{ein}), das 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) zusammensetzt (Bild 1).

Der Energieaufwand für die Herstellung der Anlage stellt eine einmalig auftretende Größe dar. Im Gegensatz dazu ist der kumulierte Energieaufwand für den Betrieb und die Wartung der Anlage von der Zeit (t) abhängig, während der die Anlage genutzt wird (Gleichung 1). Dem eingesetz-



◀ Bild 1 Einflußfaktoren auf das eingesetzte Primärenergieäquivalent

ten Primärenergieäquivalent wird ein substituiertes Primärenergieäquivalent (PEA_{sub}) gegenübergestellt. Dieses entspricht der Energie, die durch die Solaranlage eingespart wird und setzt sich wie in Bild 2 dargestellt zusammen.

Dabei stellt $Q_{\text{conv,tot}}$ den auf den Primärenergieverbrauch umgerechneten Energiebedarf dar, der bei einem konventionellen System zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs (Trinkwasser und Heizung) aufgewendet werden müßte. Wird die notwendige Energie für die Nachheizung der Kombianlage ($Q_{\text{aux,tot}}$) von diesem Wert subtrahiert, so ergibt sich der Anteil, der durch die Solaranlage eingespart wird (Bild 2). Setzt man das eingesetzte Primärenergieäquivalent mit dem substituierten Primärenergieäquivalent gleich (Gleichung 3) und löst dieses Gleichungssystem nach der Zeit auf, erhält man die Gleichung für die Berechnung der energetischen Amortisationszeit (Gleichung 4).

$$PEA_{\text{ein}}(t) = PEA_{\text{sub}}(t) \quad (3)$$

$$t = AZ = \frac{KEA_h}{Q_{\text{conv,tot}} - Q_{\text{aux,tot}} - KEA_b - KEA_w} \quad (4)$$

Die Methodik zur Ermittlung der energetischen Amortisationszeit ist in Bild 3 dargestellt. Ab einer bestimmten Zeit schneidet das substituierte Primärenergieäquivalent ($PEA_{\text{sub}}(t)$) die Gerade, die den eingesetzten Primärenergiebedarf ($PEA_{\text{ein}}(t)$) darstellt. Das heißt, ab dieser Zeit (energetische Amortisationszeit) ist die durch die Solaranlage gewonnene Energie größer als das eingesetzte Primärenergieäquivalent und es beginnt die eigentliche „Erntezeit“. Im folgenden werden die einzelnen Einflußgrößen auf die energetische Amortisationszeit (kumulierter Energieaufwand zur Herstellung, Wartung und Betrieb der Solaranlage) näher erläutert und deren Er-

Bild 2 Einflußfaktoren auf das substituierte Primärenergieäquivalent

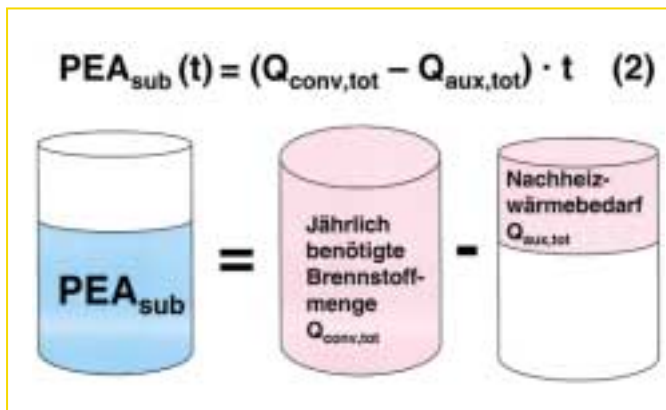
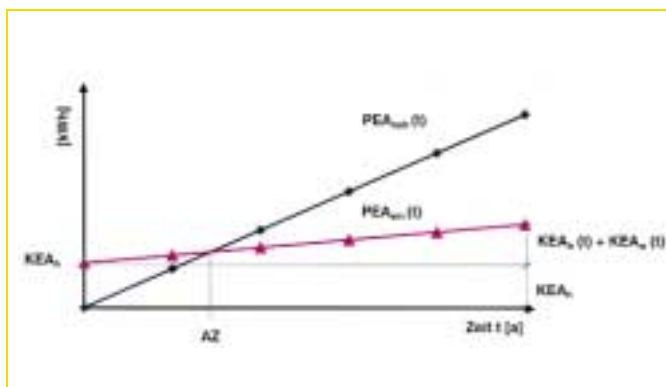


Bild 3 Graphische Ermittlung der energetischen Amortisationszeit



mittlung anhand von Beispielen veranschaulicht. Im Anschluß daran wird für eine konventionelle (nicht solare) Anlage die Bestimmung des jährlichen Nachheizwärmebedarfes sowie der entsprechenden benötigten Brennstoffmenge aufgezeigt.

Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung

Der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung KEA_h setzt sich aus dem Energieaufwand zur Herstellung der Anlagenkomponenten sowie der für den Zusammenbau, den Transport und die Installation benötigten Energie zusammen.

Materialien zur Herstellung der Anlagenkomponenten

Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes erfolgt mit Hilfe von Primärenergieaufwandszahlen, die bestimmten Datenbanken entnommen werden können. Eine in der Solartechnik häufig verwendete, sehr ausführliche Datenbank stellen die Ökoinventare für Energiesysteme aus der

Schweiz dar. Diese Datenbank beinhaltet nahezu alle Materialien und Herstellungsverfahren, die bei thermischen Solaranlagen zur Anwendung kommen. Im Rahmen des Projektes Ecoinvent 2000 findet derzeit eine weitere Überarbeitung und Aktualisierung der Daten statt. Die Primärenergieaufwandszahlen beinhalten den gesamten energetischen Aufwand für die Herstellung der Güter von der Stoffgewinnung über die Rohstoff- und Halbzeugherstellung bis zur Produktfertigung. Weiterhin umfassen sie den Energieaufwand während der Nutzung sowie den Energieaufwand für die Beseitigung, Wiederverwendung oder Rückführung des gebrauchten Produkts bzw. seiner Stoffkomponenten in neue Materialkreisläufe. Wie bei der Berechnung des KEA vorzugehen ist, gibt die VDI-Richtlinie 4600 an. In Tabelle 1 sind auszugsweise einige Primärenergieaufwandszahlen aus der Schweizer Datenbank „Ökoinventare für Energiesysteme“ aufgeführt. Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung der Solaranlage läßt sich durch eine Unterteilung der Anlage in die einzelnen

	Einheit	KEA in kWh/ Einheit
Stahl unlegiert	kg	8,46
Stahlblech verzinkt	kg	16,11
Steinwolle	kg	4,85
Glas härten	m ²	5,50
Transport Lkw 16 t	tkm	1,53

▲ **Tabelle 1** Beispiele aus der Schweizer Datenbank „Ökoinventare für Energiesysteme“

Tabelle 2 Beispiel zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes für das Kollektorfeld

Kollektorfeld	Material	Einheit	Menge	KEA (kWh/ Einheit)	KEA (kWh)
Absorber	Kupfer	kg	33	26,83	885
	Sputtern	m ²	10	5,30	53
Rahmen	Aluminium	kg	45	42,14	1896
Abdeckung	Glas	kg	91	3,69	336
	Glas härten	m ²	10	5,50	55
Dämmung	Mineralwolle	kg	14	4,97	70
	Silikon	kg	5	28,19	141
Summe					3436

Komponenten (Kollektorfeld, Montageset des Kollektors, Speicher, Solarstation und Verrohrung) und deren jeweils verwendeter Hauptbestandteile ermitteln. Die einzelnen Komponenten werden nach ihren Materialien untersucht und abgewogen. So gehört z. B. zur Solarstation der Regler mit seinem Kunststoffgehäuse und den elektronischen Platinen, die Wärmedämmschale, Pumpe, Verrohrungen, Thermostate etc. Tabelle 2 zeigt beispielhaft eine Aufstellung der Materialien mit Gewichtsangabe für ein Kollektorfeld. Der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung der einzelnen Komponenten berechnet sich durch Multiplikation der Gewichtsanteile der verwendeten Materialien mit den entsprechenden Primärenergieaufwandszahlen.

Gutschriften für einzelne Anlagenbestandteile

Nicht alle Bestandteile der Anlage sind jedoch ausschließlich der Solaranlage zuzurechnen, da sie in einer konventionellen Anlage ebenfalls vorhanden sind. Für einen objektiven Vergleich dürfen sie daher bei der Ermittlung des kumulierten Energieaufwands von Solaranlagen nicht berücksichtigt werden. Dies erfolgt über spezielle Gutschriften, die im Folgenden näher beschrieben werden.

● Trinkwasserspeichergutschrift

Ein Trinkwasserspeicher wäre auch Bestandteil einer „konventionellen“ (nicht solaren) Wärmeversorgungsanlage. Der kumulierte Energieaufwand des Trinkwasserspeichers einer konventionellen Anlage wird der Solaranlage wieder gutgeschrieben, da die Funktionen des konventionellen Trinkwasserspeichers nun von der Solaranlage erfüllt werden und ein separater



Bild 4 Indachmontage eines Flachkollektors

deten Montagesets berücksichtigt, sondern – analog zur oben erläuterten Trinkwasserspeichergutschrift – auch die Materialien, die durch Montage eines Sonnenkollektors entfallen. Bei einer Indachmontage werden die Kollektoren ähnlich wie bei einem Dachfenster in das Dach integriert und direkt auf den Dachsparren befestigt. Dadurch werden erhebliche Mengen an Dachziegel eingespart, die der Solaranlage gutgeschrieben werden müssen. So ersetzen z. B. (je nach Ziegelart) 10 m² Kollektorfläche 196 Ziegel mit einem Gewicht von je 3,4 kg. Diese Materialeinsparung führt zu einer Gutschrift von 816 kWh. Der Transport spielt dabei ebenfalls

Speicher nun nicht mehr nötig ist. Daher wird jeder Kombianlage der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung eines Warmwasserspeichers von 135 Liter Inhalt gutgeschrieben. Diese sogenannte „Trinkwasserspeichergutschrift“ wird mit 86 kg Stahl unlegiert und 4 kg PU-Hartschaumdämmung angesetzt und beläuft sich somit auf 839 kWh.

● Ziegelgutschrift

Auch unterschiedliche Montagearten gehen in die Berechnung mit ein. Hierbei wird nicht nur der Materialeinsatz des verwen-

eine wesentliche Rolle: Geht man – ähnlich wie bei der Solaranlage – davon aus, daß die durch Indachmontage eingesparten Dachziegel durchschnittlich vom Herstellungs- bis zum Einbauort 400 km mit einem 16-t-Lkw transportiert werden, ergibt sich mit ihrem Gesamtgewicht von 666 kg eine zusätzliche Gutschrift für den Transport von 408 kWh.

● Heizkesselgutschrift

Um einen Vergleich der Kombianlagen mit integrierter Wärmequelle mit Kombianlagen ohne integrierter Wärmequelle, also

mit einem separaten Heizkessel, zu ermöglichen, werden sogenannte standardisierte Komponenten definiert, die den entsprechenden Anlagen wieder gutgeschrieben werden können. Dabei wird von Durchschnittswerten für die einzelnen Komponenten ausgegangen, die nachfolgend genauer erläutert sind.

● **Heizkreisstation**

Die Referenz-Heizkreisstation besteht aus einem 3-Wege-Ventil, einem Mischer, einer Pumpe, 3 m Cu-Rohr mit Wärmedämmung und einem Ausdehnungsgefäß für den Heizkreis mit 35 Liter Inhalt. Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung dieser Referenz-Heizkreisstation ergibt sich zu 247 kWh.

● **Heizungsregler**

Als Referenz-Regler wird ein Heizkreisregler mit 1,0 kg mit Temperaturfühlern von 0,25 kg definiert. Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung dieses Reglers beträgt 89 kWh.

● **Heizkessel**

Als Referenz-Heizkessel wird ein Niederdruckkessel für Öl/Gas mit einem Gewicht von 45 kg angesetzt. Der Kessel besteht aus den Materialien Stahl unlegiert, Edelstahl, Aluminium, Kupfer und Polypropylen. Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung dieses Kessels beträgt 972 kWh.

Gesamtanlage	Anlagenkomponente	ohne integrierte Wärmequelle KEA (kWh)	mit integrierter Wärmequelle KEA (kWh)
Kollektor	Kollektoren	3436	3436
	Montagesatz	902	902
Speicher	Speicher	2473	2624
	Speichergutschrift	-839	-839
	Kesselgutschrift	0	-1308
Solarstation	Solarstation	825	1089
Verrohrung	Verrohrung	309	309
	Materialien	7106	6213

Tabelle 3 Beispiel zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes der eingesetzten Materialien an einer Kombianlage mit und ohne integrierter Wärmequelle

Wie Tabelle 3 exemplarisch zeigt wird demnach einer Kombianlage mit integrierter Wärmequelle die Kesselgutschrift von 1308 kWh gutgeschrieben, die sich aus dem kumulierten Energieaufwand für Heizkreisstation, Heizungsregler und Heizkessel ergibt. Demzufolge ist nun der kumulierte Energieaufwand für Kombianlagen mit und ohne integrierter Wärmequelle miteinander vergleichbar.

Bilanzierungsgrenzen

Im Hinblick auf die unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten solarer Heizungsunterstützung muß genau spezifiziert werden, welche Bauteile einer Heizungsanlage bereits Bestandteil der solaren Kombianlage sind. Es werden daher Bilanzierungsgrenzen definiert, die einen Vergleich verschiedener Kombianlagen ermöglichen. Auf dem deutschen Solarmarkt gibt es eine

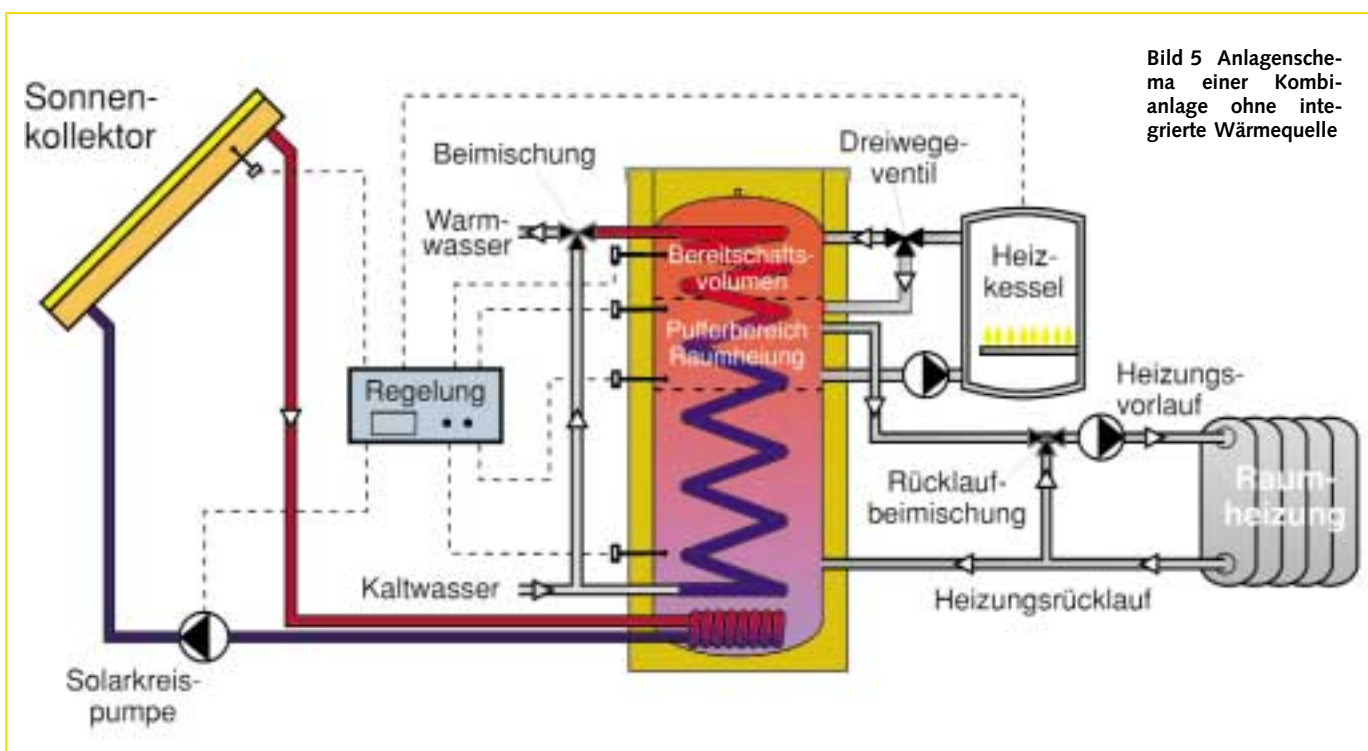


Bild 5 Anlagenschema einer Kombianlage ohne integrierte Wärmequelle

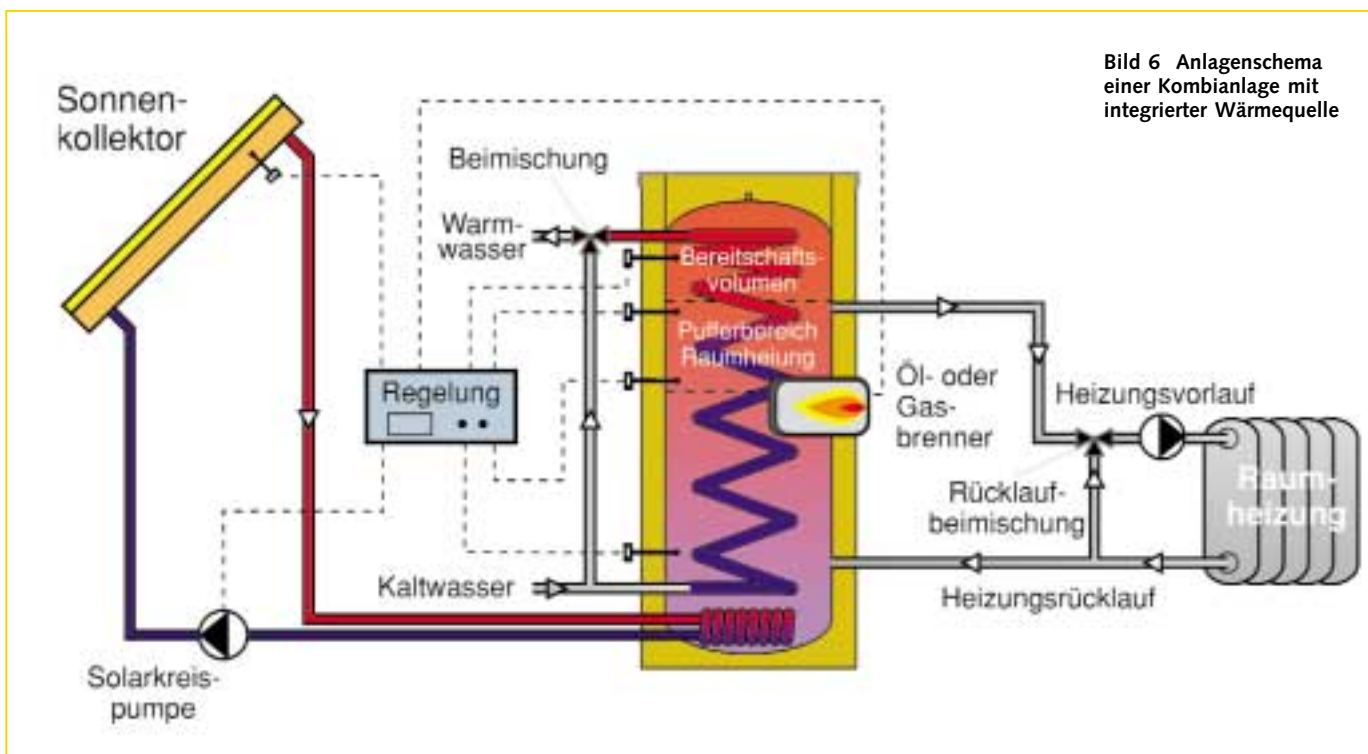


Bild 6 Anlagenschema einer Kombianlage mit integrierter Wärmequelle

Vielzahl unterschiedlicher Anlagenkonzepte für solare Kombianlagen. Alle diese Anlagenkonzepte führen zum gleichen Ziel, doch unterscheiden sie sich im Materialaufwand zur Herstellung. Für die Ermittlung der energetischen Amortisationszeit der jeweiligen Kombianlage wird nur der eigentliche Solarteil betrachtet. Heizkreis und Warmwasserkreis sind bei konventionellen Anlagen ebenso notwendig und fallen somit nicht als rein „solarspezifische Komponente“ mit in die Berücksichtigung des Primärenergieaufwandes der Solaranlage. Im folgenden wird erläutert, wie die Bilanzierungsgrenzen bei den einzelnen Anlagentypen gezogen werden, um einen Vergleich aller Kombianlagen untereinander möglich zu machen. Hierbei wird zwischen Kombianlagen ohne integrierte Wärmequelle und Kombianlagen mit integrierter Wärmequelle unterschieden.

● Solare Kombianlagen ohne integrierte Wärmequelle

Bei solaren Kombianlagen ohne integrierte Wärmequelle, also mit einem separaten Heizkessel, wird die Bilanzierungsgrenze direkt am Speicher gezogen. Der Nachheizkreis mit Kessel sowie der Heizkreis mit Heizkreisstation wird bei den Berechnungen nicht berücksichtigt, da diese Komponenten bei einer „konventionellen“ Heizungsanlage ebenfalls vorhanden sind und somit keine rein solarspezifischen Bauteile

darstellen. Das gleiche gilt für den Trinkwasserkreis. Teile außerhalb dieser Bilanzierungsgrenze (wie z. B. eine Heizkreisstation), werden nicht mitbilanziert. In Bild 5 sind diese Bauteile grau ausgefüllt.

● Solare Kombianlagen mit integrierter Wärmequelle

Bei diesem Anlagentyp sind der Kessel und die Nachheizung im Speicher integriert. Deshalb ist es bei Kombianlagen mit integrierter Wärmequelle nötig, die Bilanzierungsgrenze zu erweitern. Die Grenze verläuft zwar ebenfalls direkt am Speicher, die Bilanzierung umfaßt allerdings die integrierte Wärmequelle und die Heizkreisstation.

● Trinkwasser- und Heizkreis

Trinkwasser- und Heizkreis selbst werden nicht in Betracht gezogen, da es sich hier um Komponenten handelt, die bei einer „konventionellen“ Heizungsanlage ebenfalls vorhanden sind. Abgasrohrsysteme werden in der Bilanzierung nicht berücksichtigt, da sie außerhalb der Bilanzierungsgrenze liegen.

Kumulierter Energieaufwand für Transport

Bei der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes für die Herstellung muß auch der Transport der Solaranlage vom Hersteller bis zum Einbauort berücksichtigt

werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Solaranlage 300 km mit einem 16-t-Lkw vom Hersteller bis zum Großhändler transportiert wird. Der Transportschritt vom Großhändler zum Einbauort wird mit 100 km in einem Lieferwagen angesetzt. Die primärenergetischen Aufwandszahlen sind ebenfalls den Ökoinventaren für Energiesysteme zu entnehmen. Bei einem durchschnittlichen Gewicht einer Kombianlage von 550 kg ergibt sich der kumulierte Energieaufwand für den Transport zu 639 kWh.

Kumulierter Energieaufwand für Montage

Bei derartigen technischen Anlagen für den Gebäudebereich gehen Zusammenbau und Installation der Anlage im allgemeinen mit einem Pauschalansatz von 10 % der Energieaufwendungen für die Herstellung der Materialien mit in die Berechnung ein [1].

Kumulierter Energieaufwand für den Betrieb

Der kumulierte Energieaufwand für den Betrieb bezieht sich ausschließlich auf den „solaren“ Teil der Kombianlage. Gemäß den definierten Bilanzierungsgrenzen beinhaltet den Stromverbrauch für die Solarkreispumpe(n), für die Regelung, für die Fremdstromanode (soweit vorhanden) so-

wie einer evtl. zur Trinkwassererwärmung benötigten Pumpe. Der Stromverbrauch von Heizkreispumpen und Heizungsregelungen wird nicht bilanziert.

Die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe und des Reglers wird mit den entsprechenden Laufzeiten multipliziert. Der dabei erhaltene Energieaufwand wird mit dem Primärenergieäquivalent für Strom multipliziert (siehe Tabelle 5). Für die Laufzeiten der Pumpe wird die Zeit angesetzt, die aus den Ertragsberechnungen für die gegebenen Referenzbedingungen ermittelt wurde. Bei Pumpen, deren Leistung bzw. Drehzahl geregelt wird, werden hierfür die Laufzeiten für den Betrieb mit Nennleistung verwendet. Da der Regler das ganze Jahr über in Betrieb ist, wird dessen Betriebszeit mit 8760 h pro Jahr berücksichtigt. Bei manchen Kombianlagen ist die Regelfunktion für die Solarkreispumpe in der Regelung der Gesamtanlage integriert. Für den kumulierten Energieaufwand darf hier nur der Teil des auf die Solarkreisregelung entfallenden Stromverbrauchs berücksichtigt werden. In diesem Fall wird vom jährlichen Stromverbrauch des (Gesamt-) Reglers ein Wert von 26 kWh subtrahiert. Dieser Wert von 26 kWh entspricht dem jährlichen Stromverbrauch der Heizungsregelung der Referenzanlage (siehe Gutschriften).

Kumulierter Energieaufwand für die Wartung

Bisherige Erfahrungen zeigen, daß der Aufwand für Wartung und Instandhaltung hauptsächlich aus allgemeinen Überprüfungsarbeiten besteht. Dabei handelt es sich um Routinekontrollen wie Prüfung der Konzentration der Solarflüssigkeit, Kontrolle der Dichtigkeit der Anlage, Überprüfung des Vordruckes des Ausdehnungsgefäßes, Kontrolle des Betriebsdrucks, Kontrolle der Korrosionsschutzanode etc. Ein Austausch einzelner Komponenten ist in der Regel nicht erforderlich. Da diese Überprüfungsarbeiten 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 jährlich durchgeführt wird. Der kumulierte Energieaufwand für Wartung und Instandhaltung ergibt sich so zu 83 kWh/Jahr.

Im zweiten Artikelteil in SBZ 8 schreiben unsere Autoren Elke Streicher und Harald Drück, Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen, Stuttgart, Telefon (07 11) 6 85-35 36, Telefax (07 11) 6 85-35 03, über die Themen Primärenergie, energetische Amortisationszeit und Bewertung unter Umweltverträglichkeitsaspekten.

Transport	Transport-kilometer (km)	KEA (kWh/tkm)	Gewicht der Kombianlage (kg)	KEA (kWh)
16-t-Lkw	300	1,53	550	252
Lieferwagen	100	7,03	550	387
Summe Transport				639

Tabelle 4 Beispiel zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes für den Transport

Betriebsenergie	Leistung (W)	Laufzeit (h/a)	PEA (kWh _{prim} /kWh)	KEA (kWh/a)
Pumpe	57	1230	3,80	266
Regler	3	8760	3,80	100
Summe	KEA Betrieb			366

Tabelle 5 Beispiel zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes für den Betrieb