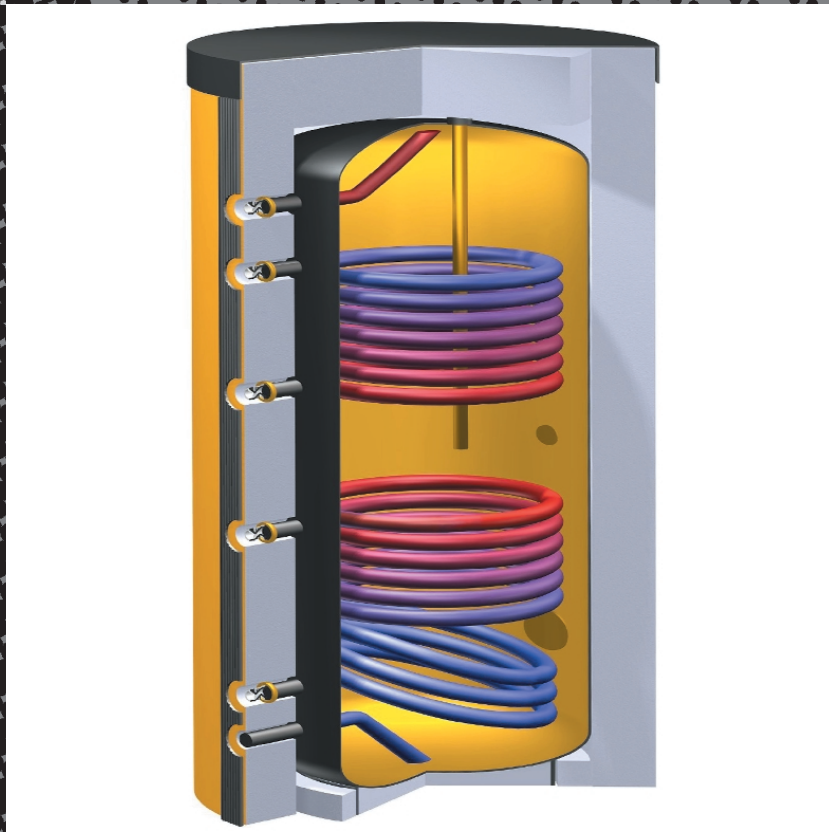


Thermische Solarenergienutzung





Die Nutzung thermischer Solarenergie erfreut sich zunehmender Beliebtheit. In den vergangenen Jahren stieg die jährlich installierte Kollektorfläche in Deutschland um durchschnittlich ca. 20 Prozent und beträgt derzeit ca. 900 000 Quadratmeter pro Jahr. Der größte Anteil dieser Kollektorfläche wird auf Ein- und Zweifamilienhäuser (kleine Solaranlagen) installiert und dient entweder der ausschließlichen Trinkwassererwärmung oder der kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung (Kombianlagen). Weitere Anwendungsgebiete sind der Einsatz von Solaranlagen bei der Schwimmbaderwärmung und solar unterstützte Nahwärmeversorgungssysteme (große Solaranlagen für mindestens 100 Wohneinheiten), mit denen bis zu 50 Prozent der bei konventioneller Wärmeversorgung notwendigen fossilen Energiemenge solar abgedeckt werden können.

Während bei der Wärmeerzeugung mit fossilen Brennstoffen unweigerlich Schadstoffe beim Verbrennen entstehen – vorrangig das für die globale Erwärmung verantwortliche Kohlendioxid (CO_2) (Treibhauseffekt) –, lassen sich diese Emissionen beim Einsatz einer Solaranlage deutlich vermindern. Die energiebedingten CO_2 -Emissionen pro Jahr Deutschlands belaufen sich mit vier Prozent des Weltaufkommens auf ca. 960 Millionen Tonnen pro Jahr. Durch den Einbau einer einfachen thermischen Solaranlage zur Brauchwassererwärmung können ca. 140 Kilogramm (kg) CO_2 pro Person und Jahr eingespart werden, bei einer thermischen Solaranlage zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung sind es sogar 400 kg CO_2 pro Person und Jahr. In der Zukunft wird durch den sinkenden Heizwärmebedarf und die Weiterentwicklung der Solarthermie der CO_2 -Ausstoß der Privathaushalte noch geringer werden. Solaranlagen stellen daher einen wichtigen Baustein für eine umweltfreundliche und nachhaltige Energieversorgung dar.

Das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) betreibt seit mehr als 25 Jahren Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der thermischen Solarenergienutzung. Mit dem Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) steht am ITW ein national und international bekannter Ansprechpartner für Industrie und Wirtschaft für experimentelle und theoretische Untersuchungen, Entwicklungs- und Normungsarbeiten für aktive solartechnische Komponenten zur Verfügung. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse fließen in die vom ITW abgehaltenen Lehrveranstaltungen ein und garantieren einen hohen Stand bei der studentischen Ausbildung.

Wolfgang Heidemann ■
Thermische Solarenergienutzung ■

Solarenergieangebot

Im „Kraftwerk“ Sonne wird Wasserstoff zu Helium verschmolzen, wobei ca. vier Millionen Tonnen der Sonnenmasse pro Sekunde „verbrennen“. Die bei der Verschmelzung freiwerdende Leistung beträgt $3,6 \cdot 10^{26}$ Watt (W), von der jedoch nur ein Bruchteil die Erde erreicht. Im erdnahen Weltraum an der obersten Schicht der Erdatmosphäre wird noch eine Strahlungsleistung von 1 367 Watt pro Quadratmeter (W/qm) (Solarkonstante) erreicht. Bei klarem Himmel kommen davon ca. 1 000 W/qm auf der Erdoberfläche an. Bei vollständig bewölktem Himmel nimmt die Solarstrahlung bis auf 100 W/qm ab. Für die solartechnische Nutzung ist die über ein ganzes Jahr verfü-

bare Strahlungssumme von Bedeutung (Abb. 1). Diese variiert in Deutschland um ca. 20 Prozent zwischen 900 und 1 200 Kilowattstunden pro Quadratmeter pro Jahr (kWh/qma) und besteht zu gleichen Teilen aus diffuser und direkter Strahlung. In unseren Breiten fallen etwa 75 Prozent der jährlichen Einstrahlungssumme in den Sommermonaten April bis September an. Die Strahlungssumme auf eine Fläche hängt wesentlich von deren Ausrichtung (Anstellwinkel gegen die Horizontale sowie Himmelsrichtung) ab. Die maximale Strahlungssumme ergibt sich auf eine nach Süden orientierte Fläche mit einem Anstellwinkel von ca. 30 Grad. Abbildung 2 gibt Anhaltswerte für die relative Änderung der eingestrahelten Sonnenenergie bei Abweichung von der optimalen Orientierung. Bei einer 40 Grad angestellten Fläche mit Süd-Ost- oder Süd-West-Orientierung beträgt die Minderung der Globalstrahlung im Jahresmittel weniger als fünf Prozent. Bei nach Osten oder Westen orientierten Flächen ist ein flacher Neigungswinkel günstig.

Warum sollte nun dieses Solarenergieangebot gerade zur Wärmeerzeugung (Solarthermie) verwendet werden? Ein Blick auf die Energiebilanz privater Haushalte zeigt, dass 75 Prozent des Energiebedarfs durch die Raumheizung und weitere 13 Prozent durch die Warmwasserbereitung entstehen (Abb. 3). Ein Großteil dieser Energiemengen, die im Temperaturbereich zwischen 20°C und 90°C auftreten, können mit entsprechenden Maßnahmen durch Solarthermie gedeckt werden.

Sonnenkollektoren

Unabhängig vom Anlagentyp stellt der Kollektor eine der Schlüsselkomponenten der thermischen Solaranlage dar. Beim Flachkollektor (Abb. 4) spielen alle Wärmetransportmechanismen (Leitung, Strahlung, freie und erzwungene Konvektion) eine wichtige Rolle und sind darüber hinaus noch von der Aufstellungsgeometrie und den Umgebungsbedingungen des Kollektors abhängig.

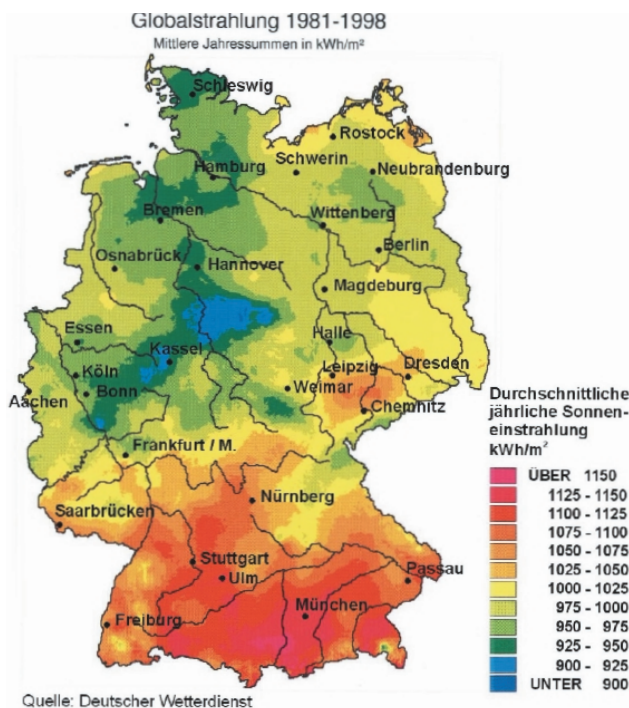


Abb. 1: Globalstrahlungssumme in Deutschland.

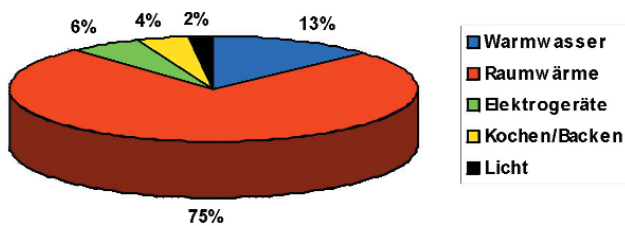


Abb. 3: Energieverbrauch privater Haushalte.

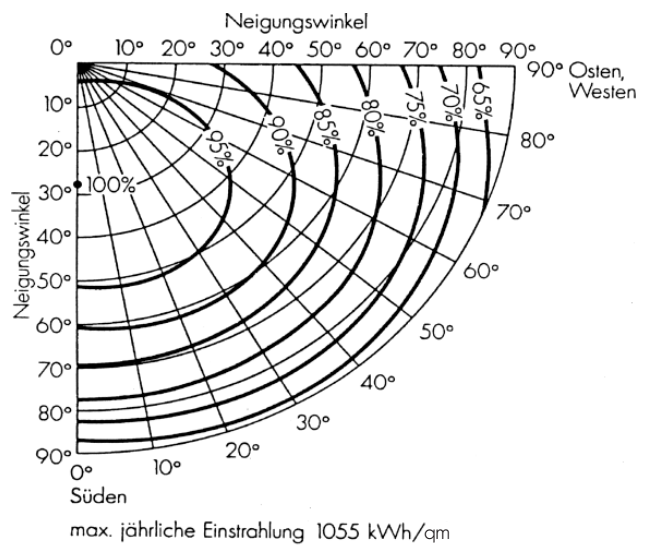


Abb. 2: Einfluss des Anstellwinkels und der Himmelsrichtung auf die Jahreseinstrahlungssumme.

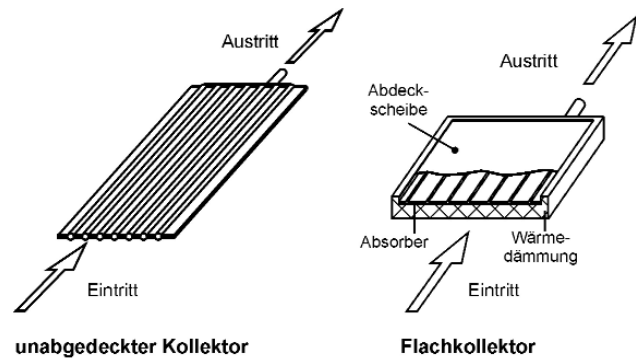


Abb. 4: Bauformen flüssigkeitsgekühlter Flachkollektoren.

Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Wärmetransportvorgänge innerhalb eines Flachkollektors. Die wichtigste Komponente ist der Absorber mit einer für Solarstrahlung möglichst vollständig absorbierenden Oberfläche. Durch einen guten Wärmetransport zwischen Absorber und einem durch den Absorber strömenden Wärmeträgermedium (zum Beispiel Wasser, Wasser-Glykolegemisch oder Luft) wird die bei der Absorption entstehende Wärme an das Wärmeträgermedium abgegeben und aus dem Kollektor als Nutzwärme abgeführt. Zur Reduzierung von Wärmeverlusten und zur Verbesserung des Kollektorstufigen Wirkungsgrades wird der Absorber vorne mit einer oder mehreren transparenten Abdeckung(en) versehen sowie seitlich und nach hinten wärmeisoliert. Da eine vollständige Theorie und geschlossene Lösungen der Wärmeübertragungs- und Verlustmechanismen nicht bekannt sind, werden am ITW numerische Simulationen zur Vorhersage des thermischen Verhaltens eingesetzt. Der Einsatz dieser numerischen Methoden ist insbesondere für neu zu entwickelnde Kollektoren geeignet, um die Einflüsse zum Beispiel der Abstände von Absorber zu Folie beziehungsweise Scheibe, der Durchströmungsrichtung, des Kollektorstellwinkels und der Rahmenkonstruktion untersuchen zu können. Die Absorber bestehen aus gut wärmeleitendem Material (zum Beispiel Kupfer, Aluminium) oder aus Kunststoffen (beispielsweise Polypropylen, Kunstkautschuk). Letztere werden bei der Schwimmbadbeheizung eingesetzt, da dort relativ niedrige Temperaturen vorherrschen und ein erhöhter Korrosionsschutz erforderlich ist.



Abb. 6: Flachkollektor-Solardach.

Gegenüber einer Auf-Dach-Montage, die prinzipiell immer möglich ist, können Flachkollektoren in die Dachfläche integriert werden. Abbildung 6 zeigt ein modernes Solardach (solar roof), bei dem der Kollektor zusätzlich die Aufgaben der schützenden Dachhaut übernimmt.

Neben dem Flachkollektor wird der Röhrenkollektor (Abb. 7) unterschieden. In den druckfesten, geschlossenen Röhren des Vakuumröhrenkollektors herrscht nahezu ein Vakuum, wodurch keine konvektiven Wärmeverluste zwischen dem heißen Absorber und der kalten Glasröhre auftreten können. Unter-

schieden werden Vakuumröhrenkollektoren mit direkt durchströmter Röhre und der Vakuumröhrenkollektor mit Wärmerohr („heat-pipe“). Beim direkt durchströmten Absorber fließt das Wärmeträgermedium wie beim Flachkollektor durch ein im oder am Absorber angebrachtes Rohr. Die Röhre sind entweder als U-Rohr oder Koaxialrohr ausgebildet. Beim Vakuumröhrenkollektor mit Wärmerohr befindet sich eine schon bei geringen Temperaturen verdampfende Flüssigkeit im geschlossenen Absorberrohr. Bei Wärmezufuhr entsteht Dampf, der im Wärmerohr aufsteigt und im am oberen Ende des Wärmerohrs angebrachten Kondensator wieder verflüssigt wird. Die Verdampfungswärme, die vormals der Flüssigkeit zugeführt wurde, wird bei der Kondensation an das im Sammelrohr strömende Wärmeträgermedium abgegeben. Das Kondensat fließt anschließend wieder an das Wärmerohrende zurück. Damit der beschriebene Verdampfungs- und Kondensationsprozess ablaufen kann, müssen die Röhren mit einer Mindestneigung zur Horizontalen aufgebaut sein.

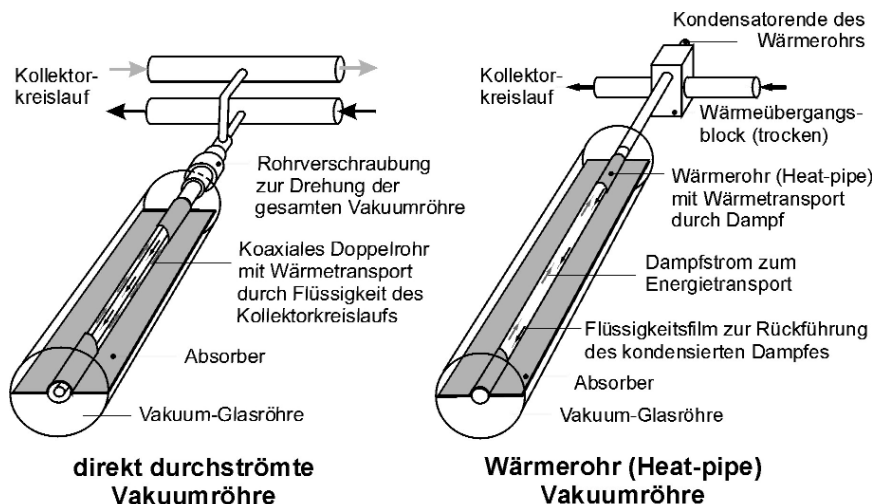


Abb. 7: Bauformen von Vakuumröhrenkollektoren.

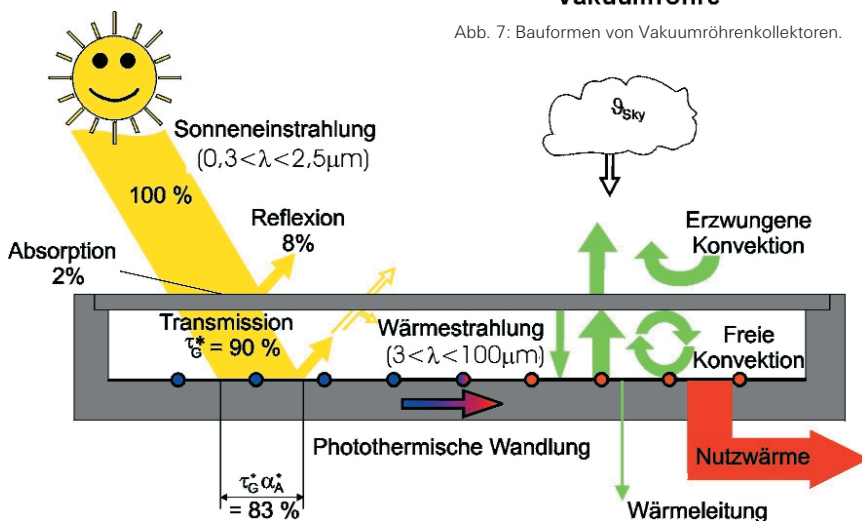


Abb. 5: Aufbau eines Flachkollektors und photothermische Wandlung.

Bei der solaren Schwimmbaderwärmung beispielsweise weichen die Eintrittstemperaturen nur wenige Grad von der Umgebungstemperatur ab, weshalb dieser Betriebsbereich ganz links im Wirkungsgraddiagramm (\bar{w} klein) liegt.

Die thermische Leistungsfähigkeit von Kollektoren wird letztendlich durch zwei Parameter gekennzeichnet: Dem Konversionsfaktor, der sich als Ordinatenabschnitt $\eta_0 = F' \cdot (\tau_G \alpha_a)$ im Wirkungsgraddiagramm ablesen lässt und im Wesentlichen vom Transmissionsgrad der Abdeckung und dem Absorptionsgrad des Absorbers abhängt. Als zweiter Parameter wird der mittlere Gesamtwärmedurchgangskoeffizient verwendet, der als Krümmung der Wirkungsgradkennlinie

ein Maß für die thermischen Verluste des Kollektors darstellt. Somit kann der zunehmend steilere Verlauf der Wirkungsgradkennlinien von Vakuumröhren- über Flachkollektor bis hin zu unabgedecktem Absorber (Abb. 9) durch die größer werdenden thermischen Verluste erklärt werden.

Heutzutage werden in fast allen Kollektoren selektive Absorberschichten eingesetzt, die im Wellenlängenbereich der Solarstrahlung ($0,3 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 3 \mu\text{m}$) einen hohen Absorptionsgrad ($\alpha > 0,95$) aufweisen und gleichzeitig, aufgrund eines niedrigen Emissionsgrades ($\epsilon < 0,1$) im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung, nur wenig Energie abstrahlen. Selektive Schichten werden meist galvanisch (Schwarzchrom, nickelpigmentiertes Aluminium) oder durch Sputtern im Vakuum (zum Beispiel Tinox- oder Cermet-Schicht) hergestellt (Abb. 8).

Welcher Kollektor für welchen Einsatz?

Die mit einem Kollektor gewinnbare Nutzwärme lässt sich mit Hilfe des Kollektorstufenwirkungsgrades η beschreiben. Dieser gibt das Verhältnis der vom Kollektor abgegebenen Nutzwärme zur auf den Kollektor einfallenden Strahlungsenergie wieder und lässt sich aus einer stationären Wärmebilanz bestimmen als

$$\eta = F' \cdot (\tau_G \alpha_A) - \frac{F' \cdot k_{\text{eff,m}} (\vartheta_{\text{fl,m}} - \vartheta_{\text{am}})}{G_{\text{glob,K}}}$$

mit F' als Kollektorstufenwirkungsgradfaktor, $\tau_G \alpha_A$ als Transmissions-Absorptionsprodukt (optischer Kollektorstufenwirkungsgrad), $k_{\text{eff,m}}$ als mittlerer Gesamtwärmedurchgangskoeffizient, $\vartheta_{\text{fl,m}}$ als Mittelwert aus Kollektorein- und -austrittstemperatur, ϑ_{am} als Umgebungstemperatur und $G_{\text{glob,K}}$ als Globalstrahlung in Kollektorebene. Die Auftragung des Kollektorstufenwirkungsgrades erfolgt über dem Betriebsparameter $\bar{w} = (\vartheta_{\text{fl,m}} - \vartheta_{\text{am}}) / G_{\text{glob,K}} \cdot \vartheta$.

Abbildung 9 zeigt qualitativ die typischen Wirkungsgradkennlinien von Absorber (unabgedeckter Flachkollektor), Flachkollektor (mit einer Abdeckung und selektiver Oberfläche) und einem Vakuumröhrenkollektor. Je nach Anwendungsgebiet ergeben sich unterschiedliche Bereiche im Betriebsparameter \bar{w} .

Thermische Solaranlagen

Eine Übersicht der in Deutschland zur thermischen Solarenergienutzung eingesetzten Anlagentypen ist in Abbildung 10 gezeigt. Kleinanlagen mit typischerweise 1 bis 1,5 Quadratmetern Kollektorfläche pro Person, wodurch sich Kollektorflächen pro Haus kleiner als zehn bezie-

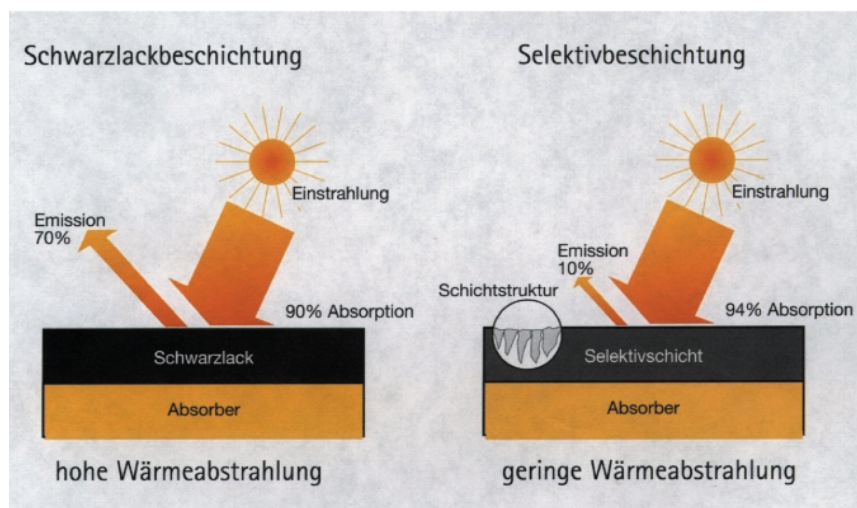


Abb. 8: Selektivbeschichtung.

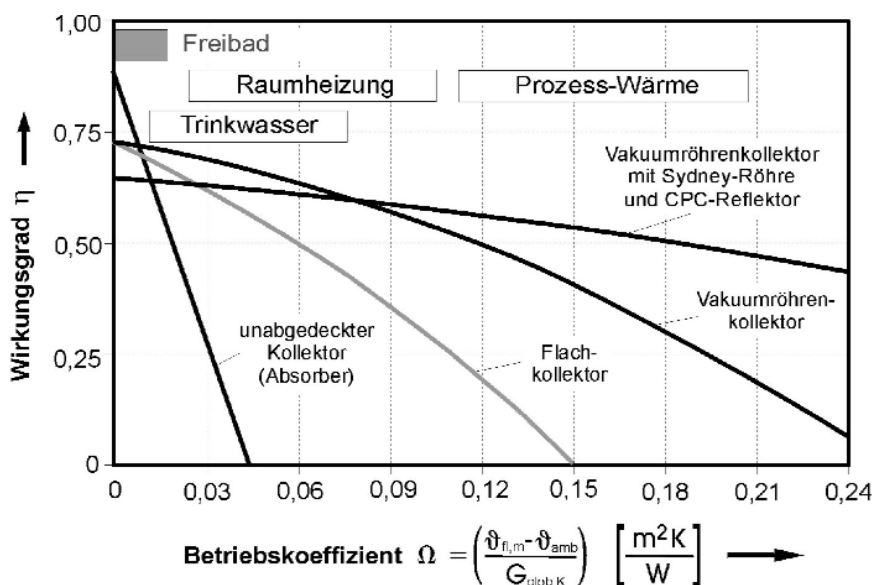


Abb. 9: Wirkungsgradkennlinien für Absorber, Flach- und Vakuumröhrenkollektor.

hungsweise 20 Quadratmeter ergeben, kommen sehr häufig in Ein- oder Zweifamilienhäusern zum Einsatz. Der durch Solarenergie abdeckbare Anteil am Gesamtwärmebedarf für Trinkwassererwärmung und Heizung beträgt zwischen 15 Prozent (Kleinanlagen zur reinen Trinkwassererwärmung) und 25 Prozent (Kleinanlagen zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung). Großanlagen mit mehr als 100 bis zu einigen 1000 Quadratmetern Kollektorfläche bieten die Möglichkeiten großer Preisreduktionen, da die spezifischen Anlagenkosten mit der Anlagengröße abnehmen. In Verbindung mit Nahwärmenetzen und Langzeitwärmespeichern werden bereits heute solare Deckungsraten von 50 Prozent erreicht, ein Ziel, das bei den Kleinanlagen mit neuen innovativen Konzepten erst in Angriff genommen wird.

Sowohl im Bereich kleiner wie auch im Bereich großer Solaranlagen trägt das ITW mit seinen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Weiterentwicklung der jeweiligen Technologie maßgeblich bei.

Kleine Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung

Auch wenn die solarthermisch unterstützte Raumheizung zunehmend an Bedeutung gewinnt, stellt die Trinkwassererwärmung immer noch das Hauptanwendungsgebiet thermischer Solaranlagen dar. Während der tägliche Warmwasserbedarf für die Warmwasserbereitung annähernd konstant ist, variiert die Solarstrahlung stark über dem Jahresverlauf. In den Sommermonaten steht oft mehr Solarenergie zur Verfügung als benötigt wird. Im Winter dagegen ist die Einstrahlung für eine vollständige Deckung des Bedarfs nicht ausreichend. Dem Ziel, möglichst viel des gesamten Wärmebedarfs von der Solaranlage abdecken zu lassen, zum Beispiel durch Vergrößerung der Kollektorfläche, steht eine Erhöhung der dann nicht nutzbaren Überschusswärme im Sommer gegenüber. Eine Abnahme des Systemertrags pro Quadratmeter und Jahr ist die Folge. Um dem Zwiespalt aus möglichst hohen solaren Beiträgen und Vermeidung großer Überschusswärme im Sommer zu begegnen, wird die Solaranlage (zumindest in Deutschland) so dimensioniert, dass in der heizungsfreien Zeit von Mai bis Sep-

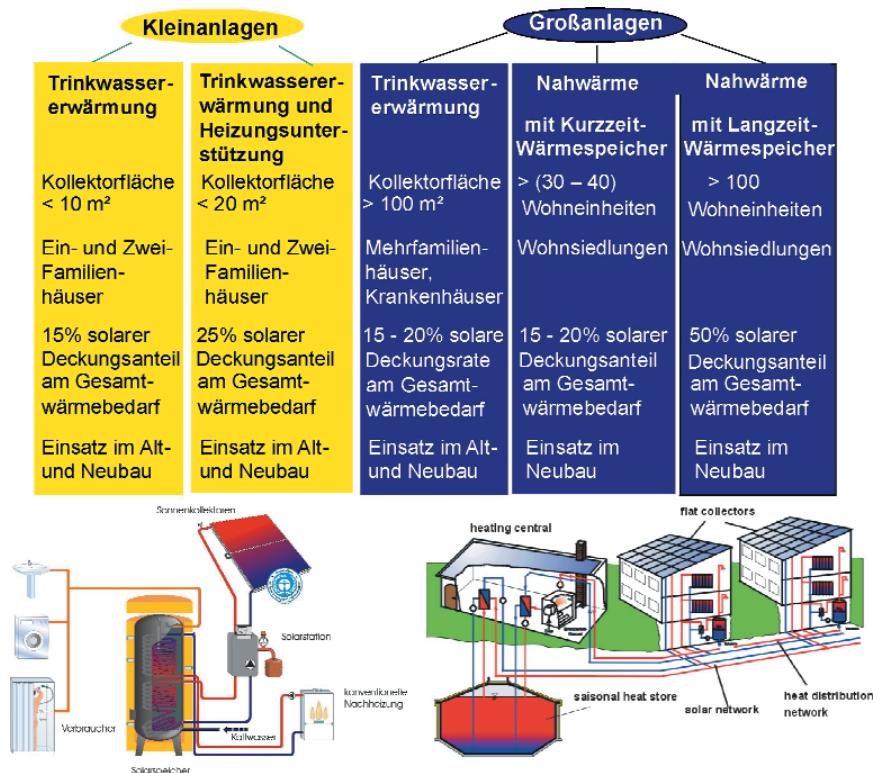


Abb. 10: Anlagentypen in Deutschland.

tember eine möglichst vollständige Deckung des Wärmebedarfs (dann ausschließlich für die Trinkwassererwärmung) erzielt wird. In der Übergangs- und Winterzeit dient die Solaranlage zur Vorwärmung des Trinkwassers, der Restwärmebedarf muss vom Heizkessel gedeckt werden.

- Die wichtigsten *Anlagentypen* zur solaren Trinkwassererwärmung sind
- Thermosiphonanlagen, bei denen das Wärmeträgermedium im Naturumlauf geführt wird,
 - integrierte Kollektor-Speicher-Anlagen (IKS-Anlagen), bei denen auf Verbindungsleitungen zwischen Kollektor und Speicher verzichtet wird, sowie
 - Anlagen mit Zwangsumwälzung des Wärmeträgermediums.

Letztgenannter Typ stellt den Großteil aller in Deutschland installierten Anlagen dar (Abb. 11). Bei diesen Anlagen sind Kollektor und Speicher durch gut wärmedämmte Rohrleitungen verbunden, in denen ein Wasser/Glykol-Gemisch als Wärmeträgermedium zirkuliert. Die Pumpe wird von der in der Solarstation integrierten Regelung eingeschaltet, wenn die Wärmeträgertemperatur am Kollektorausstritt fünf bis zehn Kelvin (K) höher ist als die Temperatur unten im Speicher.

Dort wird die im Kollektor an das Wärmeträgermedium abgegebene Wärme über einen Wärmeübertrager an das im Speicher befindliche Trinkwasser abgegeben.

Um hygienisch einwandfreie Bedingungen zu garantieren, kommen als Speicher entweder Edelstahltanks oder mit Emaille oder Kunststoff beschichtete Stahltanks zum Einsatz. Eingebaute Magnesium-Schutzanoden oder Fremdstromanoden schützen den Speicher zusätzlich vor Korrosion bei Rissen in der Beschichtung. Im unteren Teil des Speichers strömt immer dann Frischwasser ein, wenn aus seinem oberen Teil warmes Wasser entnommen wird. Solar erwärmtes Frischwasser gelangt bei weiteren Entnahmen in den als Bereitschaftsteil bezeichneten oberen, ca. 100 bis 150 Liter umfassenden Speicherbereich, in dem das Trinkwasser immer Solltemperatur (ca. 45°C) aufweisen soll. Bei unzurei-

Das geschilderte Anlagenkonzept ist lediglich eine, wenn auch typische, Möglichkeit, eine Solaranlage mit Zwangsumwälzung zu betreiben. So zahlreich die Herstellervielfalt von Solaranlagen ist, so unterschiedlich sind die Betriebsweisen des Solarkeislaufes, die sich etabliert haben:

- *High-Flow-Anlagen* weisen typischerweise einen hohen Volumenstrom von 50 Litern pro Quadratmeter Kollektorfläche und Stunde auf. Dadurch erwärmt sich das Wärmeträgerfluid zwischen Kollektorein- und -austritt nur wenig. Die resultierende niedrige Kollektortemperatur verbessert den Kollektorwirkungsgrad, zudem wird durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten ein guter Wärmeübergang im Kollektor und im unteren Wärmeübertrager des Speichers erzielt.
- *Low-Flow-Anlagen* weisen einen niedrigen Volumenstrom von ca. 12 Litern pro Quadratmeter Kollektorfläche und Stunde auf. Dadurch erwärmt sich das Wärmeträgerfluid zwischen Kollektorein- und -austritt stark – der Kollektor arbeitet auf hohem Temperaturniveau und sollte daher geringe Wärmeverluste aufweisen (Vakuurröhrenkollektoren). Durch niedrige Strömungsgeschwindigkeiten können kleinere Rohrleitungsquerschnitte als bei High-Flow-Anlagen vorgesehen werden, was die Wärmeverluste über Rohrleitungen und Kosten für die Verrohrung reduziert.

chender Erwärmung des Trinkwassers durch die Solaranlage wird das im Bereitschaftsteil befindliche Wasser durch die Nachheizung auf Solltemperatur gebracht. Üblicherweise übernimmt dies ein Öl- oder Gasheizkessel, indem Wärme über einen zweiten oberen Wärmeübertrager in den Bereitschaftsteil eingespeist wird. Da im Sommer Speichertemperaturen von über 90°C erreicht werden können, muss am Speicheraustritt ein thermostatisches Mischventil eingesetzt werden. Bei den gegen Überhitzung eigensicher ausgelegten Anlagen schaltet bei „geladenem“ Warmwasserspeicher die Regelung die Solarkreispumpe ab. Bei hoher Solarstrahlung kann dies zum Verdampfen der Wärmeträgerflüssigkeit führen. Die damit einhergehende Volumenausdehnung wird von einem Ausdehnungsgefäß aufgenommen. Bei nachlassender Einstrahlung am Abend kondensiert der Dampf des Wärmeträgermediums und das Ausdehnungsgefäß drückt das aufgenommene Fluid wieder zurück in den Solarkreislauf.

- *Matched-Flow-Anlagen* zeichnen sich durch einen variablen Volumenstrom im Kollektorkreis aus, der, abhängig von Einstrahlung und Speichertemperatur, zwischen High-Flow- und Low-Flow-Volumenstromwerte geregelt wird. Auch für Matched-Flow-Anlagen kommen nur Kollektoren mit geringen Wärmeverlusten in Frage.

Neben der richtigen Betriebsweise des Kollektors stellt der Warmwasser-Wärmespeicher die wichtigste Komponente solarthermischer Anlagen dar und ist Gegenstand umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am ITW. Wie die Thermodynamik uns lehrt, hängt der Nutzen (Exergie) der in den Speicher eingebrachten Wärme stark vom Temperaturniveau ab. Somit kann es für eine solare Trinkwassererwärmungsanlage energetisch sinnvoller sein, nur einen kleinen Teil des Speichereinhaltes auf die gewünschte Solltemperatur von 45°C aufzuheizen anstatt den gesamten Speichereinhalt auf eine entsprechend dem Wärmehalt niedrigere Speichermischtemperatur. Die thermischen Verhältnisse im Speicher werden somit von der Beladungsstrategie bestimmt:

- *Durchmischte Speicherbeladungen* treten bei untenliegenden eingetauchten Wärmeübertragern (Abb. 12) auf. Reicht die von der Solaranlage gelieferte Wärme nicht aus, den gesamten

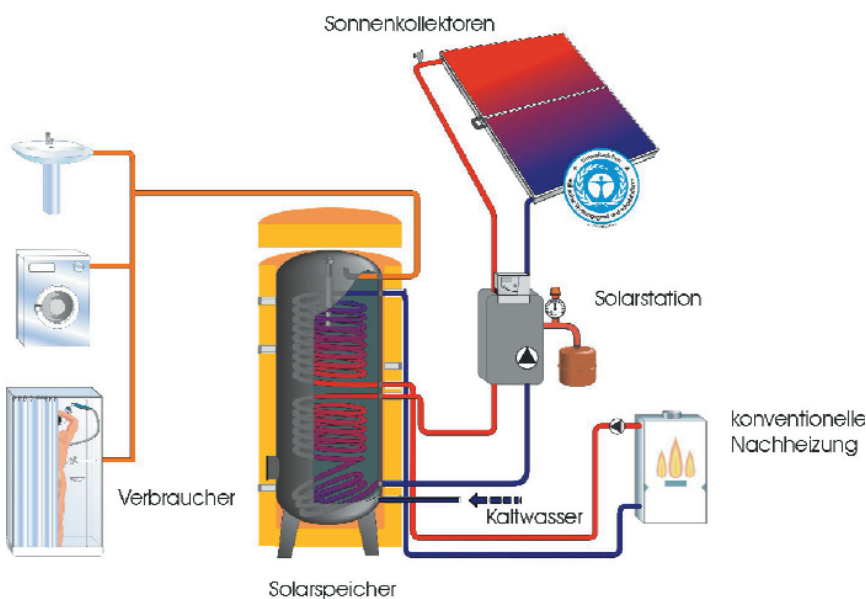


Abb. 11: Solaranlage mit Zwangsumwälzung zur Trinkwassererwärmung.

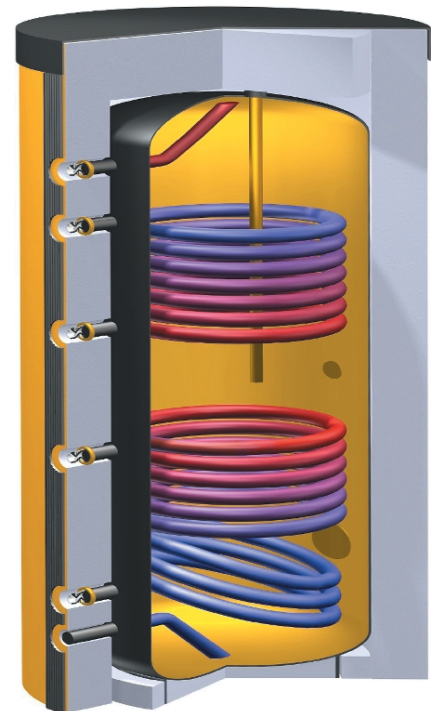


Abb. 12: Schema eines Trinkwasserspeichers mit eingetauchtem Wärmeübertrager.

Speicherinhalt auf Solltemperatur zu erwärmen, so muss die Nachheizung für die entsprechende Nacherwärmung des im Bereitschaftsteils befindlichen Wasservolumens sorgen.

- Bei *geschichteten Speicherbeladungen* wird nur das im Bereitschaftsteil befindliche Wasservolumen auf Solltemperatur gebracht, ohne dass die Nachheizung anspricht. Als Schichtbeladeeinrichtungen haben sich so genannte Konvektionskamine etabliert. Dabei erwärmt sich der Speicherinhalt direkt über dem Wärmeübertrager des Solarkreislaufs, wird dadurch leichter und steigt im Kamin auf. Die Aufwärtsströmung endet dort, wo identische Temperaturen zwischen erwärmtem und ruhendem Wasser herrschen. Durch spezielle Öffnungen im Kamin kann eine Einschichtung erfolgen. Die für eine geschichtete Beladung erforderliche große Temperaturdifferenz zwischen unterem Speicherbereich und Solarkreiswärmeübertrager kann durch Low-Flow- beziehungsweise Matched-Flow-Betrieb erreicht werden.

Werden für Ein- und Mehrfamilienhäuser bei einem durchschnittlichen täglichen Warmwasserbedarf von ca. 40 bis 50 Liter pro Person

- 1,2 bis 1,5 Quadratmeter Flachkollektor beziehungsweise 1 bis 1,2 Quadratmeter hocheffizienter Vakuumröhrenkollektor und
- 50 bis 60 Liter Speichervolumen pro Quadratmeter Kollektorfläche

für eine solarthermische Anlage vorgesehen, so lässt sich damit eine anteilige jährliche Energieeinsparung von ca. 60 Prozent bei der Trinkwassererwärmung bei nur geringen Wärmeüberschüssen im Sommer erzielen.

Kombianlagen zur solaren Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung

In den letzten Jahren gewinnt die aktive Nutzung der Solarenergie zur Heizungsunterstützung zunehmend an Bedeutung. Dabei wird gespeicherte Sonnenenergie bedarfsgerecht der Zentralheizung zur Verfügung stellt. Ein Vergleich des Wärmebedarfs eines ausgesuchten Gebäudes mit dem Strahlungsangebot (Abb. 13) zeigt, dass Sonnenenergie prinzipiell für die Trinkwassererwärmung und Raumheizung genutzt werden kann.

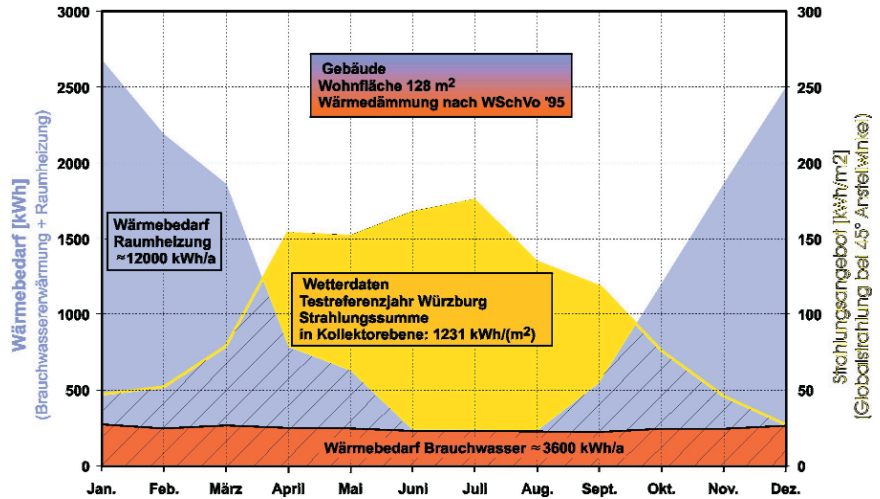


Abb. 13: Wärmebedarf eines Einfamilienhauses für Trinkwassererwärmung und Raumheizung sowie solares Strahlungsangebot (Würzburg).

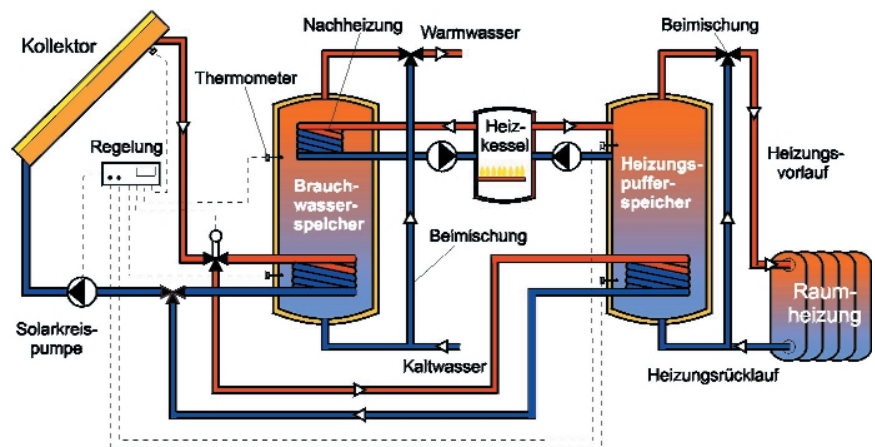


Abb. 14: Zweispeicher-Kombianlage.

Für Solaranlagen zur kombinierten Brauchwassererwärmung und Raumheizung – kurz Kombianlagen – empfiehlt sich ein nach Süden ausgerichteter Kollektor mit einem Neigungswinkel von mindestens 40 Grad. Um die Solaranlage effektiv zur Heizungsunterstützung einsetzen zu können, ist es wichtig, dass die bestehende Gebäudeheizung auf einem möglichst niedrigen Temperaturniveau (zum Beispiel Vorlauftemperatur 70°C/ Rücklauftemperatur 40°C) betrieben wird. Ideal sind Fußbodenheizungen oder Heizungen von sehr gut wärmegeprägten Gebäuden (spezifischer Heizwärmeverbrauch von 50 bis 70 Kilowattstunden pro Quadratmeter Wohnfläche), die mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 50°C sowie einer Rücklauftemperatur von 30°C ausgelegt werden. Für die Dimensionierung hat sich als sinnvoll erwiesen, pro Quadratmeter Kollektorfläche ein Speichervolumen von ca. 60 bis 90 Liter vorzusehen. Kleine Kombianlagen mit einer Kollektorfläche von etwa zehn

Quadratmetern und einem Speichervolumen vom ca. 700 Litern ermöglichen eine Einsparung von ca. 20 Prozent der zur Wärmeversorgung eines Einfamilienhauses benötigten Energie.

In den letzten Jahren haben sich eine Reihe von *Anlagenkonzepten* durchsetzen können:

- Der *Zweispeicher-Kombianlage* (Abb. 14) ist ihre historische Abstammung anzusehen – die Solaranlage zur Trinkwassererwärmung wurde um einen weiteren Speicher für die Heizung ergänzt. Von Vorteil ist, dass einfache Speicher einsetzbar sind und dass die

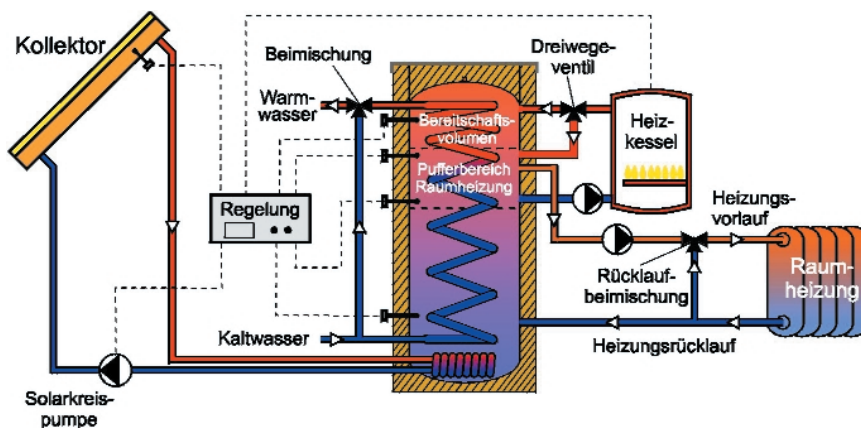


Abb. 15: Einspeicher-Kombianlage.

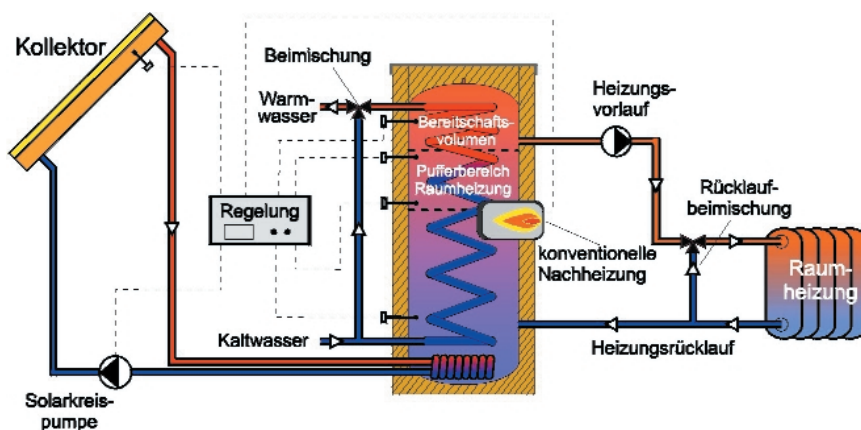


Abb. 16: Kombianlage mit eingebautem Gasbrenner.

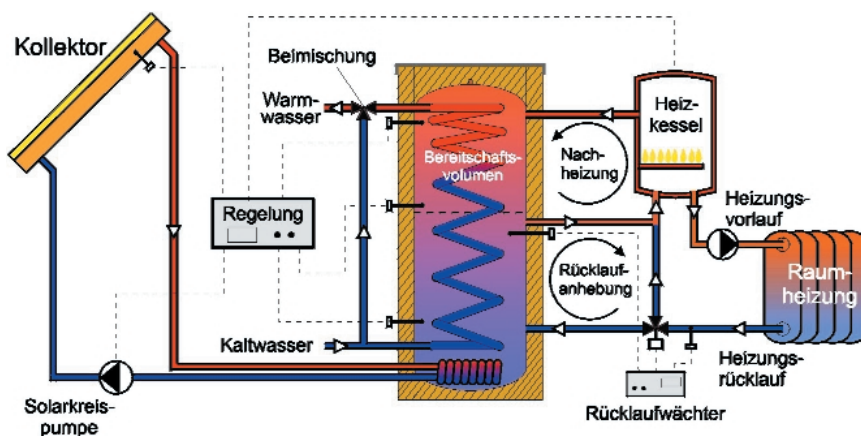


Abb. 17: Kombianlage mit Rücklaufanhebung.

relativ niedrigen Temperaturen am Solarkreis-Wärmeübertrager sich positiv auf den Kollektorwirkungsgrad auswirken. Nachteilig wirken sich die größeren Wärmeverluste zweier Speicher gegenüber einem gleich gedämmten Einzelspeicher aus.

- *Einspeicher-Kombianlagen* (Abb. 15) sind aufgrund ihrer kompakten Bauweise auf dem Markt dominant. Ein zentraler Kombispeicher dient sowohl als Wärmespeicher für die Solaranlage als auch zur Erwärmung des Brauchwassers und gegebenenfalls auch als Pufferspeicher für den Heizkessel. Im oberen Bereich des Speichers befindet sich das Bereitschaftsvolumen für die Trinkwassererwärmung und im mittleren Bereich das Puffervolumen für die Raumheizung. Steht dem Heizkessel ein Puffervolumen zur Verfügung, so kann ein häufiges Takten des Kessels und daraus resultierende höhere Schadstoffemissionen vermieden werden.
- Bei *Kombianlagen mit eingebautem Gasbrenner* (Abb. 16) ist der Heizkessel und der Speicher für die Trinkwassererwärmung durch einen großen Speicher ersetzt, in den ein Gas- oder Ölbrenner als Wärmequelle eingebaut ist. Vorteilhaft sind geringe Montagekosten und eine kompakte Bauweise.
- Bei *Anlagen mit Rücklaufanhebung* (Abb. 17) ist im Speicher nur ein Bereitschaftsvolumen für die Trinkwassererwärmung vorhanden. Vom Heizkessel kann die für die Raumheizung benötigte Wärme nur direkt in den Heizkreislauf des Gebäudes geliefert werden. Ist die Temperatur im unteren Bereich des Speichers höher als die Rücklauftemperatur des Raumheizungskreises, so wird der Rücklauf durch den Speicher geleitet und diesem Wärme entnommen. Diese Wärme hebt das Temperaturniveau des

Raumheizungswassers im Rücklauf an, bevor es im Heizkessel auf Vorlauftemperatur erwärmt wird. Bei diesen Anlagen herrscht während der Heizperiode ein niedrigeres Temperaturniveau im Speicher. Dies führt zu geringeren Wärmeverlusten, woraus eine höhere Energieeinsparung resultiert. Nachteilig ist das häufigere Ein- und Ausschalten (Takten) und die damit verbundenen Schadstoffemissionen sowie der daraus resultierende geringere Nutzungsgrad des Heizkessels.

Welches Anlagenkonzept ist das Beste?

Wie sich bei umfangreichen experimentellen und theoretischen Untersuchungen, die am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart durchgeführt wurden, gezeigt hat, entscheidet weniger das Anlagenkonzept als vielmehr Ausführung und Dimensionierung der Anlagenkomponenten – insbesondere des Speichers – über den solaren Ertrag einer Kombianlage.

Besondere Bedeutung kommt der Wärmedämmung des Speichers zu. Schwachstellen in Form von Wärmebrücken im Bereich von Rohranschlüssen, Flanschen, Tauchhülsen und Thermometern machen Mehrerträge infolge ausgefeilter Beladestrategien zunichte. Die Schichtungsfähigkeit des Speichers spielt dagegen eine geringere Rolle als bei Anlagen zur reinen Trinkwassererwärmung. Ein kleines, auf niedrigerem Temperaturniveau betriebenes Bereitschaftsvolumen für die Trinkwassererwärmung wirkt sich deutlich positiv auf die mit der Solaranlage erzielbare Energieeinsparung aus. Es ist deshalb wichtig, dass das Bereitschaftsvolumen keinesfalls überdimensioniert wird.

Gegenstand aktueller Untersuchungen ist die Erhöhung des solaren Beitrags bei der Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung auf über 50 Prozent. Zur Erreichung dieses ehrgeizigen Ziels mit kleinen Solaranlagen sind unter anderem größere Kollektorflächen erforderlich. Da dies eventuell durch Mangel an geeigneter Dachfläche nicht möglich ist, kann der neue Ansatz „solare Aktivierung“ von normalerweise passiven Gebäudeelementen herangezogen werden. Dies bedeutet, typische Gebäudeelemente wie beispielsweise Fassaden, Fenster, Verschattungseinrichtungen werden als aktive Kolle-

torfläche ausgelegt. Im Vergleich zu einer optimalen Kollektorneigung werden auf senkrechte Gebäudefassaden (Neigungswinkel 90 Grad) immerhin noch ca. 70 Prozent der maximal verfügbaren solaren Einstrahlung detektiert. Am ITW wird die Nutzung von Fenstern als Sonnenkollektoren untersucht. Der Fensterkollektor besteht dabei aus einer Doppelverglasung und einem waagerechten durchströmten Absorberröhrenelement. Neben der Bereitstellung von Wärme bietet der Fensterkollektor einen zusätzlichen Lichtgewinn.

Solarthermische Großanlagen zur solarunterstützten Nahwärmeversorgung

Für die Wärmeversorgung von größeren Wohnsiedlungen mit mindestens 100 Wohneinheiten wurden in den vergangenen Jahren Konzepte entwickelt, die bei möglichst geringen Mehrkosten den fossilen Brennstoffbedarf zur Wärmeversorgung um bis zu 50 Prozent und mehr reduzieren. Ein wichtiger Baustein dieser Versorgungskonzepte ist die Nutzung von solarthermischer Energie in Nahwärmeversorgungssystemen mit saisonaler Wärmespeicherung. Innerhalb des Förderprogramms Solarthermie 2000 wurden im Zeitraum von

1993 bis 2002 mittlerweile sieben Pilotanlagen mit Langzeit-Wärmespeicher in die Praxis umgesetzt, die vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik wissenschaftlich-technisch betreut werden. Sechs der sieben Pilotanlagen sind in Abbildung 18 gezeigt. Große Solaranlagen mit bis zu 3000 Quadratmetern Kollektorfläche sind heutzutage Stand der Technik. Die zeitliche Verschiebung zwischen Solarstrahlungsangebot im Sommer und maximalem Wärmebedarf im Winter wird über die saisonale Wärmespeiche-

rung ausgeglichen, für die vier erprobte Techniken zur Verfügung stehen. Diese müssen jedoch weiterentwickelt werden, um die derzeit noch hohen Baukosten zu reduzieren.

Abbildung 19 zeigt das Schema einer solar unterstützten Nahwärmeversorgung mit Langzeit-Wärmespeicher. Die von den Sonnenkollektoren gewonnene Wärme wird über das Solarnetz zur Heizzentrale transportiert und bei Bedarf direkt an die Gebäude verteilt. Die Kollektoren sind auf den Dächern der Gebäude montiert, die möglichst nahe an der Heizzentrale liegen. Die im Sommer anfallende Überschusswärme wird in den saisonalen Wärmespeicher eingespeist, der in den Untergrund des Siedlungsgeländes eingebaut ist. Das über das Wärmeverteilnetz gelieferte Heizwasser versorgt die Heizung und Trinkwassererwärmung der Gebäude. Die Heizwassererwärmung in der Heizzentrale verwendet die im Langzeit-Wärmespeicher gespeicherte Solarwärme und heizt bei Bedarf konventionell, zum Beispiel mit einem Gasbrennwertkessel, nach.

Die Auslegungsrichtlinien dieser Anlagen lassen sich vereinfacht wie folgt zusammenfassen:

- Die Systemmindestgröße beträgt 100 Wohneinheiten mit je 70 Quadratmetern Wohnfläche.
- Pro Megawattstunde jährlichem Wärmebedarf sollten 1,4 bis 2,4 Quadratmeter Flachkollektor vorgesehen werden.

Eine so ausgelegte solarthermische Großanlage liefert ca. 230 bis 350 Kilowattstunden pro Quadratmeter Flachkollektor für einen solaren Deckungsanteil von 40 bis 60 Prozent am Gesamtwärmebedarf.

Friedrichshafen-Wiggenhausen (1996)
280 Wohnungen, 2700 m² Flachkollektor,
12.000 m³ Heißwasserwärmespeicher



Steinfurt-Borghorst (1999)
23 Reihenhäuser, 510 m² Flachkollektor
1500 m³ Kies/Wasser-Wärmespeicher



Hamburg-Bramfeld (1996)
124 Reihenhäuser, 3000 m² Flachkollektor,
4500 m³ Heißwasserwärmespeicher



Rostock-Brinkmannshöhe (1999)
108 Wohnungen, 1000 m² Flachkollektor,
20.000 m³ Aquifer-Wärmespeicher



Neckarsulm-Amorbach (1998)
2850 m² Flachkollektor, 20.000 m³ Erdsonden-
Wärmespeicher



Hannover-Kronsberg (2000)
106 Wohnungen, 1350 m² Flachkollektor
2750 m³ Heißwasser-Wärmespeicher



Abb. 18: Pilotanlagen zur solar unterstützten Nahwärmeversorgung.

● Der *Heißwasser-Wärmespeicher* kann unabhängig von der Geologie und auch in kleiner Baugröße, zum Beispiel als Wärmespeicher für einen Zeitraum von Tagen beziehungsweise Wochen, eingesetzt werden. Die wassergefüllte Tragkonstruktion aus beispielsweise Stahlbeton ist teilweise im Erdreich eingebaut. Die Wärmedämmung ist zumindest im Bereich des Deckels und der Seitenwände angebracht. Die wasserdichte Auskleidung des Speichers wurde bei den Projekten in Rottweil, Hamburg und Friedrichshafen (Abb. 18) aus Edelstahlblech ausgeführt. In Hannover kommt eine neuartige Betonmischung zum Einsatz, deren Wasserdampfdurchlässigkeit so gering ist, dass auf eine zusätzliche Auskleidung verzichtet werden kann. Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich von 30 bis 95 °C betrieben. Die

Ladewechseinrichtungen, das heißt die Vorrichtungen zur Be- und Entladung, sind als Prallteller ausgeführt, um eine Durchmischung des Speicherinhaltes zu verhindern. Eine Alternative zur beschriebenen Betonkonstruktion stellen Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen dar (Abb. 21).

● Beim *Kies/Wasser-Wärmespeicher* wird eine mit wasserdichter Kunststoffolie ausgekleidete Grube mit einem Kies/Wasser-Gemisch als Speichermedium gefüllt (Abb. 22). Der Speicher ist seitlich und oben, bei geeigneter Druckfestigkeit des Dämmstoffes auch unten wärmegeklämt. Die Ein- und Ausspeicherung der Wärme erfolgt über direkten Wasseraustausch oder indirekt über Rohrschlangen. Eine statische Tragkonstruktion ist nicht notwendig, da die auftretenden Lasten über den Kies an die Seitenwände und den Boden abgetragen werden. Derzeit eingesetzte Abdichtfolien begrenzen die Maximaltemperaturen auf ca. 90°C. Bedingt durch die geringere Wärmekapazität des Kies/Wasser-Gemisches im Vergleich zu Wasser muss das Speichervolumen ca. 50 Prozent größer gewählt werden, um die gleiche Wärmemenge wie in einem Heißwasser-Wärmespeicher speichern zu können. Speicher dieser Art sind am ITW der Universität Stuttgart seit 1985 sowie in Chemnitz, Augsburg und Steinfurt-Borghorst in Betrieb.

Langzeit-Wärmespeicher

Die Entwicklung von Speichertypen zur saisonalen Wärmespeicherung wird am ITW seit 1984 kontinuierlich durchgeführt. Basierend auf früheren Forschungsvorhaben wurden nachfolgende Speichertypen (Abb. 20) konzipiert. Die Entscheidung für einen bestimmten Speichertyp hängt im Wesentlichen von den örtlichen Gegebenheiten, dem Volumen und insbesondere von den geologischen und hydro-geologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab.

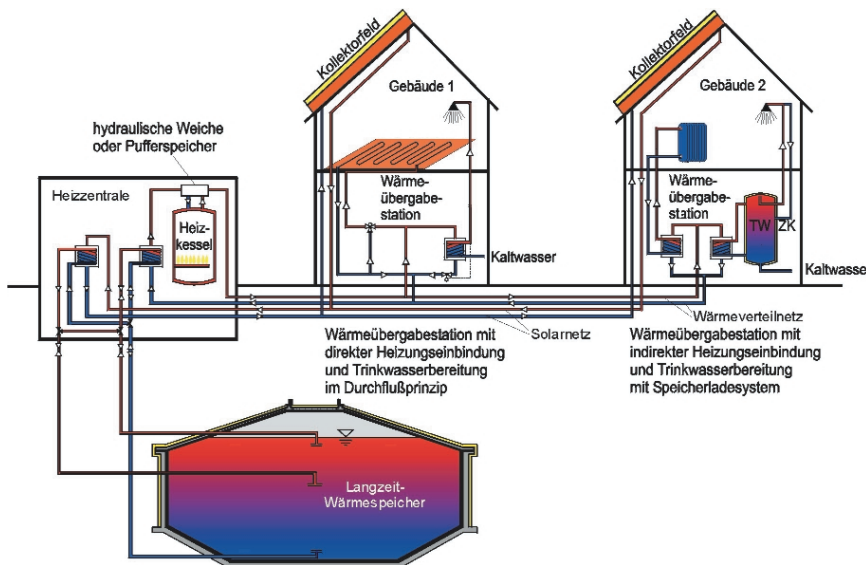
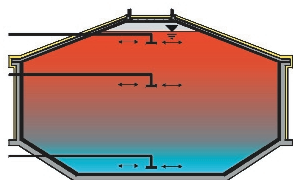
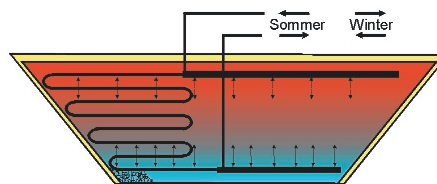


Abb. 19: Schema einer solar unterstützten Nahwärmeverorgungsanlage.

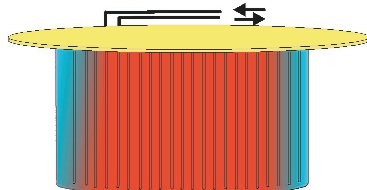
Heißwasser-Wärmespeicher



Kies/Wasser-Wärmespeicher



Erdsonden-Wärmespeicher



Aquifer-Wärmespeicher

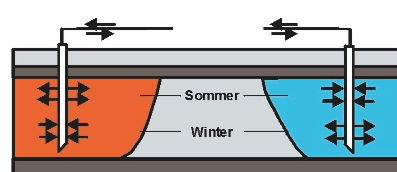


Abb. 20: Langzeit-Wärmespeichertypen.



Abb. 21: Heißwasser-Wärmespeicher (12 000 Kubikmeter) während der Bauphase (Friedrichshafen).



Abb. 22: Aufbau des Kies/Wasser-Wärmespeichers (1500 Kubikmeter) in Steinfurt-Borghorst.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Forschungsprojektes wird derzeit an der Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie am ITW gearbeitet. In diesem Zusammenhang wird in absehbarer Zeit der fortschrittlichste Kies/Wasser-Wärmespeicher Deutschlands an der Universität Stuttgart entstehen.

- Beim *Erdsonden-Wärmespeicher* wird die Wärme in den Untergrund ein- beziehungsweise aus diesem ausgespeichert. Abbildung 23 zeigt verschiedene Typen von Erdwärmesonden sowie einen vertikalen Schnitt durch eine Erdwärmesonden-Bohrung. Geeignete Untergründe für Speicher dieser Art sind wassergesättigte Tone beziehungsweise Tonsteine mit keiner oder nur geringer Grundwasserbewegung. Typische Werte für Bohrloch-Durchmesser liegen bei 100 bis 200 Millimeter, Abstände zwischen zwei Bohrlochern bei 1,5 bis 3 Meter, Bohrloch-tiefen bei 20 bis 100 Meter. Aufgrund seiner Bauweise kann dieser Speichertyp nur zur Oberfläche hin wärmege-dämmt werden. Aufgrund der dadurch bedingten höheren Wärmeverluste zu den Seiten beziehungsweise nach unten hin sind nur große Speicher (> 50 000 Kubikmeter) dieses Typs sinnvoll, bei denen kleine Ober-flächen/Volumen-Verhältnisse er-reicht werden können. Maximale Spei-chertemperaturen liegen bei ca. 80 °C, begrenzt durch die Lebensdauer des Erdwärmesonden-Materials. Durch die geringere Wärmekapazität des Spei-chermediums gegenüber Wasser und aufgrund einer geringeren Temperaturspreizung im Betrieb müssen Wärmespeicher dieser Bauart im Vergleich zu Heißwasser-Wärmespeichern ein etwa drei bis fünfmal größeres Volumen be-sitzen. Vorteil dieses Speichertyps ist der im Vergleich zum Heißwasser-Wär-mespeicher geringere Bauaufwand so-wie ein möglicher modularer Aufbau beziehungsweise eine sich dem Bau-fortschritt eines Wohngebietes anpas-sende Speichergröße.
- Beim *Aquifer-Wärmespeicher* werden natürlich vorkommende, nach oben und unten abgeschlossene Grundwas-serschichten zur Wärmespeicherung genutzt. Über eine Brunnenbohrung („kalte Bohrung“) wird dem Speicher Grundwasser entnommen, dieses über

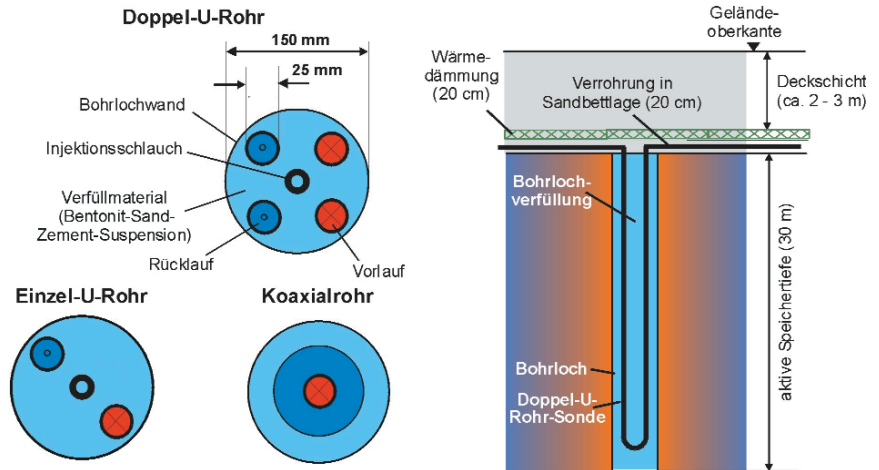


Abb. 23: Aufbau von Erdwärmesonden.

einen Wärmeübertrager erwärmt und über eine weitere Bohrung („warme Bohrung“) wieder in den Untergrund eingeleitet. Die Ausspeicherung erfolgt durch eine Umkehrung der Durchströmungsrichtung. Aquifer-Wärmespeicher stellen sehr hohe Anforderungen an die geologischen Verhältnisse des jeweiligen Standortes bezüglich hydraulischer Durchlässigkeit, Grundwasserfließgeschwindigkeit, biologischer und chemischer Zusammensetzung des Grundwassers. Sie können nicht zur Umgebung hin wärmege-dämmt werden. Wie beim Erdsonden-Wärmespeicher sind Speicher mit hoher Temperatur deshalb nur bei großen Speichern zu empfehlen. Bei Temperaturen oberhalb 50°C kann es je nach örtlichen Gegebenheiten zu biologischen und geochemischen Ver-änderungen des Grundwassers kom-men. Dies kann gegebenenfalls zu Ab-lagerungen an Wärmeübertragern und den Brunnenfiltern führen, wodurch es im Extremfall zu einem Erliegen der Förderfähigkeit der Brunnen kommen kann. Um dies zu verhindern, muss in solchen Fällen eine geeignete Wasser-aufbereitung während des Betriebs er-folgen (Abb. 24).

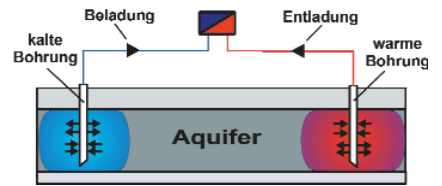


Abb. 24: Aufbau eines Aquifer-Wärmespeichers.



Abb. 25: Außenprüfstände für Kollektoren und Solaranlagen am Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen, Stuttgart.

Thermodynamik und Wärmetechnik ein-gerichtet. Das TZS, seit 2002 akkredi-tiert, hat sich seitdem zu Deutschlands größtem Prüfinstitut für thermische Solaranlagen und ihre Bauteile entwickelt (Abb. 25).

Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)

Um die langjährige Erfahrung bei der Durchführung von Freigelände- und Labortests an kleinen thermischen Solaranlagen der Industrie direkt als Dienstleistung zur Verfügung zu stellen, wurde 1993 das Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) am Institut für

Numerische Untersuchungen

Der heutige Entwicklungsstand bei Kollektoren und Speichern wurde überwiegend auf der Basis von experimentellen Untersuchungen erreicht, wozu zum Beispiel Temperaturfelder punktuell vermessen oder per Infrarot-Thermographie erfasst wurden. Mit Hilfe von thermo-fluid-dynamischen Berechnungen (Anwendung von CFD-Programmen [Computational Fluid Dynamics]) lassen sich Parameteruntersuchungen und Optimierung solar-thermischer Anlagenkomponenten vielfach schneller und preisgünstiger durchführen. Die zur Validierung der numerischen Ergebnisse erforderliche Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldinformation kann mittels einer PIV/TLIF-Messeinrichtung bereitgestellt werden.

Modernste Außenteststände, Versuchs- und Messeinrichtungen bieten die Voraussetzungen zur Durchführung normgerechter Prüfungen an Sonnenkollektoren, Warmwasserspeichern, solaren Trinkwassererwärmungsanlagen und Kombianlagen. Neben Optimierungen von Solaranlagen und deren Komponenten mittels Simulationsstudien werden Gutachten und Vergleichstests von thermischen Solaranlagen und ihren Komponenten im Auftrag durchgeführt.

Ergebnisse des letzten Vergleichstests der Stiftung Warentest im Jahr 2002, bei dem 16 Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und elf Kombianlagen verschiedener Anbieter gegenübergestellt wurden, zeigen eine deutliche Verringerung der Anlagenkosten, verursacht durch eine zunehmende Standardisierung der Anlagenkomponenten sowie des Wettbewerbs am Markt (Abb. 26).

Auslegungskriterien für die Dimensionierung der von der Stiftung Warentest untersuchten Solaranlagen lieferte ein Einfamilienhaus am Standort Würzburg, das über eine nach Süden ausgerichtete und mit 45° geneigte Dachfläche verfügt. Der tägliche Warmwasserverbrauch beträgt 200 Liter bei 45°C. Wärmetechnische Gebäudekenngrößen entsprechend der Energieeinsparverordnung ergaben bei 130 Quadratmetern Wohnfläche einen Jahresheizwärmebedarf von 9 090 Kilowattstunden. Abbildung 27 zeigt die mit den geprüften Anlagen erzielten Energieeinsparungen und Wärmepreise. Die Kostenberechnung erfolgte nach der Annuitätenmethode (Zinssatz vier Prozent, Lebensdauer 20 Jahre) ohne Berücksichtigung einer eventuellen Förderung. Die minimale energetische Amortisationszeit als der Zeitraum, der erforderlich ist, die für Herstellung, Verpackung und Transport aufgewendete Energie wieder einzusparen, beträgt bei Trinkwassererwärmungsanlagen 1,3 Jahre und bei Kombianlagen zwei Jahre.

Nachfolgend werden exemplarisch numerische Ergebnisse zur zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Temperaturschichtung beim Be- und Entladen von Wasserwärmespeichern sowie Maßnahmen zur Minimierung der Wärmeverluste von Speichern vorgestellt.

Beispiel 1: Wasser-Wärmespeicher werden oftmals mit Ladewechseleinrichtungen (zum Beispiel Diffusoren oder Prallblechanordnungen) ausgestattet, worunter eine spezielle Gestaltung der hydraulischen Zu- und Abflussanschlüsse für das Wärmeträgermedium zu verstehen ist. Diese Ladewechseleinrichtungen dienen der Strömungsbildung beim Be- und Entladen des Speichers und sind so zu gestalten, dass eine Temperaturschichtung im Speicher möglichst aufrecht erhalten wird.

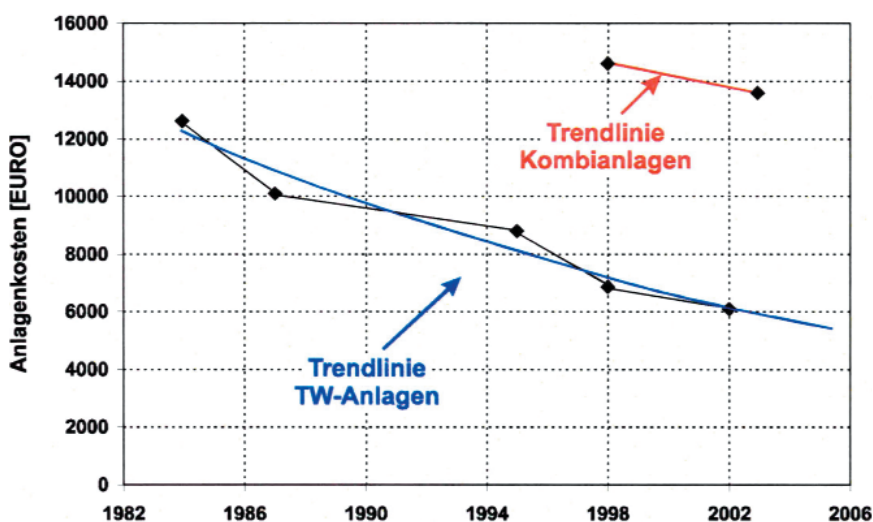


Abb. 26: Entwicklung der Anlagenkosten (Quelle Stiwa).

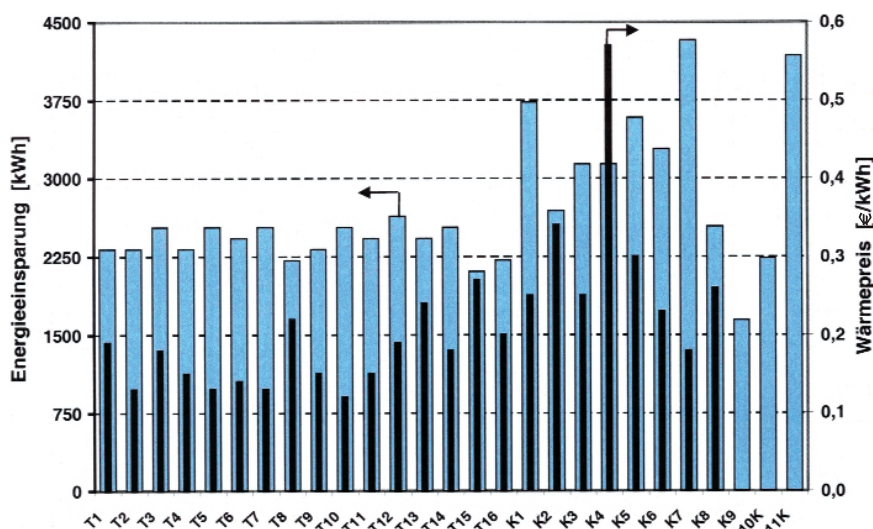


Abb. 27: Energieeinsparung und Wärmepreis für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung (T) und Kombianlagen (K).

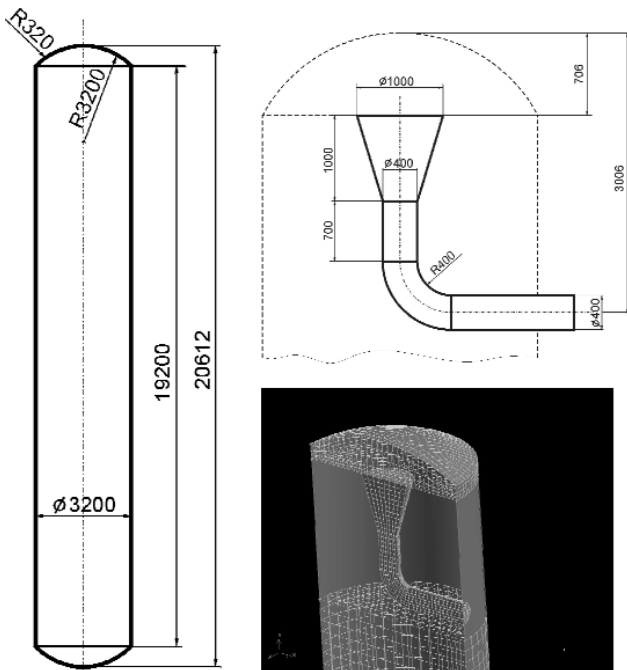


Abb. 28: Speichergeometrie, Diffusorgeometrie und Diffusorvernetzung.

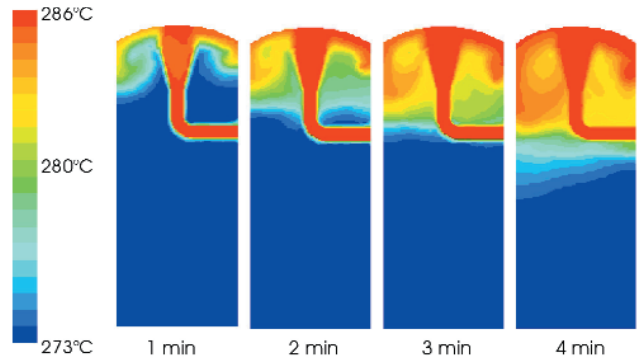


Abb. 29: Zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung im Speicher.

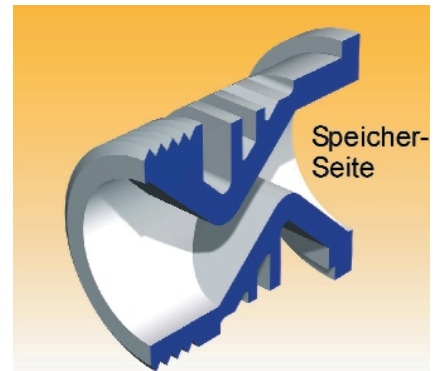


Abb. 31: Konvektionsbremse CONVECTROL der Fa. Wagner Co.

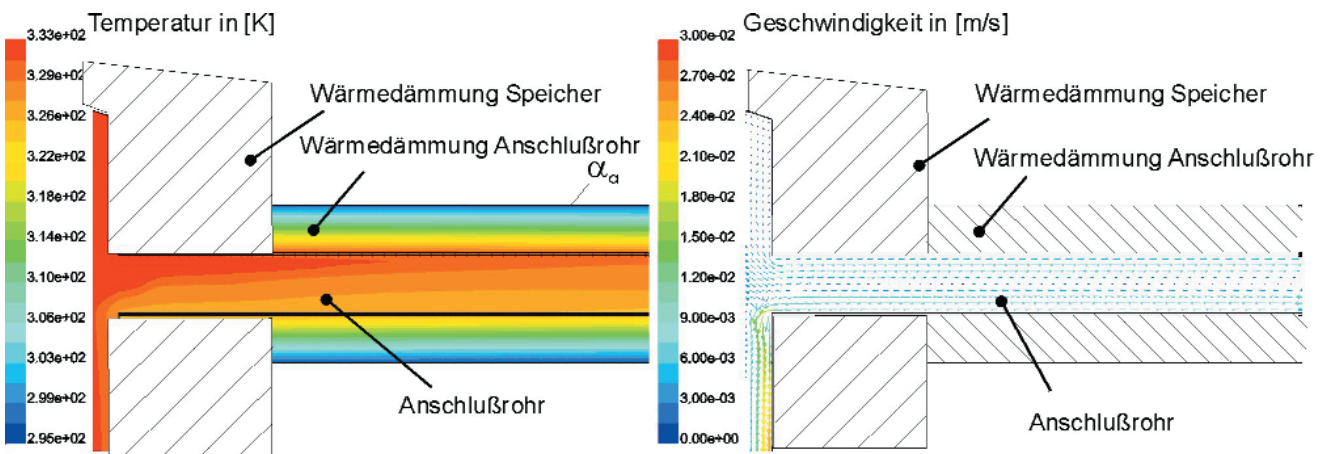


Abb. 30: Temperatur- und Strömungsfeld am Anschluss ohne Konvektionsbremse.

Für einen Speicher entsprechend Abbildung 28, der mit Diffusoren als Ladewechselanordnung ausgestattet wurde und Wasser-Glykol als Wärmeträgermedium verwendet, kann mittels numerischer CFD-Berechnungen das Ausbilden einer stabilen geschichteten Entladung nachgewiesen werden (Abb. 29). Die Entladung erfolgte beim berechneten Beispiel mit einem Volumenstrom von 300 Kubikmetern pro Stunde.

Beispiel 2: Wärmeverluste von Warmwasserspeichern treten insbesondere durch Wärmebrücken auf, wie sie zum Beispiel bei der Durchführung von Rohranschlüssen durch die Wärmedämmung entstehen. Verursacht wird der

Wärmeverlust unter anderem dadurch, dass warmes Fluid aus dem Speicher in das Anschlussrohr strömt, sich aufgrund von Wärmetransport an die kältere Umgebung abkühlt, nach unten sinkt und so erkaltet wieder zurück zum Speicher strömt. Dieser als Einrohrkonvektion bezeichnete Effekt führt zu einer schleichen thermischen Entladung des Wärmespeichers. Abbildung 30 zeigt die sich dabei einstellenden thermischen und fluiddynamischen Verhältnisse im wandnahen Speicherbereich und Anschlussrohr. Mit Hilfe numerischer Berechnungen wurde die Wirksamkeit einer von der Firma Wagner & Co. zur Reduzierung der Einrohrkonvektion entwickelten Konvektionsbremse untersucht. Das Prinzip der

in Abbildung 31 gezeigten Konvektionsbremse ist dem eines Thermosiphons ähnlich. Warmes Speicherwasser befindet sich im oberen Teil, kälteres Wasser aus den Anschlussrohren im unteren Teil der Konvektionsbremse. Ein durch Konvektionströmungen verursachter Wärmeverlust wird dadurch verringert, dass

Wechselwirkungen ■ warmes Wasser geringerer Dichte das
 Jahrbuch 2004 ■ kältere Wasser größerer Dichte verdrängen muss. Die in Abbildung 32 gezeigten numerischen Ergebnisse der thermischen Verhältnisse im Anschlussrohr mit Konvektionsbremse ergaben bei den vorgegebenen Simulationsbedingungen eine Reduzierung der Wärmeverluste um ca. 27 Prozent.

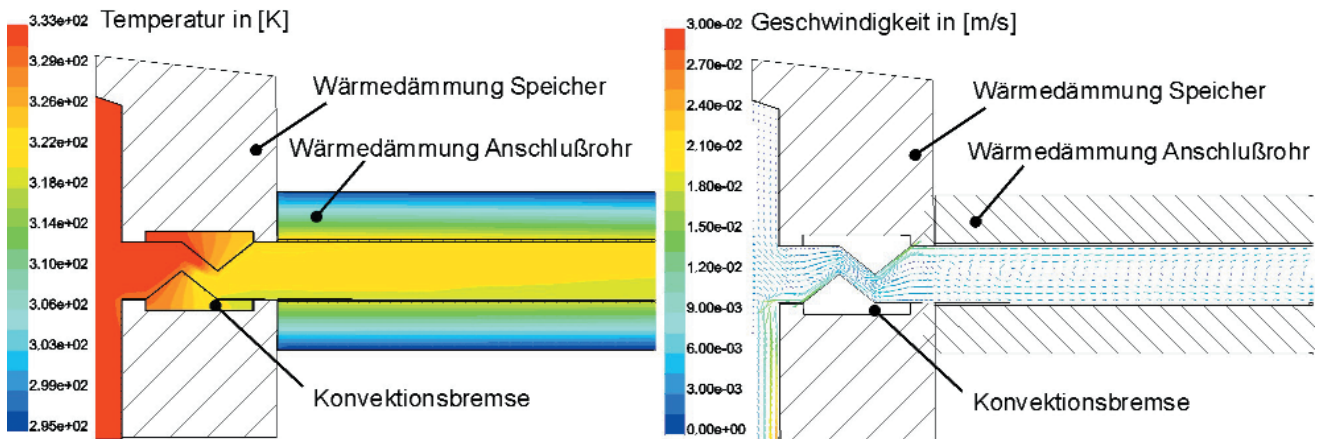


Abb. 32: Temperatur- und Strömungsfeld am Anschluss mit Konvektionsbremse.

Literatur

Hahne, E. et. al.: Solare Nahwärme - Ein Leitfad für die Praxis, Bine-Informationspaket, TÜV-Verlag Köln, 1998, ISBN 3-8249-0470-5

M. Benner, W. Heidemann, E. Hahne, H. Müller-Steinhagen: Entwicklungen bei Langzeit-Wärmespeichern: Erfahrungen aus den in Deutschland realisierten Anlagen, Fachkonferenz der VDI-Gesellschaft Energietechnik, Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung, Schwerpunkt: Dezentrale Energietechnik, Speichersysteme, Ruhr-Universität Bochum, 13.-14. März 2001

H. Drück, H. Kerskes, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen: Solare Kombianlagen der nächsten Generation-Advanced Solar Combsystems, Tagungsband zum zwölften Symposium Thermische Solarenergie, Seiten 59 - 63, Otti, Regensburg, 2002, ISBN 3-934681-20-4

Stiftung Warentest (Stiwa), Berlin, Test Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung „Eine Technik zum Erwärmen“, Zeitschrift test, Ausgabe 4/2002, S. 56 - 61, April 2002

Stiftung Warentest (Stiwa), Berlin, Test solare Kombianlagen „Sonne tanken“, Ausgabe 4/2003, S. 69 - 73, April 2003

BINE Informationsdienst: Solare Heizungsunterstützung mit Kombianlagen, BINE projektinfo 5/01

H. Drück, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen: Vergleichstest von Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung, Tagungsband zum dreizehnten Symposium Thermische Solarenergie, Seiten 131 - 136, Otti, Regensburg, 2004, ISBN 3-934681-26-3

H. Drück, S. Fischer, H. Kerskes, S. Bachmann, E. Streicher, M. Hampel, M. Peter: Unterlagen zum Workshop Thermische Solaranlagen, Intersolar 2004, Freiburg, 2004



**Dr.-Ing.
Wolfgang Heidemann**

Geboren am 18. September 1959 in Fellbach, studierte von 1979 bis 1984 Maschinenbau an der Universität Stuttgart, wo er 1995 promovierte. Für seine Doktorarbeit zum Thema „Rechnerische Lösung instationärer Temperaturfelder in geschlossener und diskreter Form“ wurde ihm der VMI-Förderpreis des Verbandes der Metallindustrie Baden-Württemberg verliehen. Seit 1985 ist Wolfgang Heidemann wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik und leitet seit 1999 die Abteilung Rationelle Energienutzung und Solartechnik.

