

# Grundlagen thermischer Solarenergienutzung

S. Fischer, H. Drück, Th. Pauschinger

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)

Prof. Dr.-Ing. E. Hahne

Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

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

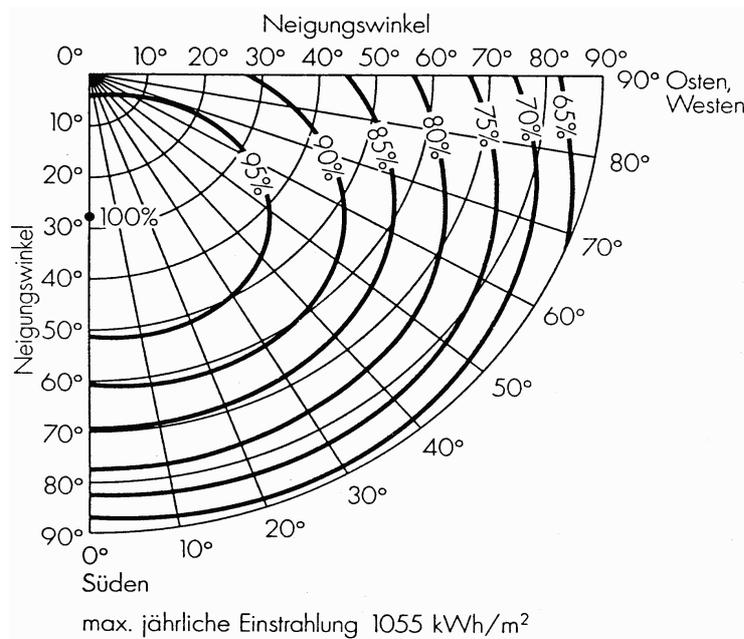
## Einleitung

In Deutschland werden derzeit jährlich ca. 300 000 m<sup>2</sup> Sonnenkollektoren installiert. Der Großteil entfällt auf den Ein- und Mehrfamilienhausbereich. Die Hauptanwendungsgebiete sind dabei die Warmwasserbereitung und die Raumheizung sowie die Erwärmung von Schwimmbadwasser. Der Markt bietet technisch ausgereifte und bewährte Anlagentechnik für alle drei Anwendungsfälle. In den nachfolgenden Abschnitten werden Grundlagen und Funktionsweise diskutiert und die mit thermischen Solaranlagen mögliche Energieeinsparung sowie die damit verbundenen Kosten aufgezeigt.

## Solarenergieangebot

Die Strahlungsleistung der Sonne an der obersten Schicht der Erdatmosphäre beträgt im Mittel 1367 W/m<sup>2</sup> und wird Solarkonstante genannt. Bei klarem Himmel kommen davon ca. 1000 W/m<sup>2</sup> auf der Erdoberfläche an. Bei vollständig bewölktem Himmel nimmt die Strahlungsleistung bis auf 100 W/m<sup>2</sup> ab.

Für die solartechnische Nutzung ist die über ein ganzes Jahr verfügbare Strahlungssumme von Bedeutung. In Deutschland variiert die Globalstrahlungssumme um ca. 20 % zwischen ca. 950 und 1200 kWh/(m<sup>2</sup> a).



**Bild 1:** Einfluß des Anstellwinkels und der Himmelsrichtung einer Empfangsfläche auf die relative Jahressumme der Globalstrahlung

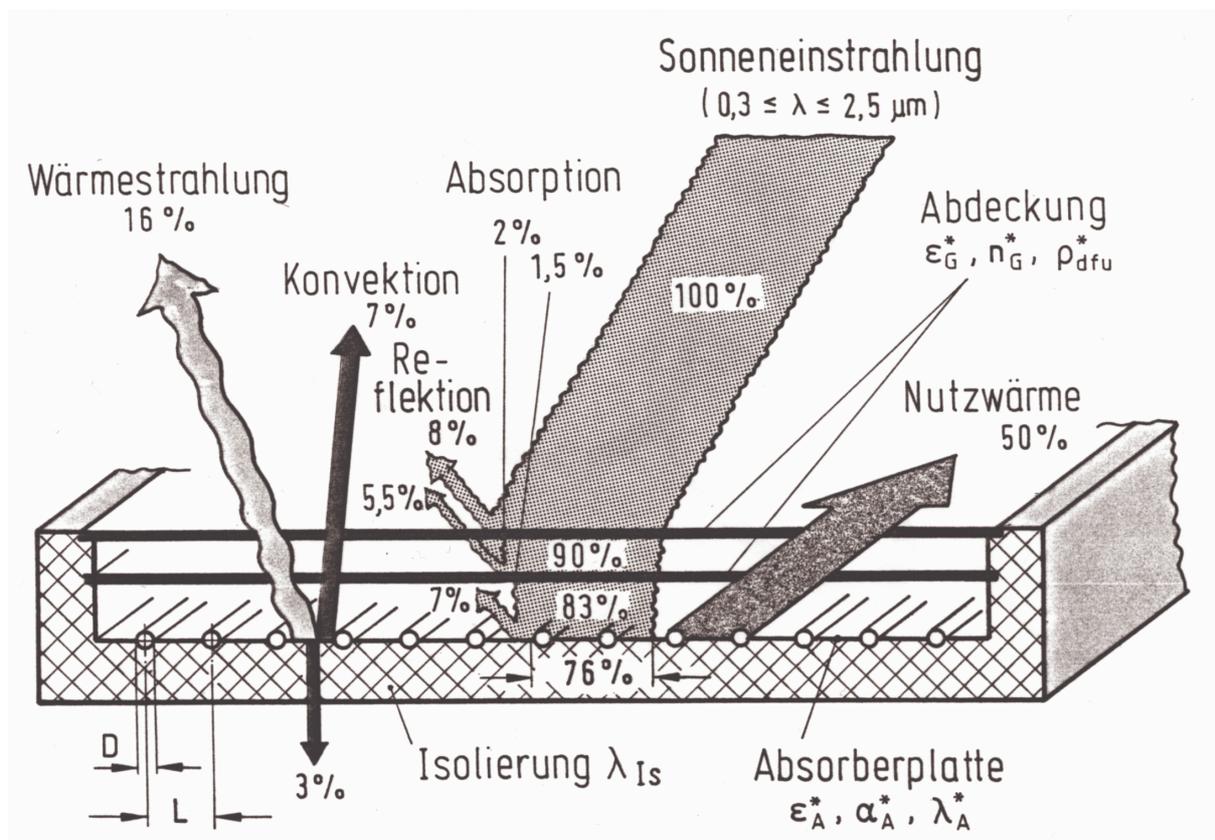
Die Maximalwerte werden auf der Ostalb und am Oberrhein erzielt. Etwa 75 % der eingestrahlenen Energiemenge entfällt auf die Sommermonate von April bis September.

Die Globalstrahlung besteht aus der direkten Strahlung, die unmittelbar aus der Richtung der Sonne kommt, und der diffusen Strahlung, die nach ein- oder mehrfacher Ablenkung aus allen Himmelsrichtungen einfällt. Der Anteil der diffusen Strahlung beträgt in unseren Breiten ca. 50 % der im Jahr einfallenden Strahlung.

Die Strahlungssumme auf eine Fläche hängt wesentlich von deren Ausrichtung ab (Anstellwinkel gegen die Horizontale und Himmelsrichtung). Die maximale Strahlungssumme ergibt sich auf eine nach Süden orientierte Fläche mit einem Anstellwinkel von ca. 30°. Bild 1 gibt Anhaltswerte für die relative Änderung der eingestrahlichten Sonnenenergie bei Abweichungen von der optimalen Orientierung. Bei einer 40° angestellten Fläche mit Süd-Ost- oder Süd-West-Orientierung beträgt die Minderung der Globalstrahlung im Jahresmittel weniger als 5%. Bei nach Osten oder Westen orientierten Flächen ist ein flacher Neigungswinkel günstig.

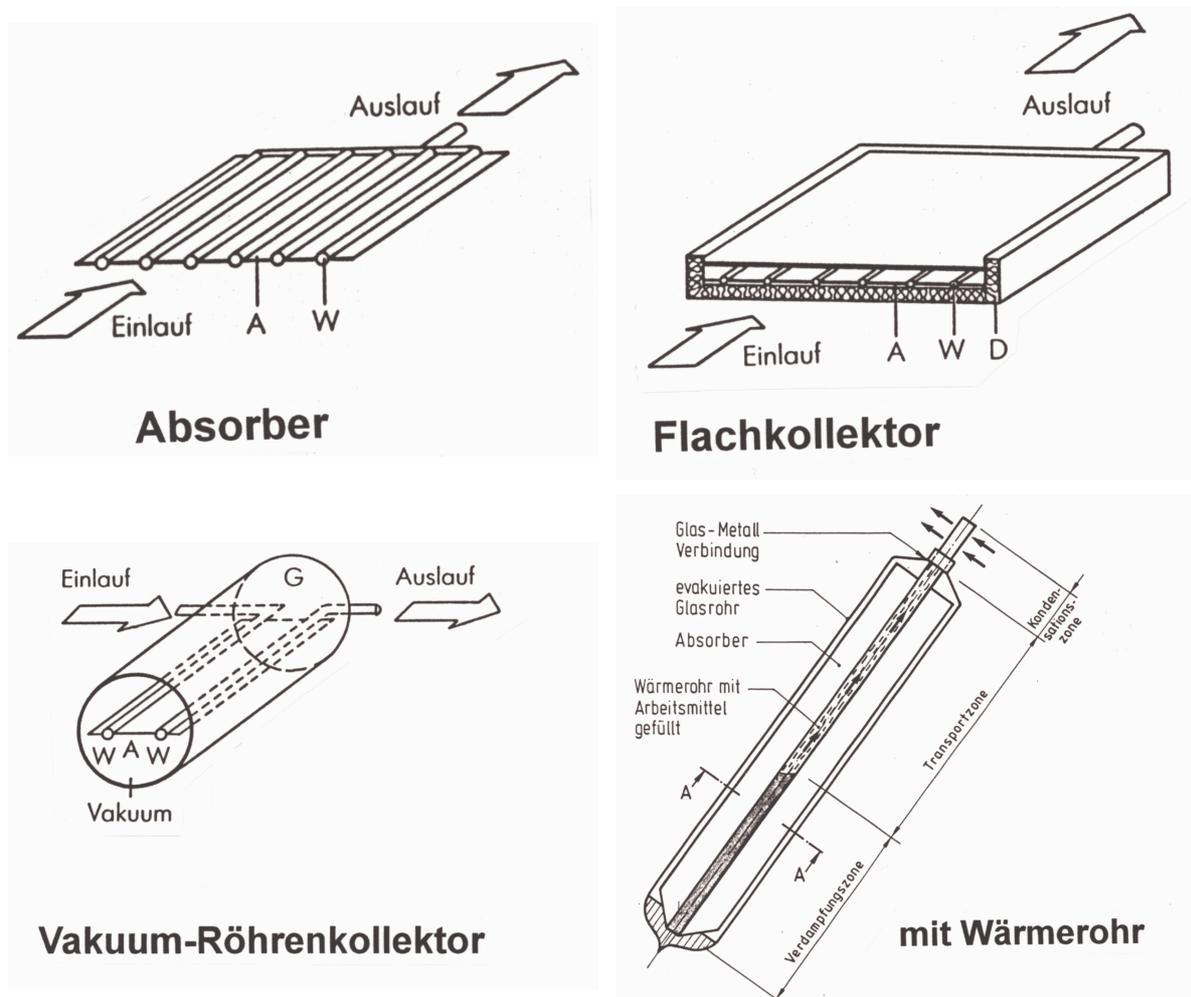
### Sonnenkollektoren

Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Wärmetransportvorgänge eines Flachkollektors. Die wichtigste Komponente ist der Absorber mit einer für Solarstrahlung möglichst vollständig absorbierenden Oberfläche. Durch einen guten thermischen Kontakt zwischen Absorber und einem durchströmenden Wärmeträgermedium (z.B. Wasser, Glykologemisch oder Luft) wird die bei der Absorption entstehende Wärme an dieses abgegeben und aus dem Kollektor als Nutzwärme abgeführt. Zur Reduzierung von Wärmeverlusten und zur Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades wird der Absorber vorne mit einer oder mehreren transparenten Abdeckungen versehen und nach der Seite und nach hinten wärmedämmend. Bild 3 zeigt verschiedene Bauformen von flüssigkeitsgekühlten Flachkollektoren.



**Bild 2:** Prinzipieller Aufbau eines Flachkollektors und photothermische Wandlung

Die Absorber bestehen meist aus gut wärmeleitenden Metallen (z.B. Kupfer, Aluminium) oder aus Kunststoffen (z. B. PP = Polypropylen, EPDM = Kunstkautschuk). Letztere werden bei der Schwimmbadbeheizung eingesetzt, da dort die geforderten Temperaturen relativ niedrig sind und ein erhöhter Korrosionsschutz erforderlich ist. Der Absorber sollte die Solarstrahlung (Wellenlängen  $\lambda$  von 0,3 bis ca. 3  $\mu\text{m}$ ) möglichst vollständig in Wärme umwandeln und deshalb einen hohen Absorptionsgrad  $\alpha$  haben. Heute werden in fast allen Kollektoren Absorber mit sogenannten *selektiven Schichten* eingesetzt, die im Wellenlängenbereich der Solarstrahlung einen hohen Absorptionsgrad ( $\alpha \approx 0,95$ ) aufweisen und gleichzeitig, aufgrund eines niedrigen Emissionsgrads ( $\varepsilon \approx 0,1$ ) im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung, nur wenig Energie abstrahlen. Selektive Schichten werden meist galvanisch (Schwarzchrom, nickelpigmentiertes Aluminium) oder durch Aufbringen im Vakuum (z.B. Tinox- oder Cermet-Schicht) hergestellt.



**Bild 3:** Bauformen von flüssigkeitsgekühlten Flachkollektoren (A - Absorber, G - Glasröhre, D - Wärmedämmung, W - Wärmeträger)

Die mit einem Kollektor gewinnbare Wärme wird durch den Wirkungsgrad  $\eta$  beschrieben. Er ist definiert als das Verhältnis der vom Kollektor abgegebenen Nutzwärmeenergie zur auf den Kollektor einfallenden Strahlungsenergie. Unter stationären Bedingungen lässt sich aus der Wärmebilanz am Kollektor die folgende Wirkungsgradgleichung herleiten.

$$\eta = F' \cdot (\tau_G \alpha_A) - F' \cdot k_{\text{eff},m} \cdot (\vartheta_{\text{fl},m} - \vartheta_{\text{amb}}) / E_{\text{glob},K}$$

$$\eta = \eta_0 - F' \cdot k_{\text{eff},m} \cdot \Omega'$$

mit

$F'$	Kollektorwirkungsgradfaktor [-]
$(\tau_G \alpha_A)$	Transmission-Absorptionsprodukt oder optischer Koll.-wirkungsgrad [-]
$k_{\text{eff},m}$	Mittlerer Gesamtwärmedurchgangskoeffizient des Kollektors [W/(m <sup>2</sup> K)]
$\vartheta_{\text{fl},m}$	Mittelwert aus Kollektorein- und -austrittstemperatur [° C]
$\vartheta_{\text{amb}}$	Umgebungslufttemperatur [° C]
$E_{\text{glob},K}$	Globalstrahlung in Kollektorebene [W/m <sup>2</sup> ]
$\eta_0$	Konversionsfaktor = $F' (\tau_G \alpha_A)$ [-]
$\Omega'$	Betriebsparameter = $(\vartheta_{\text{fl},m} - \vartheta_{\text{amb}}) / E_{\text{glob},K}$ [(m <sup>2</sup> K)/W]

Die Auftragung des Kollektorwirkungsgrades erfolgt über dem Betriebsparameter  $\Omega'$ . Er wird aus dem Quotienten einer Referenztemperatur (z.B.  $\vartheta_{\text{fl},m}$ ) minus Umgebungstemperatur zur Globalstrahlung in Kollektorebene gebildet.

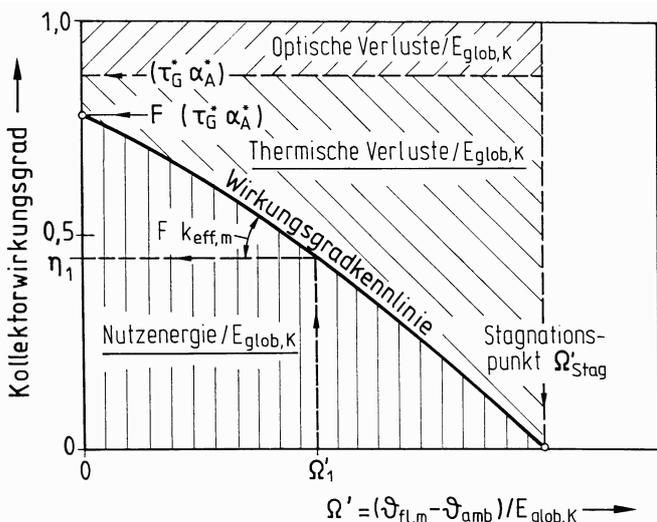
Bild 4 zeigt den typischen Verlauf der **Wirkungsgradkennlinie** eines Flachkollektors. Für niedrige Eintrittstemperaturen - dies ist links im Diagramm zu sehen - ergeben sich hohe Wirkungsgrade. Mit steigender Eintrittstemperatur nimmt der Wirkungsgrad ab, bis zum Stagnationspunkt (Schnittpunkt der Kennlinie mit der x-Achse), wo der Kollektor keine Nutzenergie mehr liefert.

Die thermische Leistungsfähigkeit von Kollektoren wird durch folgende Parameter gekennzeichnet: Der **Konversionsfaktor**  $\eta_0$  ('eta-Null') wird im wesentlichen vom Transmissionsgrad der Abdeckung und dem Absorptionsgrad des Absorbers bestimmt. Er ist als Ordinatenabschnitt im Wirkungsgraddiagramm direkt ablesbar.

Der **mittlere Gesamtwärmedurchgangskoeffizient**  $k_{\text{eff},m}$  ('k-Wert') des Kollektors steht für die Summe aller Wärmeverlustströme bezogen auf eine Referenzfläche und auf die Temperaturdifferenz zwischen Referenz- und Umgebungstemperatur. Die Steigung der Wirkungsgradkennlinie ist proportional zum k-Wert.

Die Krümmung der Wirkungsgradkennlinie (vgl. Bild 4) entsteht durch die überproportional mit der Temperatur zunehmenden Strahlungsverluste. Für den k-Wert wird deshalb folgender Ansatz gewählt:

$$k_{\text{eff},m} = k_1 + k_2 (\vartheta_{\text{fl},m} - \vartheta_{\text{amb}})$$

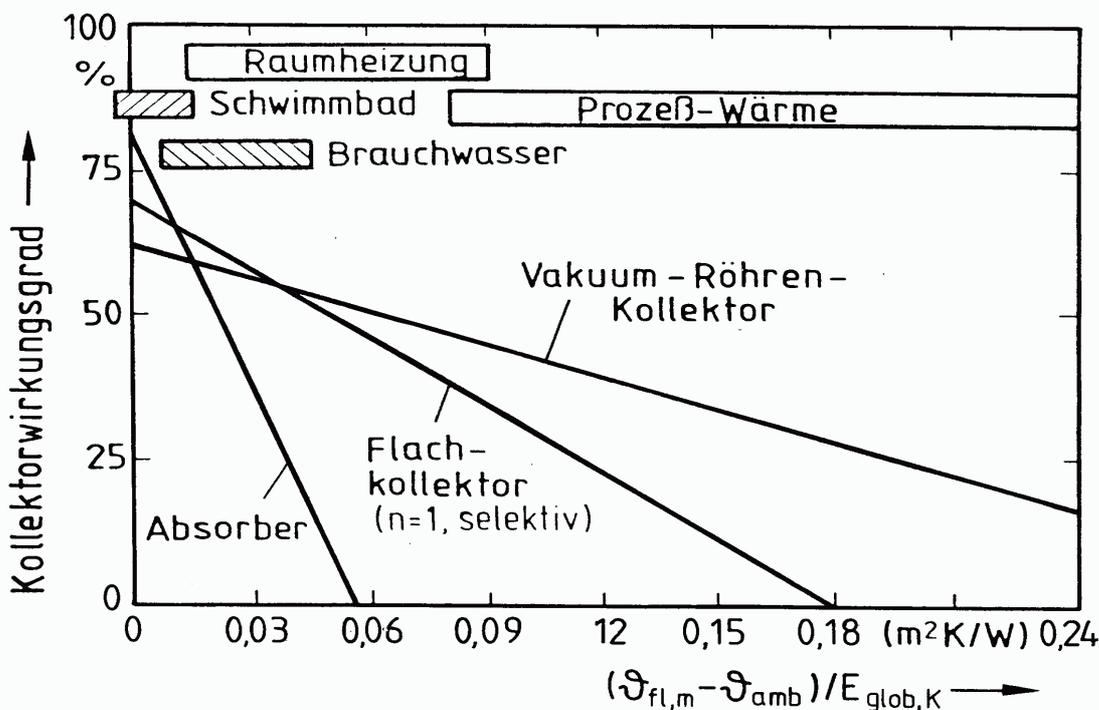


**Bild 4:** Kollektor-Wirkungsgradkennlinie

Wirkungsgraddiagramm. Die Bereiche der Brauchwassererwärmung, Raumheizung und Prozeßwärmeerzeugung (bis 150 °C) sind ebenfalls dargestellt.

Wenn man die Wirkungsgradkennlinien der genannten drei Kolleortypen innerhalb der verschiedenen Anwendungsbereiche vergleicht, erkennt man, welcher Typ zu wählen ist, um einen möglichst hohen Nutzen zu erreichen. Für die Freibadbeheizung kommen z.B. nur Absorber (ca. 80 - 100 DM/m<sup>2</sup>) in Frage, besonders wenn man die großen Preisunterschiede zum Flachkollektor (ca. 400 - 600 DM/m<sup>2</sup>) und zum Vakuumröhrenkollektor (1000 - 1200 DM/m<sup>2</sup>) berücksichtigt.

Bild 5 zeigt qualitativ die typischen Wirkungsgradkennlinien von Absorber, Flachkollektor (mit einer Abdeckscheibe (n = 1) und selektiver Oberfläche) und einem Vakuumröhrenkollektor. Je nach Anwendungsgebiet ergeben sich unterschiedliche Bereiche im Betriebsparameter. Bei der solaren Erwärmung des Schwimmbadwasseres weichen die Eintrittstemperaturen nur wenige Grad von der Umgebungstemperatur ab. Deshalb liegt dieser Betriebsbereich ganz links im



**Bild 5:** Typische Wirkungsgradkennlinien für Absorber, Flachkollektor und Vakuumröhrenkollektor

## Welche Energieeinsparung ist möglich

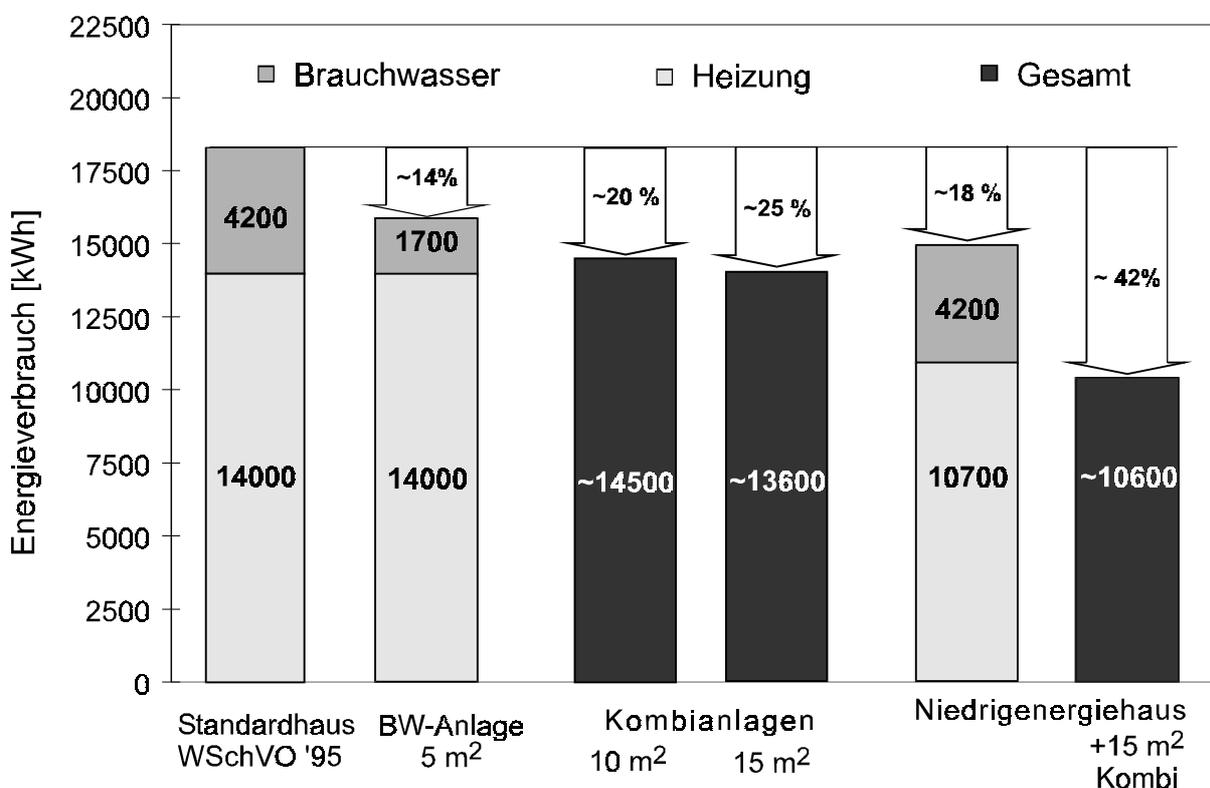
Die Energieeinsparung wurde durch detaillierte Berechnungen mit dem Simulationsprogramm TRNSYS ermittelt. Als Referenzfall wurde ein Einfamilienhaus (128 m<sup>2</sup>, 4 Personen) am Standort Würzburg mit einem Dämmstandard entsprechend der Wärmeschutzverordnung '95 (WSchVO '95) angenommen. Die Heizungsregelung wurde witterungsgeführt mit maximalen Vorlauf- bzw. Rücklauftemperaturen von 70/40 °C gewählt. Bei der Simulation wurde der Einfluß der Gebäudekapazitäten und der solaren Gewinne berücksichtigt.

Das Speichervolumen wurde zu 70 l/m<sup>2</sup> Kollektorfläche gewählt, wovon 150 l als Bereitschaftsteil für die Brauchwassererwärmung dienen.

Bei den Kombianlagen beträgt das Puffervolumen für den Heizkessel 200 l. Die Solltemperatur in diesem Heizungspuffer wurde durch die witterungsgeführte Heizungsregelung vorgegeben.

Als Anstellwinkel für die Kollektoren wurden 45° gewählt.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Bild 6 zusammengestellt. Ohne Solaranlage beträgt der Energieverbrauch ca. 18 MWh für Warmwasserbereitung und Raumheizung (dies entspricht in etwa 1800 l Öl bzw. m<sup>3</sup> Gas). Durch eine Solaranlage zur Warmwasserbereitung mit 5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche werden ca. 2,5 MWh/a (ca. 14 %) eingespart. Eine Kombianlage mit 10 bzw. 15 m<sup>2</sup> Flachkollektoren reduziert den ursprünglichen Bedarf an Öl oder Gas um ca. 3,7 bzw. 4,5 MWh/a (ca. 20 bzw. 25 %). Für eine Fläche von 15 m<sup>2</sup> ist dies ca. die doppelte Einsparung gegenüber einer solaren Brauchwassererwärmungsanlage mit 5 m<sup>2</sup>. Bei einem Niedrigenergiehaus mit einem um ca. 20 % niedrigeren Wärmebedarf für die Raumheizung, kann zusammen mit derselben Kombianlage gegenüber der Referenz über 40 % an Energie eingespart werden.



**Bild 6:** Energieeinsparung durch thermische Solaranlagen

## Kosten und Nutzen

In Tabelle 1 sind die Kosten für ausgewählte Solaranlagen angegeben (Stand 97/98). Die Investitionskosten für eine Anlage zur Brauchwassererwärmung liegen inkl. MWSt. bei DM 12 500 im Mittel und bei ca. DM 9 600 in einem günstigen Fall. Nach Abzug einer Speichergutschrift ergibt sich nach Annuisierung und mit der ermittelten Energieeinsparung ein Wärmepreis von 35 bzw. 25 Pf/kWh. Für die Kombianlagen ergeben sich durch entsprechende Rechnung 46 bzw. 43 Pf/kWh. Die absoluten Werte zeigen, daß insbesondere die solare Brauchwassererwärmung durch die den vergangenen Jahren um ca. 25 % gefallenen Preise in der Kostenrangliste von Energiesparmaßnahmen aufsteigen konnte.

Interessant sind aber auch die Relationen: Der Unterschied zwischen den Wärmepreisen für Brauchwasser- und Kombianlagen ist deutlich, stellt jedoch ein verzerrtes Bild dar, da die Differenz zum einen von der Preissenkung bei den Brauchwasseranlagen und zum anderen von den deutlich zu spürenden Entwicklungskosten der noch jungen Kombiantagenteknik geprägt ist. Auf lange Sicht kann davon ausgegangen werden, daß die Mehrkosten einer Kombianlage mit 10 m<sup>2</sup> gegenüber einer Brauchwasseranlage ca. DM 6 000 für zusätzliche Anlagentechnik und ca. DM 1 500 für zusätzlichen Installationsaufwand betragen.

Tabelle 1 (fiktive Anlage) zeigt, daß sich in diesem Fall annähernd das gleiche Kosten-Nutzen-Verhältnis für Brauchwasser- und Kombianlagen ergibt.

Kosten (inkl. MWSt.)	BW-Anlagen		Kombianlagen		
	Mittel	Günstige Anlage	Mittel	Günstige Anlage	fiktiv A=10 m <sup>2</sup>
Anlagenpreis [DM]	8800	5800	17500	17000	14800
Projektierung, Installation, Inbetriebnahme [DM]	3700	3830	5300	4400	4300
<b>Gesamt [DM]</b>	<b>12500</b>	<b>9630</b>	<b>22800</b>	<b>21400</b>	<b>19100</b>
Gutschrift Speicher [DM]	-1500	-1500	-1500	-1500	-1500
<b>Investiton [DM]</b>	<b>11000</b>	<b>8130</b>	<b>21300</b>	<b>19900</b>	<b>17600</b>
Investition annuisiert (20 a, 4%) [DM/a]	810	598	1568	1465	1295
Energieeinsparung [kWh/a]	2339	2428	3439	3757	3640
<b>Wärmepreis in [Pf/kWh]</b>	<b>35</b>	<b>25</b>	<b>46</b>	<b>39</b>	<b>36</b>

**Tabelle 1:** Kosten-Nutzen-Verhältnis von thermischen Solaranlagen

## Fazit

Die vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, daß insbesondere Kombianlagen einen beträchtlichen Beitrag zur Energieeinsparung leisten können. Unter der Voraussetzung, daß die Anlagen richtig dimensioniert und technisch gut ausgeführt sind, unterscheidet sich die Leistung einzelner Anlagenvarianten nur gering.

Kombianlagen können bei zwei- bis dreifacher Fläche das gleiche Kosten-Nutzen-Verhältnis wie Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung erreichen. Aus wirtschaftlicher Sicht sollten bei der Anschaffung einer Kombianlage auch stets Maßnahmen zur besseren Wärmedämmung des Gebäudes geprüft werden. Ab einem gewissen Dämmstandard gehören jedoch die Kollektoren auf's Dach.