

Geht man – wie meist üblich und praxistauglich – von der Substitution von fossilen Energieträgern aus, ist für das ausschließlich konventionelle System meist auch kein oder nur ein sehr kleiner Speicher erforderlich; damit wird der Speicher nur durch das Solarsystem verwendet.

$$D_s = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{Zusatz}}}{\dot{Q}_{\text{Bedarf}}} \quad (4.18)$$

4.2 Systemtechnische Beschreibung

Neben dem Kollektor besteht eine solarthermische Anlage aus weiteren Systemelementen. Unabdingbar sind dabei ein flüssiges oder gasförmiges Wärmeträgermedium und Leitungen zum Wärmeträgertransport. Im Regelfall sind weiterhin ein Wärmespeicher mit keinem, einem oder mehreren Wärmeübertragern sowie bei bestimmten Konzepten Pumpen mit Antrieb zur Aufrechterhaltung des Wärmeträgerkreislaufes sowie Mess- und Regeleinrichtungen notwendig.

4.2.1 Kollektoren

Kollektoren sind Bestandteile solarthermischer Anlagen, welche die Solarstrahlung teilweise in Wärme umwandeln. Ein Teil dieser Wärme wird anschließend von einem Wärmeträgermedium, das den Kollektor durchfließt, abgeführt. Dazu besteht ein Kollektor aus mehreren Bauteilen, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Bauteile von Kollektoren. Abb. 4.3 zeigt die wesentlichen Bauteile eines nicht strahlungskonzentrierenden Flüssigkeits- oder Luftflachkollektors. Demnach besteht ein Kollektor aus dem Absorber, der transparenten Abdeckung, dem Gehäuse und der Wärmedämmung. Zusätzlich sind die Wärmeträgerzufuhr und -abfuhr sowie die Befestigungsmöglichkeiten dargestellt. Je nach Kollektorbauart sind nicht alle dargestellten Bauteile vorhanden. Unbedingt notwendig ist aber der Absorber mit den entsprechenden Leitungen für das Wärmeträgermedium. Bei den meisten Bauarten sind allerdings die anderen der im Folgenden beschriebenen Komponenten ebenfalls Kollektorbestandteile.

Absorber. Der Absorber dient zur Umwandlung von kurzwelliger Strahlung in Wärme (photothermische Wandlung). Die Funktion "Strahlungsabsorption" übernimmt ein Absorbermaterial mit möglichst hohem Absorptionsvermögen im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes. Umgekehrt wird ein niedriges Absorptions- und damit Emissionsvermögen im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung angestrebt. Zusätzlich muss der Absorber eine gute Wärmeleitung zum Wär-

meträger ermöglichen und außerdem temperaturbeständig sein, da üblicherweise im Absorber Temperaturen bis 200 °C auftreten; bei strahlungskonzentrierenden Kollektoren liegen die Temperaturen im Regelfall noch deutlich darüber.

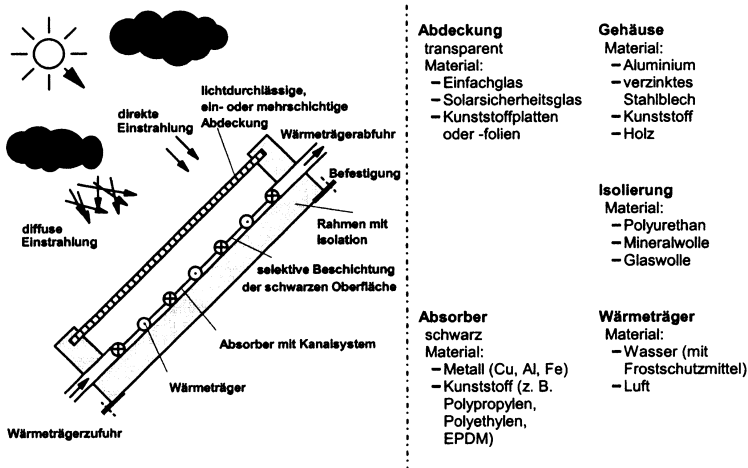


Abb. 4.3 Nichtstrahlungskonzentrierender Flüssigkeitskollektor mit wesentlichen Bauteilen und verwendeten Materialien (nach /4-7/)

Entsprechend diesen Anforderungen kommen als Absorbermaterial vorwiegend Metalle oder Kunststoffe in Frage. Dieses Grundmaterial wird auf der strahlungsempfangenden Seite im einfachsten Fall schwarz angestrichen (maximale Absorbertemperatur ca. 130 °C). Bei einer Vielzahl von Absorbern wird diese Seite auch selektiv beschichtet (maximale Absorbertemperatur ca. 200 °C).

Das Wärmeträgermedium strömt durch Kanäle im Absorberinneren. Der im Absorber in Wärme umgewandelte Energieanteil der auf den Absorber auftreffenden Strahlung wird z. T. an das durchströmende Medium (mittels Wärmeleitung) abgegeben. Das Rohrleitungssystem im Absorber kann sich hinsichtlich Rohrmaterial, Rohrquerschnitt, Rohrleitungslänge und Rohrleitungsanordnung im Kollektor unterscheiden.

Abdeckung. Die transparente Abdeckung eines Kollektors sollte für die Solarstrahlung möglichst durchlässig sein und die langwellige thermische Rückstrahlung des Absorbers zurückhalten. Gleichzeitig sollte sie konvektive Wärmeverluste an die Umgebung reduzieren.

Als Material kommen Glasscheiben, Kunststoffplatten oder Kunststofffolien (z. B. aus Polyethylen oder Teflon) in Frage. Die hohen Materialbeanspruchungen verursachen bei Kunststoffen oft Versprödung und Blindwerden. Außerdem kann die äußere Oberfläche leicht durch Witterungseinflüsse verkratzt werden. Dadurch sind die Transmissionswerte von Kunststoffabdeckungen oftmals nicht langzeitstabil. Daher hat sich bei den meisten Anwendungsfällen Glas durchgesetzt. Es ist

zum Einsatz im Sonnenkollektor meistens als Sicherheitsglas ausgeführt und durch hohe Lichtdurchlässigkeit und Hagelbeständigkeit gekennzeichnet. Zusätzlich kann durch einen niedrigen Eisengehalt das Absorptionsvermögen im langwelligeren Strahlungsbereich herabgesetzt werden. Dadurch wird ein Aufheizen der Scheibe vermieden, und die konvektiven Wärmeverluste an die kältere Umgebung werden herabgesetzt. Oft sind infrarotreflektierende Schichten an der unteren Seite der Abdeckung aufgedampft mit dem Ziel, die langwellige Wärmestrahlung vom Absorber an die Abdeckung in Richtung Absorber zu reflektieren; damit können die Verluste weiter reduziert werden.

Gehäuse. Aufgabe des Gehäuses ist die Aufnahme der für die Strahlungstransmission, Strahlungsabsorption, Wärmeumwandlung, Wärmeabfuhr und Isolation notwendigen Komponenten. Es kann aus Aluminium, verzinktem Stahlblech, Kunststoff oder Holz bestehen, verleiht dem Kollektor mechanische Festigkeit und dichtet ihn gegen die Umgebung ab. Allerdings muss eine geringe Ventilation gewährleistet sein, damit Über- oder Unterdruck aufgrund von Temperaturschwankungen abgebaut und eventuell auftretende Feuchtigkeit abgeführt werden kann.

Unabhängig vom Material kann für die Kollektoren, die auf Schrägdächern installiert werden, bei der Gehäusebauart zwischen Gehäusen für die Aufdachmontage (über den Dachziegeln) und Gehäusen für eine Dachintegration unterschieden werden. Im Unterschied zu dachintegrierten Gehäusen sind Aufdachgehäuse auf ihrer Rückseite mit einer Wanne (z. B. aus Aluminium) versehen.

Sonstige Komponenten. Hierzu zählt eine Wärmedämmung aus üblichem Dämmmaterial (z. B. Polyurethan, Glaswolle, Mineralwolle). An der Gehäuseaußenseite ist zur Wärmeträgerzufuhr und -abfuhr jeweils ein Rohr angebracht. Außerdem befinden sich außen am Gehäuse die notwendigen Bauteile für die Kollektorbefestigung. Oft werden bei Aufdachkollektoren auch zusätzliche Bauteile angeboten, mit denen eine Aufdachmontage des Kollektors mit einem bestimmten Winkel gegenüber der Dachneigung realisiert werden kann. Dadurch wird der Energieertrag im Regelfall aber nur marginal erhöht. Bei Indachkollektoren werden oft Bleche für die Einspengelung mitgeliefert. Ist eine Temperaturmessung im oder am Kollektor notwendig, sind für die Aufnahme der Messeinrichtungen Bohrungen oder andere Vorrichtungen vorgesehen.

Montage. Meistens werden Kollektoren auf Schrägdächern installiert; hier stellen die Integration in die Dachhaut oder die Aufdachmontage über den bereits verlegten Dachziegeln gängige technische Lösungen dar. Unabhängig von der Montageart

- muss die Statik des Daches die Kollektorlast aufnehmen (Indachkollektoren sind hierbei oft leichter als die ursprünglich meist vorgesehenen Dachziegel),
- soll die Verankerung im Dach eine Abtrennung der Kollektoren vom Dach (z. B. bei Wind) sicher vermeiden und
- darf die Wärmedehnung der Kollektoren und Leitungen nicht behindert werden.

Die Dachintegration ist unauffälliger und billiger als die Aufdachmontage. Sie wird bevorzugt bei Neubauten oder bei größeren Kollektorfeldern auf bestehenden Dächern eingesetzt. Zusätzlich werden dabei die Kosten der Dacheindeckung im Kollektorbereich eingespart. Bei der nachträglichen Montage werden die Kollektoren oft über den Dachziegeln angebracht. Bei dieser einfacheren Montage wird die Dachhaut nicht verletzt, und bei Undichtigkeiten des Kollektors oder Schäden an der Verglasung sind Folgeschäden am Gebäude weitgehend ausgeschlossen.

Die Montage der Kollektoren auf ebenen Flächen (z. B. auf Flachdächern, in Gärten) erleichtert gegenüber der Schrägdachmontage eine optimale Ausrichtung und Neigung. Meist werden dabei standardisierte Gestelle verwendet, in die der Kollektor integriert wird. Bei der Gestellanordnung müssen Abschattungen vermieden werden. Hierbei kann es sinnvoll sein, die Kollektoren nur vergleichsweise gering zu neigen (z. B. 20°). Infolge der hierdurch geringeren internen Abschattung können dann auf der gleichen Grundfläche insgesamt größere Kollektorflächen aufgestellt werden. Außerdem sinken die Aufständerkosten durch kleinere Gestelle und geringere Windlasten. Der Minderertrag durch eine gegenüber der optimalen Aufständerkung flachere Neigung der Absorberfläche ist bei Anlagen mit kleinen solaren Deckungsgraden gering.

Kollektorbauarten und Anwendungsbereiche. Die verschiedenen Kollektorbauarten können anhand des Wärmeträgermediums und der Art der Strahlungsaufnahme eingeteilt werden. Danach können vier Grundbauarten von Kollektoren unterschieden werden:

- nicht strahlungskonzentrierende Flüssigkeitskollektoren,
- nicht strahlungskonzentrierende Luftkollektoren,
- strahlungskonzentrierende Flüssigkeitskollektoren und
- strahlungskonzentrierende Luftkollektoren.

Innerhalb dieser Grundbauarten gibt es eine Vielzahl von Varianten. Abb. 4.4 zeigt eine Auswahl, von denen sich allerdings nur wenige als Standardlösungen am Markt durchgesetzt haben.

Nicht strahlungskonzentrierende Flüssigkeitskollektoren. Diese am häufigsten angewendete Grundbauart besteht im einfachsten Fall aus einer Absorbermatte mit einem entsprechenden Rohrleitungssystem für den Wärmeträger (Abb. 4.4, links). Oft wird diese Kollektorbauweise als Kollektortyp "Absorber" bezeichnet. Er findet bevorzugt bei der Beheizung von Freibädern Anwendung.

Werden höhere Temperaturniveaus benötigt, kommen meist Flachkollektoren zum Einsatz (Abb. 4.4, links). Sie können mit einer oder mehreren transparenten Abdeckscheiben versehen werden. Um die konvektiven Wärmeverluste vom Absorber an die Abdeckung weiter zu reduzieren, kann der Zwischenraum zwischen beiden evakuiert werden; dann spricht man von einem Vakuum-Flachkollektor, bei dem aufgrund des Druckunterschieds die Abdeckscheibe von innen abzustützen ist.

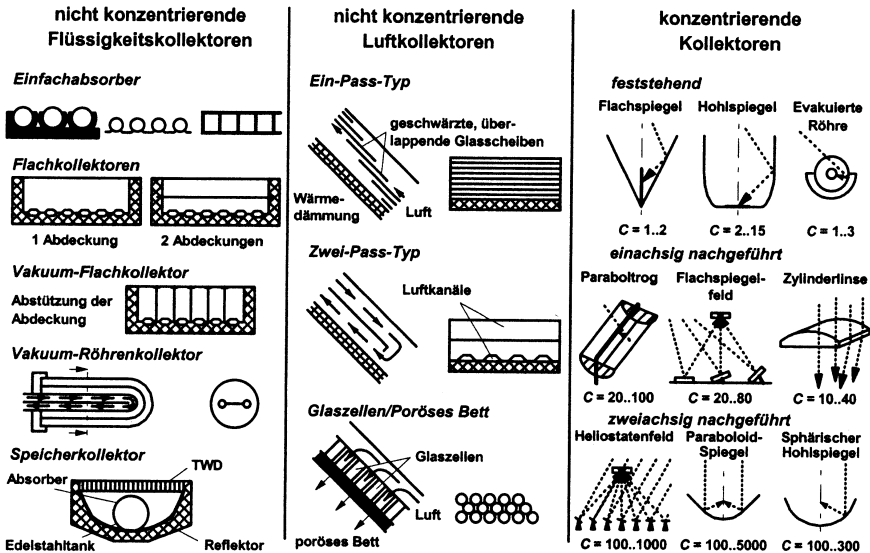


Abb. 4.4 Übersicht über Kollektorbauarten (C Konzentrationsverhältnis; es ist definiert als das Verhältnis von optisch aktiver Kollektorfläche zur bestrahlten Absorberfläche; u. a. nach [4-4])

Der Speicherkollektor (Abb. 4.4, links) ist eine Sonderform des Flachkollektors. Er vereinigt die Funktion des Kollektors und des Wärmespeichers in einem Bauteil. Ein druckbeständiger Tank ist im Zentrum eines strahlungsfokussierenden Spiegels angeordnet. Die Tankoberfläche ist selektiv beschichtet oder schwarz gestrichen. Der Speicherkollektor wird direkt mit der Kalt- und Warmwasserleitung verbunden. Durch den Spiegel wird die im Kollektor ankommende Strahlung auf den Tank reflektiert; das den Tank durchströmende Wasser nimmt Wärme auf und kann, eventuell nach weiterer Aufheizung, genutzt werden. Vorteile dieser Konstruktion sind die geringe Bauteilanzahl und die kompakte Bauweise. Nachteilig wirken sich vor allem die hohen konvektiven Wärmeverluste aus, die zur Folge haben, dass die Temperatur im Speicher in der Nacht oder bei schlechtem Wetter deutlich zurückgeht. Bei der Dachmontage ist das Gewicht des Wassers bei der Dachstatik zu berücksichtigen. Zudem wird dieser Kollektor normalerweise mit normalem Leitungswasser durchflossen; dann besteht unter den in Mittel- und Nordeuropa im Winter gegebenen meteorologischen Bedingungen Frostgefahr.

Eine weitere Sonderform der Flüssigkeitskollektoren ist das Wärmerohr, bei dem die Phasenänderung eines im Wechsel verdampfenden und kondensierenden Arbeitsmediums genutzt wird. Dadurch kann Wärme bei sehr geringen Temperaturdifferenzen übertragen werden. Trotz dieser und weiterer Vorteile (z. B. Selbstregelung, keine Überhitzungsproblematik) konnte sich dieses Konzept aber aufgrund der vergleichsweise aufwändigen Herstellung bislang kaum durchsetzen.

Nicht strahlungskonzentrierende Luftkollektoren. Abb. 4.4 zeigt auch verschiedene Bauformen nicht konzentrierender Luftkollektoren. Aufgrund des geringen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Absorber und Luft muss hier die Kontaktfläche zwischen Absorber und Luftstrom großflächig dimensioniert werden. Ermöglicht wird dies z. B. durch berippte Absorber, Mehrpasssysteme oder poröse Absorberstrukturen.

Da keine Frost-, Überhitzungs- und Korrosionsprobleme auftreten, sind Luftkollektoren im Vergleich zu Flüssigkeitskollektoren einfacher aufgebaut. Auch das Austreten des Wärmeträgermediums durch Leckagen ist vergleichsweise unproblematisch. Dem stehen als Nachteile die großen Kanäle und die oft erheblichen Antriebsleistungen für Ventilatoren entgegen.

Luftkollektoren für die Gebäudebeheizung oder die Brauchwarmwasserbereitstellung kommen in Mittel- und Nordeuropa vor allem deshalb kaum in Frage, weil überwiegend Heizungssysteme auf der Basis von Warmwasserverteilungsnetzen üblich sind. Lediglich in Einzelfällen finden sie auch hier Anwendung; dies ist z. B. bei der solaren Trocknung von Nahrungsmitteln bzw. bei Niedrigenergiehäusern mit Abluftwärmerückgewinnung der Fall, die bereits ein Luftverteil- und Sammelsystem besitzen und so auf ein Wasserheizsystem verzichten können.

Strahlungskonzentrierende Flüssigkeits- oder Luftkollektoren. Bei diesen Kollektorkonzepten wird der direkte Anteil der von der Sonne kommenden Strahlung von Spiegelflächen reflektiert und dadurch auf die Absorberfläche konzentriert. Das Maß für die Konzentration der solaren Strahlung ist das Konzentrationsverhältnis bzw. der Konzentrationsfaktor C . Er ist definiert als das Verhältnis von optisch aktiver Kollektorfläche zur bestrahlten Absorberfläche. Das maximale theoretische Konzentrationsverhältnis von 46 211 berechnet sich aus der Entfernung zwischen der Sonne und der Erde und dem Sonnenradius. Technisch sind derzeit Konzentrationsfaktoren bis maximal 5 000 erreichbar /4-1/, /4-4/.

Vor allem die im Absorber erreichbare Temperatur ist vom Konzentrationsfaktor abhängig (Abb. 4.5). Die theoretisch maximale Absorbertemperatur entspricht bei maximalem Konzentrationsverhältnis gerade der Oberflächentemperatur der Sonne (ca. 5 785 °C). Die real erreichbaren Temperaturen im Absorber sind jedoch deutlich niedriger; mit Rotations-Paraboloid-Spiegeln werden beispielsweise Temperaturen im Absorber von maximal 1 600 °C erreicht /4-4/.

Strahlungskonzentrierende Kollektoren können in drei verschiedene Gruppen eingeteilt werden: feststehende sowie einachsige und zweiachsige nachgeführte Systeme (Abb. 4.4, rechts). Feststehende konzentrierende Kollektoren haben dabei die geringsten und zweiachsige nachgeführte Systeme die höchsten Konzentrationsverhältnisse.

Welches Wärmeträgermedium verwendet wird, hängt vor allem von den erreichbaren Temperaturen ab. Im unteren Temperaturbereich werden Flüssigkeiten vorgezogen. Mit steigender Temperatur werden auch gasförmige Arbeitsmedien eingesetzt.

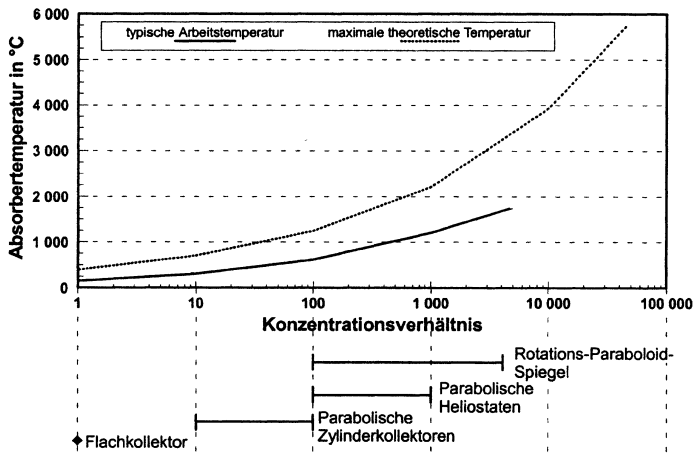


Abb. 4.5 Theoretisch maximale Absorbentemperatur und tatsächliche Temperaturen bei konzentrierenden Kollektoren (u. a. nach /4-1/, /4-4/)

Da nur der Direktanteil der Strahlung konzentriert werden kann, ist die Verwendung von konzentrierenden Kollektoren lediglich in Gebieten mit hohem Direktstrahlungsanteil technisch sinnvoll. In Mittel- und Nordeuropa finden sie daher praktisch keine Anwendung.

Daten und Kennlinien. Für den Kollektorwirkungsgrad sind die optischen Verluste und die Wärmeverluste maßgebend (Kapitel 4.1.4). Die optischen Verluste bestimmen sich aus dem Produkt von Abdeckungstransmissionskoeffizient und Kollektorabsorptionskoeffizient. Dieser Verlustanteil ist lediglich materialabhängig und näherungsweise unabhängig von der Einstrahlung und der Temperatur. Die Wärmeverluste werden zusammen mit den sonstigen nicht konstanten Verlusten durch eine konstante Wärmedurchgangszahl beschrieben (Gleichung (4.11), Kapitel 4.1.4). Dieser Verlustanteil ist in erster Näherung linear abhängig von der Differenz zwischen Absorber- und Umgebungstemperatur und umgekehrt proportional der Einstrahlung (Gleichung (4.14), Kapitel 4.1.5).

Die daraus resultierende Wirkungsgradkennlinie für einen einfachen Flachkollektor ist in Abb. 4.6 dargestellt. Die Annahme der linearen Abhängigkeit von der Temperatur führt bei großen Temperaturdifferenzen zu einer zunehmenden Abweichung vom realen Wirkungsgradverlauf. Ursache ist die nichtlineare Zunahme der Wärmeabstrahlung in diesem Temperaturdifferenzbereich. Daher wird in vielen Fällen auch die Kollektorgleichung (4.12) bzw. die Wirkungsgradgleichung (4.17) verwendet, in denen die Wärmeabstrahlung durch einen quadratischen Term angenähert wird.

Abb. 4.6 zeigt außerdem für den gleichen Kollektor den Kennlinienverlauf für unterschiedliche Einstrahlungen. Deutlich wird, dass mit zunehmender Einstrahlung die Näherungsgerade für den Wirkungsgradverlauf flacher verläuft und damit

eine Veränderung der Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung einen geringeren Einfluss hat. Trägt man die Kennlinie über die auf die Einstrahlung bezogene Temperaturdifferenz auf, verschmelzen die Kennlinien für unterschiedliche Einstrahlungen annähernd zu einer. Daher wird in vielen Fällen diese Darstellungsart bevorzugt (u. a. /4-1/, /4-2/, /4-3/, /4-4/, /4-34/).

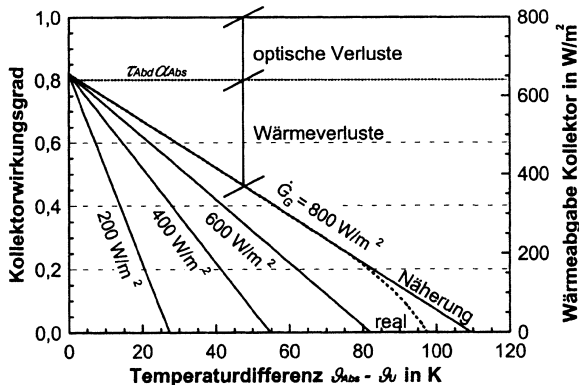


Abb. 4.6 Kennlinienverläufe einfacher Flachkollektoren ($\alpha\tau = 0,82$; \dot{G}_G Globalstrahlung auf die horizontale Empfangsfläche; u. a. nach /4-1/, /4-2/, /4-4/)

Abb. 4.7 zeigt die Kennlinienverläufe für unterschiedliche Bauarten nicht-strahlungskonzentrierender Flüssigkeitskollektoren. Ein Einfachabsorber kann einen deutlich steileren Kennlinienverlauf haben und trotzdem hohe spezifische Energieerträge aufweisen, wenn er ausschließlich in Anwendungsfällen eingesetzt wird, in denen die Differenz zwischen Absorber- und Umgebungstemperatur im Durchschnitt sehr niedrig ist – dies ist z. B. bei Absorbern für die solare Freibadbeheizung der Fall, da sie nur im Sommer betrieben werden und zudem bei der Freibadanwendung das Temperaturniveau der benötigten Wärme niedrig ist. Bei diesen niedrigen Temperaturdifferenzen ist der optische Kollektorstufigrad durch die fehlende Abdeckung ($\tau_{Abs} = 1$) höher als bei den anderen Kollektortypen. Ganzjährig eingesetzte Kollektoren sollten flachere Kennlinienverläufe aufweisen, damit bei höheren Temperaturdifferenzen der Wirkungsgrad nicht zu sehr absinkt.

In Tabelle 4.3 sind einige typische Kenndaten und wichtige Anwendungsbereiche der in Mittel- und Nordeuropa am häufigsten eingesetzten nicht konzentrierenden Flüssigkeitskollektoren dargestellt. Die Temperaturen des Wärmeträgermediums im Kollektor liegen – je nach meteorologischen Bedingungen und Kollektorbauart – im Betrieb zwischen 0 und etwa 100 °C. Typische Anwendungen sind die solare Freibadbeheizung und die teilweise Deckung der Brauchwarmwassernachfrage in Haushalten. Die gekoppelte solarthermische Brauchwarmwasser- und Raumwärmebereitstellung (solares Kombisystem) kommt ebenfalls immer häufiger zur Anwendung. In Österreich und Schweiz sind bereits 50 % und in Deutschland 30 % der errichteten Kollektorfläche solare Kombisysteme /4-46/.

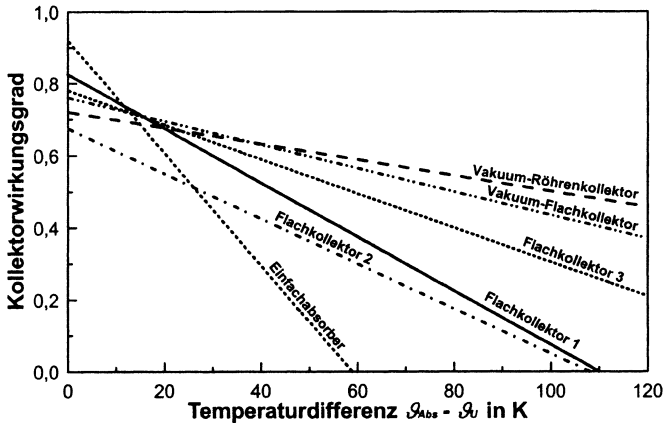


Abb. 4.7 Kennlinienverläufe verschiedener nicht konzentrierender Flüssigkeitskollektoren bei einer solaren Globalstrahlung von 800 W/m^2 (u. a. nach /4-1/, /4-2/, /4-4/)

Kollektorverschaltung. In den meisten Anwendungsfällen sind mehrere Einzelkollektoren zusammengeschaltet. Die Kollektoren können dabei in Reihe oder parallel geschaltet werden; zumeist werden Kombinationen dieser beiden Verschaltungsvarianten eingesetzt. Grundsätzlich wird durch eine Serienschaltung das erreichbare Temperaturniveau erhöht und der Gesamtmassenstrom erniedrigt (Low-Flow). Dem Vorteil, dadurch schnell warmes Wasser verfügbar zu machen, steht dabei als Nachteil ein höherer Wärmeverlust vom Absorber an die Umgebung aufgrund der größeren Temperaturdifferenz entgegen. Der höhere Druckverlust von seriell geschalteten Kollektoren wird durch die geringeren Druckverluste in der Rohrleitung aufgrund des geringeren Gesamtmassenstromes ausgeglichen. Die Pumpenleistung sinkt aufgrund des geringeren Gesamtmassenstroms. Bei der Serienschaltung werden die Kollektorflächen gleichmäßiger durchströmt. Das hydraulische Layout muss auf den Gesamtmassenstrom abgestimmt sein. High-Flow Anlagen werden meist mit internem Wärmeträger zur Wärmeabgabe betrieben; Low-Flow Systeme versuchen dahingegen die Speicher so zu beladen, dass das im Kollektor aufgewärmte Wasser im Speicher nicht wieder durch Mischung abgekühlt wird.

Die Kollektoren sind an je eine Sammelleitung für Zu- und Abfluss angeschlossen. Zur gleichmäßigen Verteilung des Wärmeträgers auf die einzelnen Absorber, und damit der Druckverlust in der Verbindungsleitung und somit die Leistung der Umwälzpumpe gering bleibt, sollte die Sammelleitung einen größeren Durchmesser als die Absorberrohre haben. Aus diesem Grund sollten auch die Fließwege in den parallel geschalteten Kollektoren möglichst gleich sein und Zu- und Abflüsse der Sammelleitungen an gegenüberliegenden Ecken angeschlossen werden (Tichelmann-Verschaltung; u. a. /4-4/). Trotzdem nehmen mit der Anzahl parallelgeschalteter Kollektoren die Durchströmungsunterschiede und damit die Unterschiede der Aufwärmspannen ($\vartheta_{\text{aus}} - \vartheta_{\text{ein}}$) zu. Daher sollten bei großen Kollektor-

feldern die parallel verschalteten Kreise über Strangregulierventile abgeglichen werden.

Tabelle 4.3 Kennwerte verschiedener nichtstrahlungskonzentrierender Flüssigkeitskollektorbauarten (u. a. /4-1/, /4-2/, /4-4/)

	Optischer Wirkungsgrad	Thermischer Verlustfaktor in $W/(m^2 K)$	Typ. Temperaturbereich ^a in $^{\circ}C$	Aufwand für Herstellung	Typische Anwendung
Einfachabsorber ^b	0,92	12 – 17	0 – 30	klein	FB
Flachkollektor 1 ^c	0,80 – 0,85	5 – 7	20 – 80	mittel	WW
Flachkollektor 2 ^d	0,65 – 0,70	4 – 6	20 – 80	mittel	WW
Flachkollektor 3 ^e	0,75 – 0,81	3,3 – 4,0	20 – 80	mittel	WW, RH
Vakuum-Flachkollektor	0,72 – 0,80	2,4 – 2,8	50 – 120	groß	WW, RH, PW
Vakuum-Röhrenkollektor	0,64 – 0,80	1,5 – 2,0	50 – 120	sehr groß	WW, RH, PW
Speicherkollektor ^f	ca. 0,55	0,55	20 – 70	sehr groß	WW

FB Freibad; WW Brauchwarmwasser; RH Raumheizung; PW Prozesswärme; ^a mittlere Arbeitstemperaturen; ^b schwarz, nicht selektiv, nicht abgedeckt; ^c nicht selektiver Absorber, einfache Abdeckung; ^d nicht selektiver Absorber, zweifache Abdeckung aus Glas und Unterspannfolie; ^e selektiver Absorber, einfache Abdeckung; ^f Prototyp ISE.

4.2.2 Weitere Systemelemente

Speicher. Für das physikalische Grundprinzip der solarthermischen Wärmegegewinnung ist ein Wärmespeicher nicht erforderlich. Jedoch sind in fast allen solarthermischen Anlagen Wärmespeicher integriert. Ursache ist die weitgehende Nichtkorrelation von solarem Strahlungsangebot und Wärmenachfrage.

Aufgabe des Speichers ist es, die im Kollektor mittels Solarstrahlung erzeugte Wärme zu speichern und für die Zeitperioden bereitzuhalten, in denen sie benötigt wird. Dazu muss ein Speicher aus dem Wärmespeichermedium, einer festen Umhüllung mit Wärmedämmmaterial sowie Einrichtungen zur Wärmez- und -abfuhr bestehen.

Für das Wärmespeichermedium ist die Wärmekapazität eine wichtige Kenngröße. Darunter versteht man die Wärmemenge, die zur Temperaturerhöhung einer bestimmten Stoffmenge um 1 K notwendig ist. In Tabelle 4.4 sind die spezifischen Wärmekapazitäten (bezogen auf Masse und Volumen) sowie die Dichten verschiedener Wärmespeichermedien dargestellt. Weitere Kriterien technischer Art, die den Einsatz eines Materials als Wärmespeichermedium bestimmen, sind die Verfügbarkeit, die Verträglichkeit mit anderen Materialien (z. B. Korrosionsgefahr) sowie die Umweltverträglichkeit.

Es kommen verschiedene Speicherbauarten zum Einsatz. Eine Einteilung kann nach der Wärmespeicherungsart (chemisch, thermisch) und dem Zustand des Speichermediums erfolgen. Im Bereich der Niedertemperatur-Wärmespeicherung (bis ca. 80 $^{\circ}C$) wird hauptsächlich die thermische Wärmespeicherung angewendet. Dabei können Flüssigkeitsspeicher (Wasserspeicher), Feststoffspeicher und Latentwärmespeicher unterschieden werden.

Tabelle 4.4 Wärmekapazität und spezifische Dichte unterschiedlicher Wärmespeichermedien bei einer Temperatur von 20 °C (nach /4-36/)

	Wärmekapazität in kJ/(kg K)	Wärmekapazität in kJ/(m ³ K)	Dichte in kg/m ³
Wasser	4,18	4 175	998
Kies, Sand	0,71	1 278 – 1 420	1 800 – 2 000
Granit	0,75	2 063	2 750
Ziegelstein	0,84	1 176 – 1 596	1 400 – 1 900
Eisen	0,47	3 655	7 860
Öl	1,6 – 1,8	1 360 – 1 620	850 – 900
Kies-Wasser ^a	1,32	2 895	2 200

^a 37 Vol.-% Wasser.

Flüssigkeitsspeicher (Wasserspeicher). Dies ist der am häufigsten verwendete Speicher. Im einfachsten Fall handelt es sich um ein Freibadbecken, das dabei eine Mehrfachfunktion ausübt. Meist kommen aber für die Speicherung eigens installierte drucklose oder druckbehaltete Tanks zum Einsatz.

Derartige Speicher können direkt oder indirekt be- und entladen werden. Für die in Mittel- und Nordeuropa meist verwendeten Zwangsumlaufsysteme werden in der Regel Druckspeicher mit einem Wärmeübertrager für den Kollektorkreislauf sowie einem Kaltwasserzulauf und einem Warmwasserablauf verwendet. Oft besitzt der Speicher noch einen zweiten Wärmeübertrager oder einen Elektroheizstab für die speicherinterne Nachheizung. Der Speicher ist zumeist in Zonen unterteilt. Die Solaranlage speist die Wärme an der tiefsten und damit kältesten Stelle ein, damit der Kollektor mit höchstmöglichem Wirkungsgrad betrieben werden kann. Das Volumen für die Nachheizung ist am oberen Ende des Speichers. Seine Größe bestimmt sich aus der Leistung und der gewünschten Mindestlaufzeit der Nachheizung (Abb. 4.8).

Als korrosionsbeständiges und langlebiges Tankmaterial kommen Edelstahl bzw. emaillierter oder temperaturfest (ca. 120 °C) beschichteter Stahl zur Anwendung; in Einzelfällen kann auch temperaturbeständiger glasfaserverstärkter Kunststoff eingesetzt werden. Der Tank ist außen mit Mineralwolle, Weichschaum oder Spezialkunststoffen gedämmt. Zur Vermeidung von Kältebrücken sind insbesondere auch Anschlussflansche und Befestigungen gegen Wärmeverluste zu dämmen. Die trotzdem noch vorhandenen Wärmeverluste liegen bei richtig ausgelegten solarthermischen Anlagen zur Brauchwarmwasserbereitstellung im Jahresmittel zwischen 10 und 15 % der vom Kollektor an den Speicher abgegebenen Wärme.

Bei internen Wärmeübertragern ist aufgrund der Temperaturschichtung im Kessel – das schwerere kalte Wasser befindet sich unten, das spezifisch leichtere warme Wasser oben – der Wärmeübertrager des Kollektorkreislaufes unten im Speicher anzuordnen. Das Temperaturprofil im Speicher ist auch die Ursache dafür, dass sich bei direkter Be- und Entladung der Kaltwasserzulauf unten und der Warmwasserablauf oben im Speicher befindet. Der Wärmeübertrager für die in-

terne Nachheizung befindet sich im oberen Bereich des Speichers, so dass das untere Volumen ausschließlich der Solaranlage zur Verfügung steht.

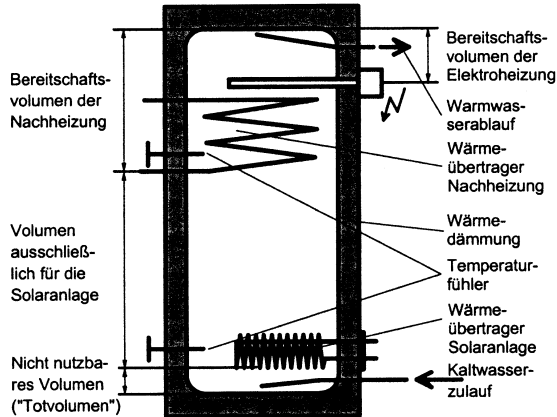


Abb. 4.8 Zonale Unterteilung eines Wasserspeichers für Solaranlagen

Eine Variante dieser Wasserspeicher stellt der Thermosyphon-Speicher dar. Im Gegensatz zu herkömmlichen Speichern wird der untere Wärmeübertrager senkrecht in einem Steigrohr positioniert, so dass bei Betrieb der Solaranlage Wasser aus dem unteren Bereich am Wärmeübertrager vorbeiströmt und der Volumenstrom des jetzt warmen Wasser aufsteigt. Das Steigrohr ist auf der ganzen Länge mit speziell ausgebildeten Austrittsöffnungen versehen. Je nach Temperaturniveau tritt das erwärmte Wasser aus diesen Öffnungen in das Speichervolumen aus, wenn ein weiteres Aufsteigen aufgrund der höheren Temperatur in der darüber liegenden Schicht nicht möglich ist. Dies hat zur Folge, dass je nach Leistung der Kollektoren und damit je nach Solarstrahlungsangebot das erwärmte Wasser immer in der Höhe in den Speicher eingebracht wird, deren Temperaturniveau zur Temperatur des gerade erwärmten Wassers passt. Ein solches Steigrohr wird als Schichtladeeinheit bezeichnet /4-37/ (vgl. Abb. 4.14, rechts).

Bei größeren Kollektorflächen müssen externe Wärmeübertrager eingesetzt werden, da die Wärme mit internen Wärmeübertragern nicht mehr mit den gewünschten kleinen Temperaturverlusten übertragen werden kann. Dies bedingt eine zusätzliche Pumpe zwischen Wärmeübertrager und Speicher. Das durch den Kollektor aufgewärmte Wasser wird entweder an einer oder zwei fixen Höhen oder über eine Schichtladeeinheit in den Speicher eingebracht /4-20/.

Feststoffspeicher. Feststoffspeicher werden vorrangig in Systemen mit Luftkollektoren eingesetzt und sind oft direkt ins Gebäude integriert. Hierbei handelt es sich entweder um Schüttungen aus Kies oder anderem Gestein oder um massereiche Teile des Gebäudes (z. B. Wände, Fußböden, Decken). Beispielsweise kann sich die Schüttung unter dem Erdgeschossfußboden oder senkrecht in einer Ge-

bäudewand befinden. Feststoffspeicher können aber auch mit Flüssigkeit als Wärmeträger betrieben werden.

Bei losen Gesteinsschüttungen wird die warme Luft vom Kollektor von oben zugeführt; sie gibt ihre Wärme an das Gestein ab, bevor sie den Speicher unten wieder verlässt. Die Wärmeabfuhr verläuft in umgekehrter Richtung. Werden die Gebäudeteile direkt als Speicher verwendet, so spricht man von Hypokausten. Die warme Luft wird durch Kanäle in den Bauteilen geführt und wärmt diese auf. Die Bauteile geben die Wärme dann zeitverzögert und mit geringerer Amplitude an das Gebäude wieder ab. Im Gegensatz zu Geröllspeichern können Hypokausten nur geregelt beladen werden, die Wärmeabgabe ist unregelt.

Da die Wärmekapazität von Gestein deutlich niedriger ist als diejenige von Flüssigkeiten, sind für die gleiche Speicherkapazität etwa 2 bis 3 mal größere Volumina notwendig. Zudem erfordert die Wärmeein- und -ausbringung bei geringen Temperaturdifferenzen große Wärmeübertragerflächen, die gleichmäßig im Speicher verteilt sein müssen. In direkt mit dem Wärmeträger durchströmten Schüttungen und den Hypokausten entfällt dieser Wärmeübertrager. Dem Nachteil des größeren Platzbedarfes steht als Vorteil die einfachere Herstellung gegenüber, denn der Gesteinsspeicher wird drucklos betrieben. Weiterhin werden an ihn wenige Anforderungen bezüglich Dichtigkeit gestellt; zudem kann er auch bei sehr hohen Temperaturen betrieben werden.

Latentwärmespeicher. Die Änderung des Aggregatzustands eines Materials erfolgt bei konstanter Temperatur unter Zu- bzw. Abfuhr von Energie. Dabei muss beim Schmelzen oder Verdampfen Wärme zugeführt werden; dementsprechend wird beim Erstarren und Kondensieren Wärme frei. Schmelz- und Erstarrungstemperatur sowie Verdampfungs- und Kondensationstemperatur sind dabei gleich. Die bei diesen Aggregatzustandsänderungen im Material gespeicherte oder von ihm abgegebene Wärme wird als latente, nicht fühlbare Wärme bezeichnet. Erfolgt die Änderung des Aggregatzustandes bei höheren Temperaturen als der Umgebungstemperatur, kann die latente Wärme im Material gespeichert werden. Zur Wärmespeicherung muss entsprechend Wärme zugeführt werden, so dass die Temperatur bis auf die Temperatur der Aggregatzustandsänderung erhöht wird.

Für die Niedertemperatur-Wärmespeicherung wird nur der Phasenwechsel fest zu flüssig genutzt, da die Volumenvergrößerung beim Phasenwechsel flüssig zu gasförmig bei normalen Drücken nur mit großem Aufwand in geschlossenen Speichern beherrscht werden kann.

Latentwärmespeicher zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus. Wärmezu- und -abfuhr können zudem bei jeweils annähernd konstanter Temperatur vorgenommen werden. Nachteilig sind vor allem die beim Phasenwechsel auftretenden Volumenänderungen. Verschiedene Materialien können zudem bei der Wärmeabfuhr unterkühlen. Auch die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit im festen und flüssigen Zustand ist problematisch. Werden anorganische Salze verwendet, treten zusätzlich Korrosionsprobleme auf.

Eine Spezialform des Latentwärmespeichers stellen Sorptions-Speicher dar. Als Sorbens kann z. B. Silikagel eingesetzt werden. Bei der Beladung wird über Wärmezufuhr Wasser aus dem Silikagel ausgetrieben. Dies erfolgt ab Temperaturen von 60 °C; damit kann die Wärme, wie sie mit Sonnenkollektoren bereitgestellt werden kann, gut eingesetzt werden. Das getrocknete Silikagel kann leicht gelagert werden. Zur Wärmeentnahme wird Wasserdampf über das Silikagel geführt, welches in einer exothermen Reaktion das Wasser adsorbiert. Die hierbei entstehende Wärme kann genutzt werden. Der Wasserdampf kann aufgrund niedriger absoluter Betriebsdrücke (10 bis 100 mbar) über Sonnenkollektoren im Winter erzeugt werden. Die Energiedichten werden mit 150 bis 250 kWh/m³ angegeben /4-51/. Bisher sind jedoch noch keine Latentwärmespeicher für Solaranlagen am Markt verfügbar.

Speicherdauer. Bei der Wärmespeicherung werden Kurzzeit-, Tages- und Saisonspeicher unterschieden. Kurzzeitspeicher speichern Wärme lediglich für einige Stunden. Typisches Beispiel ist der bei Speicherkollektoren in den Kollektor integrierte Wassertank. Tagesspeicher sind in der Lage, Wärme einen bis mehrere Tage zu speichern. Dies ist der klassische Anwendungsfall für solarthermische Brauchwarmwasseranlagen und teilsolare Heizungsanlagen mit solaren Deckungsgraden bis ca. 60 %.

Saisonale Wärmespeicher werden vorrangig dann eingesetzt, wenn die solarthermische Anlage zur möglichst vollständigen Wärmenachfragedeckung dienen soll. Dabei werden große Speichervolumina benötigt. Zur Anwendung können Wasser-, Aquifer- und Sondenspeicher kommen.

- Wasserspeicher können über- oder unterirdisch mit wärmegeprägter Stahl- oder Betonumhüllung oder in abgeschlossenen Felskavernen angelegt werden.
- In Aquiferen (d. h. wasserdurchlässige, abgegrenzte Gesteinsformationen) kann die Wärmespeicherung durch Einleitung von warmem und Entnahme von kaltem Wasser über eine bestimmte Brunnenanordnung erfolgen; die Speicherentladung wird genau umgekehrt realisiert (vgl. Kapitel 8).
- Kies-Wasserspeicher bestehen aus einer abgedichteten Wanne, die mit Kies und Wasser gefüllt wird. Diese Speicher sind selbsttragend und daher billig herstellbar. Die Wärmekapazität ist geringer als bei ausschließlichen Wasserspeichern; es kann jedoch ein ähnliches Schichtenverhalten wie bei ausschließlichen Wasserspeichern erzielt werden. Die Wärme wird über Wärmeübertrager in verschiedenen Schichten des Speichers eingebracht bzw. abgeführt.
- Bei Sondenspeichern wird Erde oder Felsgestein als Speichermedium genutzt. Dabei werden vertikale Sonden in den Untergrund gebohrt oder gerammt (vgl. Kapitel 8). Die Ein- und Ausspeicherung der solar erzeugten Wärme erfolgt über entsprechende Rohre, die im Untergrund als Wärmeübertrager dienen. Als Speichermedien kommen vor allem Fels, Lehm oder Ton in Frage. Zu beachten ist, dass der Speicher nicht in einem Gebiet mit Grundwasserstrom liegen darf, da dieser die Wärme ableiten würde.

Mess- und Regeleinrichtungen. Anzahl und Art der Mess- und Regeleinrichtungen hängt weitgehend vom Anlagenkonzept ab. Naturumlaufanlagen beispielsweise benötigen im Regelfall keine aktiven Regelungseinrichtungen. Bei Zwangsumlaufanlagen, die in Mittel- und Nordeuropa hauptsächlich zur Anwendung kommen, wird der Kollektorkreislauf aber meist mit einer Temperaturdifferenzregelung aktiv geregelt. Temperaturfühler am oder im Kollektor und am oder im Speicher messen die Temperatur und setzen sie in elektrische Signale um. Im Speicher wird die Temperatur bei internen Wärmeübertragern in Höhe des Wärmeübertragers, von dem die Wärme vom Kollektorkreislauf an den Speicher abgegeben wird, gemessen. Bei externen Wärmeübertragern wird die Temperatur an der Stelle des Auslasses zum Wärmeübertrager gemessen. Im Kollektor sollte die Messung an der heißesten Stelle in der Nähe des Ausganges zum Speicher erfolgen. Die beiden Temperaturmesssignale werden im Regler miteinander verglichen; liegt die Kollektortemperatur um einen Sollwert höher als die Speichertemperatur, wird die Kollektorkreislaufpumpe eingeschaltet. Sinkt die Temperaturdifferenz um einen zweiten Sollwert ab, wird die Pumpe abgeschaltet. Bei den gängigen solarthermischen Brauchwarmwasseranlagen beträgt der Sollwert der Einschalttemperaturdifferenz 5 bis 7 K. Für den Sollwert der Abschalttemperaturdifferenz sind etwa 3 K üblich. Die Regelung sollte bis auf 1 K genau sein. Zusätzlich ist die Verwendung von Verzögerungsgliedern sinnvoll, da sonst bei längeren Rohrleitungen Temperaturschwingungen auftreten können.

Neben der Regelung der Umwälzpumpe im Kollektorkreislauf bei Zwangsumlaufanlagen hat die Steuerung das Einhalten von Temperaturgrenzwerten im Speicher und im Kollektorkreislauf zu gewährleisten. Die Speichertemperatur darf einen bestimmten maximal zulässigen Wert nicht überschreiten. Bei den gängigen Tanks solarthermischer Brauchwarmwasserbereitungsanlagen kann beispielsweise bei Temperaturen von mehr als 70 °C Kalk abgelagert werden. Auch muss im Kollektorkreislauf ein Verdampfen des Wärmeträgers entweder sicher vermieden oder der ggf. entstehende Dampf in dafür vorgesehene Anlagenteile abgeführt werden.

Zur Vermeidung derartiger bei Kollektorstillstand ggf. auftretender Probleme gibt es verschiedene Möglichkeiten /4-20/.

- Bei Überschreiten der maximal zulässigen Speichertemperatur kann die Umwälzpumpe im Kollektorkreislauf ganz abgeschaltet werden, um eine weitere Energiezufuhr in den Speicher zu vermeiden. In diesem Fall erreicht der Kollektor seine Stillstandstemperatur, die bei selektiv beschichteten Kollektoren weit über 140 °C liegt. Hierbei kommt es zu einem Ausdampfen des Kollektorkollektorsinhalts. Durch die Volumenzunahme bei der Verdampfung wird günstigstenfalls der gesamte Flüssigkeitsinhalt aus dem Absorber gedrückt und von einem entsprechend dimensionierten Ausdehnungsgefäß aufgenommen. Im schlechtesten Fall muss der gesamte Flüssigkeitsinhalt des Kollektors verdampfen und im System wieder kondensiert werden. Dies geschieht normalerweise im Wärmeübertrager zum Speicher. In diesem Fall muss das Ausdehnungsgefäß zusätzlich das Volumen der Rohrleitungen aufnehmen können /4-52/. Das Aus-

dampfen wird in vielen Fällen angewendet, zumal hierbei keine Hilfsenergie benötigt wird. In der letzten Zeit werden auch temperaturbeständige Wärmeträger angeboten, so dass bei dieser Betriebsweise keine Gefahr der vorzeitigen Alterung des Wärmeträgers besteht. Die Umwälzpumpe sollte aber nach einem Kollektorstillstand erst wieder einschalten, wenn die Kollektortemperatur unter 100 °C abgesunken ist, damit sich mit Sicherheit kein ausgedampftes Medium mehr im Kollektor befindet.

- Das Drain-Back Kollektorsystem löst die Stillstandsproblematik dadurch, dass ein Gasvolumen (Stickstoff oder Luft) in die Leitung vom Kollektor zum Speicher entweder im Speicher selbst oder in einem zwischengeschalteten Gefäß eingebunden wird. Beim Betrieb der Anlage rinnt die Wärmeträgerflüssigkeit durch das Gasvolumen. Bei Kollektorstillstand bewegt sich das Gasvolumen in den Kollektor und die Kollektorflüssigkeit füllt den vormaligen Gasraum. Dies geschieht ohne Zusatzenergie, bedingt jedoch, dass sich der Kollektor auch selbsttätig entleeren kann (fallende Rohre, keine "Flüssigkeitssäcke"). Das Gas im Kollektor kann sich nun auf die Stillstandstemperatur erhitzen, ohne dass der Wärmeträger verdampfen muss. Beim Wiederanfahren drückt die Umwälzpumpe das Gasvolumen aus dem Kollektor wieder in den vorgesehenen Behälter. Sie muss daher eine größere Förderhöhe als herkömmliche Umwälzpumpen aufweisen. Das Gasvolumen dient gleichzeitig als Ausdehnungsgefäß. Ist das Gasvolumen so dimensioniert, dass im Stillstand alle Anlagenteile, welche der Außentemperatur ausgesetzt sind, mit Gas gefüllt sind, kann der Kollektorkreis sogar ohne Frostschutz betrieben werden.
- Durch einen Betrieb der Umwälzpumpe in der Nacht kann der Kollektorkreislauf auch zum Kühlen des Speichers benutzt werden. Durch die im Vergleich zum Speicher sehr viel höheren Wärmeverluste des Kollektorkreislaufs kühlt dadurch der Speicher beispielsweise in der Nacht soweit ab, bis eine definierte Grenztemperatur unterschritten wird. Diese Temperatur muss so gewählt sein, dass der Speicher bei schönem Wetter am nächsten Tag vom Kollektor nicht über seine Maximaltemperatur aufgeheizt wird. Nachteilig ist hier, dass diese Art der Kühlung auf den Einsatz von Hilfsenergie angewiesen ist und damit bei Stromausfall keine Wärmeabfuhr mehr erfolgen kann; außerdem müsste eigentlich das Wetter des nächsten Tages für die Entscheidung des Kühlens des Speichers in der Nacht bekannt sein.
- Es kann auch eine eigene Wärmeabfuhrmöglichkeit in das System integriert werden, die von der Regelung je nach Nachfrage angeschaltet wird (z. B. Schwimmbad, Wärmeübertrager am Dach). Aber auch hier stellt sich das Problem der Hilfsenergie.

Neben den beiden Aufgaben – Umwälzpumpenregelung und Grenztemperatureinhaltung – muss eine entsprechende Regelung auch für die Nachheizung im Falle einer zu geringen Einstrahlung sorgen.

Wärmeträgermedium. An das Wärmeträgermedium werden u. a. folgende Anforderungen gestellt:

- hohe spezifische Wärmekapazität,
- niedrige Viskosität, d. h. gute Fließ- und Strömungseigenschaften,
- kein Gefrieren oder Sieden im Betriebstemperaturbereich,
- keine Begünstigung von Korrosion im Leitungssystem,
- keine Brennbarkeit sowie
- Ungiftigkeit und biologische Abbaubarkeit.

Wasser erfüllt die meisten dieser Anforderungen sehr gut. Problematisch ist jedoch die Einfrierungsgefahr bei Temperaturen unter 0 °C. Wasser ohne Zusätze ist daher nur in den wärmeren Zonen der Erde ohne Frostgefahr problemlos verwendbar.

In Mittel- und Nordeuropa werden daher überwiegend Mischungen aus Wasser und Frostschutzmittel verwendet. Dem Frostschutzmittel wird meistens zusätzlich noch ein Korrosionsschutzmittel beigemischt, da Mischungen aus Wasser und Frostschutzmittel korrosiver wirken als reines Wasser. Die gängigsten Stoffe sind Äthylenglykol und Propylenglykol; bei Brauchwarmwasseranlagen wird meistens das lebensmittelechte Propylenglykol eingesetzt. Nachteile dieser Beimischung sind die im Vergleich zu Wasser geringere spezifische Wärmekapazität, die höhere Viskosität und die verringerte Oberflächenspannung. Die Mischung kann daher durch Poren dringen, die für reines Wasser undurchlässig sind. Zudem sind die Druckverluste höher und der Wärmeübergang schlechter, so dass wesentliche Komponenten (Pumpen, Leitungsquerschnitte, Wärmeübertrager) an dieses Gemisch angepasst werden müssen /4-21/. Seit kurzem sind auch speziell für Solaranlagen mit Stillstandsbetrieb bis 290 °C beständige Wärmeträger auf Basis von Propylenglycol in Verbindung mit Alkylenglykolen und vollentsalztem Wasser verfügbar /4-40/.

Leitungen. Kollektor und Speicher werden durch Leitungen miteinander verbunden. Anlagengröße und Absorbermaterial bestimmen hier die Materialauswahl. Meistens werden Rohre aus hartem oder weichem Kupfer oder Edelstahl-Wellrohre eingesetzt; daneben kommen auch Rohre aus Stahl und Polyethylen zur Anwendung. Besteht der Absorber aber aus Aluminium, ist die Verwendung von Kupferrohren aufgrund der damit verbundenen Korrosionsgefahr nicht sinnvoll und es muss zumindest eine galvanische Trennung vorhanden sein.

Im praktischen Betrieb solarthermischer Anlagen zur Brauchwarmwasserbereitstellung sind je Quadratmeter Kollektorfläche Durchflüsse von 30 bis 50 l/h üblich. Seit einigen Jahren werden auch Anlagen mit geringeren Durchflüssen (10 bis 15 l/h je Quadratmeter Kollektorfläche), sogenannte Low-Flow Konzepte, eingesetzt (u. a. /4-4/, /4-20/). Schon bei einem einzigen Durchlauf durch den Kollektorkreislauf kann hier der Wärmeträger um die gewünschte Temperaturdifferenz erwärmt werden. Den Vorteilen der geringeren Druckverluste in den Leitungen und der schnelleren Bereitstellung warmen Wassers aus dem Kollektorkreislauf aufgrund der höheren Temperaturen im Kollektor stehen aber höhere Wärmeverluste im Kollektor und damit geringere spezifische Energieerträge entgegen. Außerdem ist bei diesen Systemen eine längere Serienschaltung der Kollektoren

notwendig, um turbulente Strömung und damit einen guten Wärmeübergang im Kollektor zu erhalten. Solche Low-Flow Konzepte sind außerdem nur über externe Wärmeübertrager in Verbindung mit mehreren Einspeisehöhen in den Speicher oder Schichtladeeinheiten über externe bzw. speziell konstruierte interne Wärmeübertrager sinnvoll (vgl. Abb. 4.14, rechts).

Querschnitt und Verlegungsart der Rohre bestimmen den zu überwindenden Druckabfall und die in den Leitungen enthaltene Masse des Wärmeträgermediums. Große Querschnitte vermindern den Druckabfall; sie erschweren aber die Regelung, da die träge Masse des Rohrleitungsnetzes mit dem Querschnitt zunimmt. Außerdem vergrößert sich dadurch auch die Leitungsoberfläche, wodurch die Wärmeverluste entsprechend ansteigen.

Zur Verminderung der Wärmeverluste sind die Leitungen des Kollektorkreislaufes zu dämmen. Als Materialien kommen Mineralwolle, Polyurethan-Rohrschalen und Schaumgummi in Frage. Zunehmend werden zur schnellen Montage vorisolierte Doppelrohre aus Edelstahl-Wellrohr mit inkludierter Kollektorführlleitung verwendet.

Die trotz der Wärmedämmung noch auftretenden Wärmeverluste in den Leitungen liegen bei den gängigen solarthermischen Anlagen zur Warmwasserbereitstellung bei etwa 10 bis 15 % der vom Kollektor abgegebenen Energie /4-1/.

Wärmeübertrager. Wärmeübertrager, früher auch als Wärmetauscher bezeichnet, dienen der Wärmeübertragung von einem Medium auf ein anderes bei gleichzeitiger Stofftrennung. Sie sind notwendig, wenn der Speicher indirekt be- oder entladen wird. Die übertragene Wärme ist abhängig von

- der Temperaturdifferenz zwischen beiden Medien,
- der Oberfläche des Wärmeübertragers und
- der Strömungsgeschwindigkeit auf beiden Seiten des Wärmeübertragers.

Bei solarthermischen Anlagen werden externe und interne Wärmeübertrager eingesetzt.

Ein Vorteil interner Wärmeübertrager ist der geringe Platzbedarf. Von Nachteil sind die relativ kleine Wärmeleistung, die größere notwendige Temperaturdifferenz und die beschränkte Größe. Verwendet werden Glatrohr- oder Rippenrohrwärmeübertrager. Teilweise kommen auch Doppelmantelwärmeübertrager zum Einsatz.

Externe Wärmeübertrager werden fast immer als Gegenstromwärmeübertrager ausgeführt. Gebräuchlich sind Rohrbündel- (für Großanlagen), Platten- und Koaxialwärmeübertrager. Vorteile externer Wärmeübertrager sind die höheren Wärmeübertragungsleistungen bei geringerer Temperaturdifferenz sowie die Möglichkeit, das erwärmte Wasser oben im Speicher einzubringen. Daher werden sie bevorzugt bei Kollektorflächen größer als 15 bis 20 m² eingesetzt. Es kann eine bessere Temperaturschichtung im Speicher als bei internen Wärmeübertragern erreicht werden. Nachteilig sind die höheren Wärmeverluste, der größere Platzbedarf und eine zusätzlich benötigte Pumpe im Sekundärkreis.

Im groben Durchschnitt wird je Quadratmeter Kollektorfläche bei Warmwasseranlagen mit internem Wärmeübertrager eine berippte Tauscherfläche von etwa $0,4 \text{ m}^2$ bei Rippenrohren und von rund $0,2 \text{ m}^2$ bei glatten Tauscherrohren benötigt /4-15/. Bei externem Wärmeübertrager kann die Tauscherfläche aufgrund des besseren Wärmeüberganges auf $0,05$ bis $0,08 \text{ m}^2$ reduziert werden /4-20/.

Pumpen. In solarthermischen Anlagen mit Zwangsumlauf ist zur Aufrechterhaltung des Kollektorkreislaufes eine Pumpe notwendig. Bei den gängigen solarthermischen Brauchwarmwasseranlagen in Haushalten sind Durchflussmengen von 30 bis $50 \text{ l}/(\text{h m}^2_{\text{Kollektorfläche}})$ üblich (High-Flow) /4-1/. Für Low-Flow Anlagen betragen die Durchflüsse zwischen 10 und $15 \text{ l}/(\text{h m}^2_{\text{Kollektorfläche}})$. Nach diesem Volumenstrom richtet sich auch die Leistung der Kollektorkreisumpen.

Bei High-Flow Anlagen handelt es sich ausnahmslos um einfache, häufig leistungsumschaltbare Kreislumpen. Bei Low-Flow oder Drain-Back Systemen kommen demgegenüber Flügelzellen- oder Zahnradpumpen zur Anwendung, die auch bei größerer Förderhöhe und kleinem Volumenstrom einen guten Wirkungsgrad aufweisen.

Diese Pumpen werden im Regelfall elektrisch angetrieben; sie sind meist direkt an das Netz der öffentlichen Versorgung angeschlossen. Sie können aber auch, dann als Gleichstrompumpen, mit einem Photovoltaikmodul entsprechender Leistung verbunden sein. Bei dieser aufwändigeren und teureren Art der Pumpstrombereitstellung kann der Vorteil genutzt werden, dass von der Pumpe meist dann elektrische Energie benötigt wird, wenn das entsprechende Solarenergieangebot vorhanden ist. Damit korrelieren in diesem Fall Strahlungsangebot und elektrische Energienachfrage. Ein elektrischer Energiespeicher kann entfallen, obwohl die Pumpe netzautark betrieben wird.

Die für den Antrieb der Pumpe benötigte elektrische Energie liegt bei den gängigen solarthermischen Anlagen zur Brauchwarmwasserbereitstellung in der Größenordnung von etwa 1 bis 2% bezogen auf die am Ausgang der Solaranlage verfügbare Wärme. Bei größeren Anlagen ist die benötigte elektrische Energie aufgrund besserer Pumpenwirkungsgrade noch geringer.

4.2.3 Energiewandlungskette und Verluste

Energiewandlungskette. Eine aus den beschriebenen Systemkomponenten aufgebaute solarthermische Anlage wandelt solare Strahlungsenergie in nutzbare Wärme um. Abb. 4.9 zeigt die gesamte Energiewandlungskette einer derartigen solarthermischen Anlage mit Kollektor, Wärmeträgermedium und Wärmespeicher (optional). Photonen der solaren Strahlung werden demnach vom Absorber absorbiert und versetzen die Absorberatome in Schwingungen. Dadurch steigt die Temperatur des Absorbers; es entsteht Wärme. Ein Teil dieser Wärme wird durch Wärmeleitung im Absorber zu den Absorberrohren, die vom Wärmeträger durchflossen werden, transportiert. Diese Wärme wird an den Wärmeträger abgegeben

und mit ihm weiter transportiert. Meist wird die Wärme dann über einen Wärmeübertrager an ein Wärmespeichermedium abgegeben, bevor sie an den Verbraucher abgegeben wird.

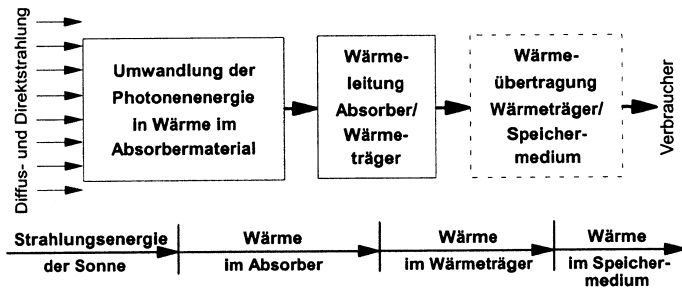


Abb. 4.9 Energiewandlungskette der solarthermischen Wärmenutzung (nach /4-65/)

Verluste. Die verschiedenen Verlustmechanismen bewirken, dass nur ein Teil der solaren Einstrahlung als Wärme dem Verbraucher zur Verfügung steht. Abb. 4.10 zeigt den Energiefluss einer solarthermischen Anlage mit Flachkollektor, Zwangsdurchlauf und Ein- bis Zweitagesspeicher zur Unterstützung der Brauchwarmwasserbereitung für einen privaten Haushalt mit 3 bis 5 Personen nach dem heutigen Stand der Technik. Bei einer Kollektorfläche von ca. 6 m^2 beträgt der solare Deckungsgrad im Jahresmittel 50 bis 60 %. Im Sommer liegt er entsprechend höher – bei über 90 % –, und im Winter sinkt er auf unter 15 % ab.

Die relativen Verlustangaben in Abb. 4.10 sind über das Jahr gemittelte Größen. Sie gelten für mitteleuropäische meteorologische Verhältnisse und sind auf die Sonneneinstrahlung auf den Kollektor bezogen. Große Verluste von ca. 25 % entstehen demnach durch Kollektorstillstand dann, wenn der Speicher bereits auf seine Maximaltemperatur aufgeheizt wurde oder die zum Beladen des Speichers notwendige Temperatur im Kollektor noch nicht erreicht ist. Die größten Verluste mit zusammengekommen rund 38 % treten im Kollektor bei der Umwandlung der solaren Strahlung in Wärme bzw. vor ihrem Weitertransport durch den Wärmeträger auf.

Insgesamt ergibt sich ein gesamter Systemnutzungsgrad derartiger Solarsysteme von rund 25 % von der Sonneneinstrahlung bis zur nutzbaren Wärme des Brauchwarmwassers (hier werden alle Verluste des Brauchwarmwasserspeichers der Solaranlage zugerechnet) bzw. von 32 % bis zur Abgabe der Wärme des Kollektors in den Brauchwarmwasserspeicher. Bei einer Einstrahlung auf die Kollektorebene zwischen $3\,760$ und $4\,520 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ a})$ entspricht dies einem jährlichen Energieertrag am Ausgang der Solaranlage zwischen $1\,200$ und $1\,450 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ a})$ bzw. 330 bis $400 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$.

Für den Gesamtsystemnutzungsgrad sind Anlagendimensionierung und Abstimmung der einzelnen Anlagenkomponenten aufeinander entscheidend. Gesamtsystemnutzungsgrad und solarer Deckungsgrad sind einander wechselseitig beein-

flussende Größen. Bei vorgegebener Kollektorfläche erhöht sich der solare Deckungsgrad mit zunehmendem Gesamtsystemnutzungsgrad (z. B. durch die Verwendung besserer Kollektoren, durch eine Verringerung der Leitungsverluste oder durch eine bessere Speicherwärmedämmung oder eine Speichervolumenvergrößerung). Erhöht sich bei einem bereits ausgelegten System der solare Deckungsgrad z. B. dadurch, dass die Brauchwarmwassernachfrage sinkt, verringert sich der Gesamtsystemnutzungsgrad. Ursache ist, dass unter diesen Umständen der Kollektor im Sommer zuviel solare Strahlung in Wärme umwandelt, die nicht genutzt werden kann. Wird andererseits bei sonst gleicher Auslegung die Kollektorfläche vergrößert, erhöht dies zwar den solaren Deckungsgrad, verringert aber ebenfalls den Gesamtsystemnutzungsgrad, da der weitaus größte Teil der zusätzlichen Wärme im Sommer anfällt, in dem der solare Deckungsgrad schon nahe bei 100 % liegt. Damit geht im Sommer überschüssige Wärme verloren.

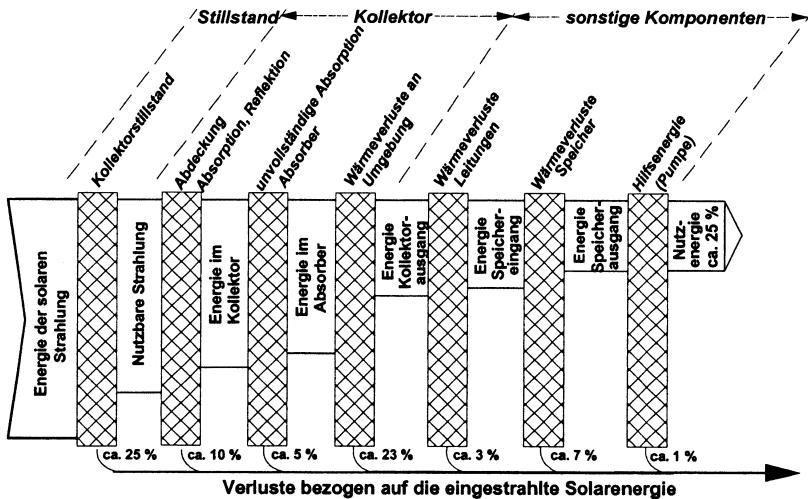


Abb. 4.10 Energiefluss einer solarthermischen Zwangsdurchlaufanlage mit Flachkollektor zur Unterstützung der Brauchwarmwasserbereitung eines Haushaltes (nach /4-65/)

4.2.4 Anlagenkonzepte

Die beschriebenen Systemkomponenten bilden zusammen die Solaranlage. Eine Systematisierung der Vielzahl von Anlagen Ausführungen kann nach der Art des Wärmeträgerumlaufs durchgeführt werden /4-2/. Damit können

- Anlagen ohne Umlauf (Speicherkollektoren),
 - Naturumlaufanlagen (Thermosyphon-Systeme) und
 - Zwangsumlaufanlagen
- unterschieden werden.

Wird die Ausbildung des Solarkreislaufs als Unterscheidungsmerkmal herangezogen, lassen sich

- offene Systeme sowie
- geschlossene Systeme

unterscheiden. Ausgehend von diesen Merkmalen lassen sich fünf Grundprinzipien von Solaranlagen definieren. Sie sind mit den für die Funktionsfähigkeit und den sicheren Anlagenbetrieb unabdingbar notwendigen Anlagenkomponenten in Abb. 4.11 dargestellt /4-2/.

Anlagen ohne Umlauf (Abb. 4.11, a). Bei diesem einfachsten aller möglichen Grundprinzipien sind Wärmeträger und die tatsächlich vom Nutzer verwendete Flüssigkeit dasselbe Medium. Hier wird innerhalb des ganz normalen Trink- oder Brauchwarmwasserkreislaufes ein entsprechender Kollektor integriert. Beim Durchströmen des Kollektors wird das Wasser erwärmt und kann anschließend genutzt werden. Dieses Grundprinzip wird beispielsweise bei Speicherkollektoren angewendet.

Offene Naturumlaufsysteme (Abb. 4.11, b). Dieses einfachste der Umlaufkonzepte besteht aus dem Kollektor, den Vor- und Rücklaufleitungen und einem drucklosen, offenen Speicher. Ursache des Naturumlafs ist die Dichteabnahme einer Flüssigkeit mit steigender Temperatur. Beispielsweise beträgt die Dichte von Wasser bei 20 °C 998 kg/m³ und bei 80 °C dagegen nur noch 972 kg/m³. Diese Dichteunterschiede zwischen heißem Fluid im Kollektor und in der Kollektorrücklaufleitung und dem kalten Fluid im Speicher und in der Kollektorvorlaufleitung sorgen dann für einen Kreislauf im System, wenn der Speicher mit dem kälteren Medium oberhalb des Kollektors angeordnet ist.

Den antreibenden Kräften durch die Dichteunterschiede stehen die Strömungsdruckverluste durch die Rohrreibung entgegen. Auftriebsdruck und die durch die Strömung hervorgerufenen Druckverluste sind im stationären Zustand gleich; daraus ergibt sich der Massenstrom des Fluids. Nimmt die Strahlungsintensität zu, steigt die Kollektoraustrittstemperatur und damit die Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Kollektor. Dadurch vergrößert sich der Massenstrom; es wird vermehrt Wärmeträgermedium und damit auch Wärme zum Speicher transportiert und an das Speichermedium abgegeben. Als Folge davon nimmt die Temperatur im Kollektor wieder ab. Es handelt sich damit um ein selbstregulierendes System, das zumindest in dieser einfachen Version ohne Mess- und Regeleinrichtungen auskommt.

Das Naturumlaufsystem ist in diesem Fall offen. Durch den Kollektor fließt dieselbe Flüssigkeit, die im erwärmten Zustand direkt an den Nutzer abgegeben und von diesem verwendet wird. Da in südlichen Ländern im Regelfall keine Frostgefahr besteht und somit das Wärmeträgermedium im Kollektorkreislauf nicht einfrieren kann, sind solche Anlagen dort weit verbreitet. Dabei muss der Kollektorkreislauf korrosionsbeständig sein, da er im Regelfall vom Trinkwasser durchflossen wird.

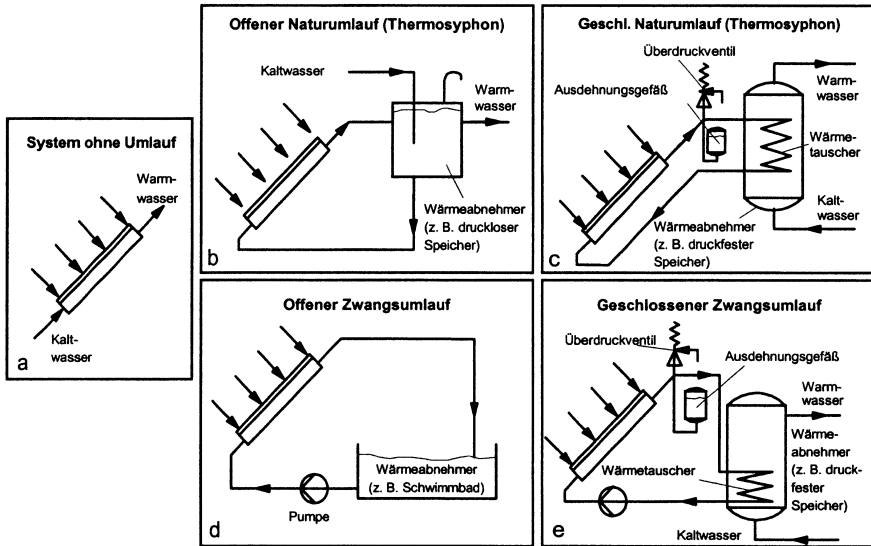


Abb. 4.11 Grundkonzepte für aktive solarthermische Anlagen (nach /4-2/)

Geschlossene Naturumlaufsysteme (Abb. 4.11, c). Um der Frost- und Korrosionsgefahr vorzubeugen, kann der Kollektorkreislauf bei Naturumlaufanlagen geschlossen werden. Dann ist allerdings ein Wärmeübertrager notwendig, der die im Kollektorkreislauf enthaltene Wärme üblicherweise an einen Speicher abgibt, von dem aus die Wärme weiter verteilt wird.

Da der Kreislauf von der Umgebung abgeschlossen ist, befindet er sich in der Regel unter höherem Druck. Zum sicheren Betrieb müssen daher ein Ausdehnungsgefäß und ein Überdruckventil im Primärkreislauf vorhanden sein. Werden derartige Systeme in frostgefährdeten Gebieten eingesetzt, sind frostsichere Wärmeträger zu verwenden und Speicher, Kalt- und Warmwasseranschlussleitungen gegen Frost zu schützen.

Offene Zwangsumlaufsysteme (Abb. 4.11, d). Kann der Wärmeabnehmer nicht oberhalb der Kollektoren angeordnet werden, muss dem Wärmeträgermedium durch eine Pumpe ein Umlauf aufgezwungen werden. Der Vorteil, Kollektoren und Wärmeabnehmer unabhängig voneinander anzuordnen, hat beispielsweise bei der Beheizung von Freibädern Bedeutung, in denen die Kollektoren üblicherweise auf Dächern oder auf Freiflächen oberhalb des Speichers angeordnet sind.

Wenn sich das Fluid im Kollektor schneller abkühlt als im Vorlauf, kann es nachts – wenn die Pumpe nicht betrieben wird – zur Umkehrung des Kreislaufs kommen. In diesem Fall drückt kalte Flüssigkeit aus dem Kollektor nach unten und entzieht dem Speicher bzw. Wärmeübertrager warmes Fluid. Dies kann z. B. durch den Einbau eines Rückschlagventils in der Kollektorrücklaufleitung verhindert werden.

Geschlossene Zwangsumlaufsysteme (Abb. 4.11, e). Das den Kollektorkreislauf durchfließende Medium ist bei offenen Zwangsumlaufanlagen üblicherweise normales Wasser. Deshalb sind diese Anlagen den gleichen Frost- und Korrosionsgefahren wie offene Naturumlaufanlagen ausgesetzt. Zur Vermeidung von Einfrierungen wird der Zwangsumlauf geschlossen und mit einer frostsicheren Flüssigkeit durchströmt. Dieses Konzept des geschlossenen Zwangsumlaufs stellt für die meisten Anwendungsfälle in Mittel- und Nordeuropa die sinnvollste Lösung dar. Bei Anwendungen in Gebäuden befindet sich der Kollektor üblicherweise auf dem Dach. Der Abnehmer der Kollektorkreislaufwärme ist im Normalfall ein Speicher im Keller. Wie beim geschlossenen Naturumlaufsystem wird zusätzlich ein Ausdehnungsgefäß und ein Überdruckventil benötigt. Zudem ist wie beim offenen Zwangsumlaufsystem ein Rückschlagventil notwendig.

4.2.5 Anwendungen solarthermischer Anlagen

Solare Freibadbeheizung. Eine der günstigsten Anwendungsfälle der Solarthermie ist die Freibadbeheizung; hier korrelieren die zeitlichen Verläufe von Wärmenachfrage und solarem Strahlungsangebot weitgehend. Zusätzlich kann ein externer Wärmespeicher entfallen, da das wassergefüllte Freibadbecken die Speicherfunktion übernehmen kann. Da das Beckenwasser nur auf vergleichsweise niedrige Temperaturen (maximal ca. 28 °C) aufgeheizt werden muss, bringt die Verwendung von einfachen und kostengünstigen nichtabgedeckten Absorberrmatten, die entweder auf dem Freibaddach oder einer anliegenden Freifläche installiert werden, hohe Energieerträge.

Abb. 4.12 zeigt das Schema und die Wärmeströme eines solarbeheizten Freibades. Ob eine Zusatzheizung auf der Basis fossiler Energieträger notwendig ist, hängt von den standortspezifischen Anforderungen ab. Demnach setzen sich die Wärmegewinne des Freibads zusammen aus der von den Absorberrn an das Becken abgegebenen Energie \dot{Q}_{Abs} , aus den Wärmegewinnen durch die Einstrahlung in das Becken \dot{Q}_G und aus der Wärmeabgabe der Beckenbenutzer \dot{Q}_{Mensch} . Dem stehen als Verluste die konvektiven Wärmeverluste \dot{Q}_{Konv} , die Abstrahlungsverluste \dot{Q}_{Str} und die Verdunstungsverluste an der Wasseroberfläche \dot{Q}_{Verd} sowie die Transmissionsverluste in das Erdreich \dot{Q}_{Trans} entgegen. Durch den Wasserumlauf (\dot{m}_{ein} bzw. \dot{m}_{aus}) geht ebenfalls ein kleiner Teil an Wärme verloren, da das ins Beckenwasser hineinströmende Wasser kälter ist als das hinausströmende Wasser.

Die Summe der Strahlungs- und Konvektionsverluste (\dot{Q}_{Str} und \dot{Q}_{Konv}) ist näherungsweise linear abhängig von der Differenz zwischen der Beckenwassertemperatur und der mittleren Lufttemperatur. Liegt die Außentemperatur über der Beckenwassertemperatur, kehrt sich der konvektive Wärmestrom um; dann nimmt das Beckenwasser aus der Umgebung konvektiv Wärme auf. Die Wärmeverluste aufgrund von Verdunstung sind abhängig von der Beckenoberfläche, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Temperaturdifferenz des Wassers zur

Umgebung. Die Transmissionsverluste an das Erdreich sind gering und machen rund 3 % der gesamten Verluste aus.

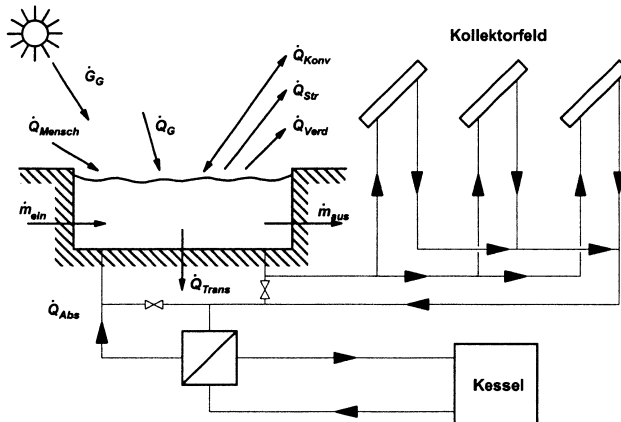


Abb. 4.12 Schema und Energieflüsse einer solaren Freibadbeheizung (nach /4-1/)

Durch eine nächtliche Beckenabdeckung können die Konvektions-, Abstrahlungs- und Verdunstungsverluste deutlich vermindert werden. Eine zehnstündige Abdeckung mit handelsüblichen Absorbermaterialien reduziert die Verdunstungsverluste um ca. 30 % sowie die Abstrahlungs- und Konvektionsverluste um ca. 16 %.

Der Energiegewinn durch die ins Becken gestrahlte und dort absorbierte Solarstrahlung hängt ab von der Beckenoberfläche und dem Absorptionsgrad von Beckenwasser und Beckenboden. Der Absorptionsgrad nimmt von weiß über hellblau nach dunkelblau als Beckenboden bzw. Beckenwandfarbe sowie mit zunehmender Wassertiefe zu /4-16/, /4-17/. Ein zusätzlicher Energiegewinn ist durch die Wärmeabgabe der Schwimmer gegeben; je nach Schwimmerbewegung liegt die Wärmeleistung zwischen 100 und 400 W je Schwimmer /4-4/.

Die über diesen Energiegewinn hinausgehende Energienachfrage muss von den Absorbern oder einer Zusatzheizung auf der Basis fossiler (z. B. Erdgas) oder regenerativer Energieträger (z. B. Holzpellets) geliefert werden. Wird von einer 130-tägigen Badesaison ausgegangen, werden je Quadratmeter Beckenoberfläche zwischen 540 und 1 620 MJ benötigt. Dann sollte die Absorberfläche etwa 50 bis 70 % der Beckenoberfläche betragen, um eine mittlere Temperaturerhöhung zwischen 3 und 6 °C je nach Beckenabdeckung zu erreichen (u. a. /4-4/, /4-5/).

Kleinanlagen. Die Anwendung der Solarthermie in Haushalten beschränkte sich früher in den überwiegenden Fällen auf die solarunterstützte Brauchwarmwasserbereitung. Die zusätzliche Heizungsunterstützung durch die Solaranlage, auch als solares Kombisystem bezeichnet, gewinnt aber ebenfalls immer mehr an Bedeutung. In Österreich und der Schweiz sind bereits 50 % aller gebauten Solaranlagen den Kombisystemen zuzuordnen (u. a. /4-41/, /4-42/).

Dabei ist bei solchen Systemen zu beachten, dass die Energienachfrage für Brauchwarmwasser tendenziell gleichmäßig verteilt über das Jahr anfällt; dagegen ist die Raumwärmenachfrage mit dem solaren Strahlungsangebot weitgehend anti-korreliert.

Tabelle 4.5 Richtwerte für die Brauchwarmwassernachfrage in Haushalten /4-12/

	Brauchwarmwasser in l/(Person d)	Nutzwärme in MJ/(Person d)
Hohe Ansprüche	70 – 115	10,44 – 16,70
Mittlere Ansprüche	50 – 70	7,31 – 10,44
Einfache Ansprüche	35 – 50	5,22 – 7,31

Abb. 4.13 zeigt ein vollständiges Schema einer solarthermischen Anlage zur Unterstützung der Brauchwarmwassererwärmung. Wesentliches Dimensionierungskriterium ist die Brauchwarmwassernachfrage. Bei durchschnittlichen Verhältnissen liegen Nachfragewerte entsprechend Tabelle 4.5 vor. Von diesen Werten ausgehend sollte die Solaranlage im Sommer etwa 70 bis 90 % der Tage die Brauchwarmwassernachfrage vollständig decken. Das Volumen des Speichers umfasst dann etwa das 1,5- bis 2,5-fache der Auslegungsnachfrage für einen Tag. Ausgehend von einem Vierpersonenhaushalt mit einer täglichen Nachfrage von 50 l je Person sind dann bei Verwendung von normalen Flachkollektoren etwa 7 bis 8 m² nicht selektiv beschichtete bzw. 5 bis 6 m² selektiv beschichtete Kollektorfläche zu installieren. Dazu ist ein Speicher mit einem Volumen zwischen 250 und 500 l notwendig (u. a. /4-1/, /4-4/, /4-18/). Bei Einhaltung der genannten Dimensionierungskenngrößen kann etwa 50 bis 65 % der Brauchwarmwassernachfrage solar gedeckt werden.

Für höhere solare Deckungsraten von rund 70 % wären für diesen Anwendungsfall etwa 15 bis 18 m² nicht selektiv beschichtete oder 10 bis 12 m² selektiv beschichtete Kollektorfläche notwendig. Das Speichervolumen sollte dann bei rund 600 l liegen. Im Sommer muss man nun allerdings mit regelmäßigen Kollektorstillständen rechnen.

Sollen solarthermische Anlagen größere Anteile der gesamten Wärmenachfrage decken, muss neben dem Brauchwarmwasser auch teilweise Raumwärme solar bereitgestellt werden. Generell ist hier jedoch eine verbesserte Wärmedämmung des Gebäudes – bei geringeren Kosten – meist effizienter als die Einbindung einer Solaranlage in das Heizungssystem.

Für die Art der Einbindung von Solaranlagen in Heizungssysteme gibt es vielfältige Möglichkeiten. Hierbei spielen vor allem folgende Parameter eine wichtige Rolle:

- Heizkesseltyp (gleitender oder in Ein-/Aus-Fahrweise betriebener Automatikessel, Festbrennstoffkessel);
- Art und Eigenschaften des Heizungssystems (hohe Speichermasse, z. B. Fußbodenheizung) oder geringe Speichermasse (z. B. Radiatoren); Hoch- oder Niedertemperatursystem);

- Solaranlage (z. B. Fläche und Wirkungsgrad der Kollektoren);
- Nutzeranforderungen (Raumtemperatur konstant oder Temperaturschwankungen von einigen Grad zulässig);
- Nutzerzielsetzung (höchste Ausnutzung mit großem Aufwand oder gute Ausnutzung mit geringeren Kosten) /4-20/.

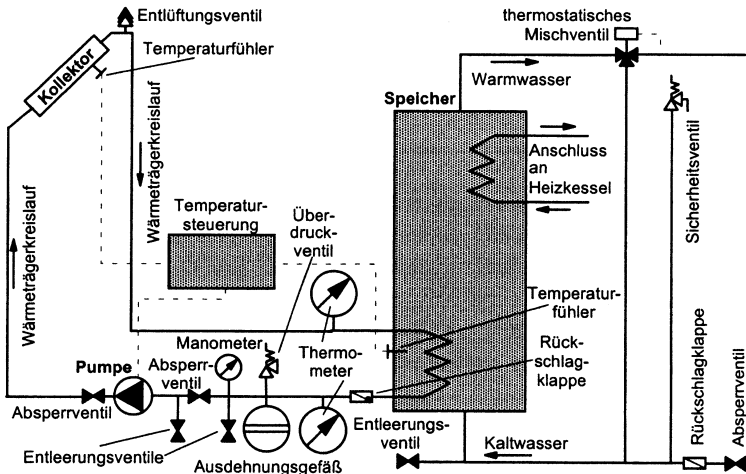


Abb. 4.13 Solarthermische Zwangsdurchlaufanlage mit Flachkollektor zur Unterstützung der Brauchwarmwasserbereitung in Haushalten (nach /4-4/)

Abb. 4.14 zeigt beispielhaft drei Ausführungsformen solcher Anlagen. Im linken Teil der Darstellung handelt es sich um eine Zweispeicherschaltung mit leistungsgeregeltem Automatikessel. Ein Speicher wird zur Brauchwarmwasserbereitung und ein zweiter zur teilweisen solaren Raumwärmenachfragedeckung eingesetzt. Das im Heizungskessel erwärmte Wasser wird in diesem Fall direkt in das Heizungsnetz eingespeist (Abb. 4.14, links). Würde es sich um einen nicht leistungsgeregelten Kessel (z. B. Holzschelte) handeln, müsste er zur Laufzeiterhöhung und Massenflussentkoppelung über den Heizungsspeicher eingebunden werden. Aufgrund der größeren Kollektorflächen werden insbesondere für die Beladung des Heizungsspeichers externe Wärmeübertrager verwendet.

Das mittlere und das rechte System in Abb. 4.14 sind Varianten von Einspeichersystemen. Diese sind installationstechnisch einfacher als getrennt aufgestellte Speicher. Von Nachteil ist allerdings der zweifache Wärmeübergang (Kollektor/Speicher und Speicher/Brauchwarmwasserbereiter).

Das mittlere System in Abb. 4.14 eignet sich insbesondere bei Solaranlagen in Verbindung mit einem vergleichsweise trägen Festbrennstoffkessel (z. B. Holzheizkessel). Der Brauchwarmwasserspeicher ist in einen größeren Heizungsspeicher integriert. In diesem Doppelspeicher werden die natürliche Konvektion und die vertikale Temperaturschichtung ausgenutzt. Im oberen Teil des Brauch-

warmwasserspeichers ist immer genügend heißes Wasser für eine Badewannenfüllung vorhanden. Nachteilig sind die höheren Kosten für den Doppelspeicher.

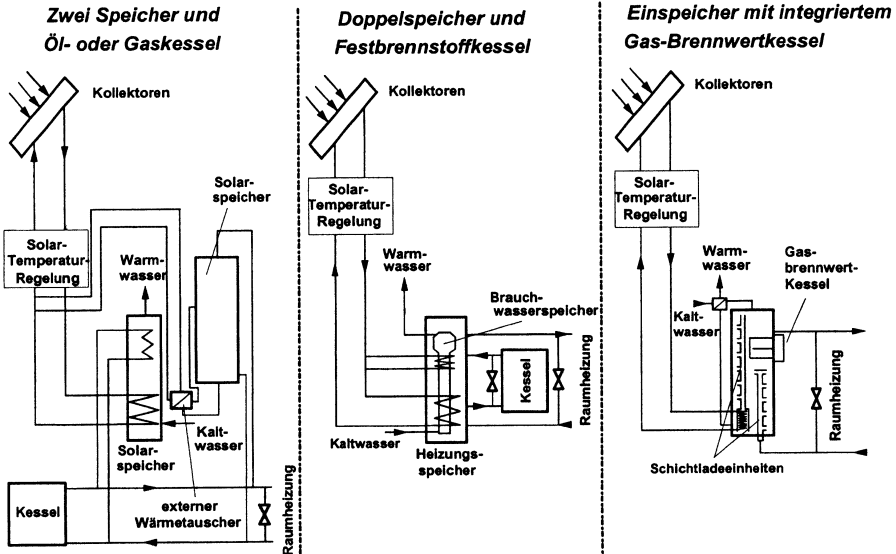


Abb. 4.14 Mögliche Ausführungsformen solarthermischer Anlagen zur Unterstützung der Brauchwarmwassernachfragedeckung und der Raumheizung (u. a. nach /4-20/, /4-42/)

Das rechte System stellt eine Integration aus Speicher für Heizung und Brauchwarmwasser sowie dem Nachheizgerät (z. B. ein Gas-Brennwertkessel) dar. Von Vorteil ist die kompakte Form und die geringe Anschleißarbeit vor Ort, um ein solares Kombisystem zu realisieren. Die Solaranlage speist über eine Schichtladeeinheit in den Pufferspeicher. Der Brenner für den konventionellen (fossilen) Brennstoff ist über einen Flansch direkt in den Speicher eingebunden. Das Brauchwarmwasser wird in einem externen Wärmeübertrager im Durchlauf-erhitzerprinzip erzeugt. Damit wird kein heißes Brauchwarmwasser gespeichert und es besteht keine Gefahr der Legionellenbildung (u. a. /4-20/, /4-41/, /4-42/).

Solare Nahwärmesysteme. Im Gegensatz zu Systemen, bei denen einzelne Häuser von einzelnen Solaranlagen mit Wärme versorgt werden, können auch mehrere Wärmeverbraucher gemeinsam Wärme von einer Solaranlage beziehen. In diesem Fall spricht man von einem solarunterstützten Nahwärmesystem.

Viele Maßnahmen der verbesserten Wärmedämmung sind aber i. Allg. mit geringeren Aufwendungen verbunden als die Versorgung mit solarer Nahwärme. Daher sollte aus Sicht einer technischen und ökonomischen Gesamtsystemoptimierung für eine Wärmeversorgung durch solare Nahwärmesysteme zunächst ein geringer Heizwärmeverbrauch der versorgten Gebäude angestrebt werden. Günstig wirken sich zudem besonders niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen des Wärmeverteilnetzes aus (z. B. 80/40 °C).

Bei solaren Nahwärmesystemen wird meist zwischen solarunterstützten Nahwärmesystemen ohne und mit Langzeitwärmespeicherung unterschieden (Abb. 4.15). Von den in der Nähe des Wärmespeichers installierten Kollektoren wird die Wärme über ein Rohrnetz und einen Wärmeübertrager in den zentralen Speicher transportiert. Erforderlich ist außerdem ein Warmwasserverteilnetz, um die Wärme von der Heizzentrale an die Häuser zu verteilen. Dabei unterscheidet man Zwei-Leiter- und Vier-Leiter-Netze.

- Beim Zwei-Leiter-Netz erfolgt die Brauchwarmwassererwärmung dezentral über das Heiznetz entweder mit Brauchwarmwasserspeichern oder mit Brauchwarmwasserwärmeübertragern in den einzelnen Häusern (Abb. 4.15, links); bei kleineren Netzen ist die Heizung dabei direkt und bei größeren über einen Wärmeübertrager eingebunden. Um bei Niedertemperaturnetzen die Wärmeverluste gering zu halten, kann die Aufwärmung der Brauchwarmwasserspeicher während bestimmter Zeitfenster beispielsweise in der Nacht und zur Zeit der höchste Solarstrahlung mit erhöhten Vor- und Rücklauftemperaturen des Netzes erfolgen. Bei solchen Zwei-Leiter-Netzen kann die Brauchwarmwasserzirkulationsleitung, welche immer zu Wärmeverlusten und Schichtungserstörung in Speichern führt, entfallen. Zudem ist die Gefahr der Legionellenbildung aufgrund kleiner Brauchwarmwasservolumina gering.
- Beim Vier-Leiter-Netz wird das Heiz- und Brauchwarmwasser getrennt verteilt. Vorteilhaft bei dieser getrennten Verteilung von Heiz- und Brauchwarmwasser (Vier-Leiter-Netz, Abb. 4.15, rechts) ist die bessere Ausnutzung des Wärmespeichers und der Solaranlage, da auch bei niedrigen Speichertemperaturen noch Brauchwarmwasser vorgewärmt wird.

Ohne Langzeitspeicherung lassen sich bei Nahwärmesystemen mit großen Kollektorfeldern, bei denen vorwiegend Haushalte mit Wärme versorgt werden, solare Deckungsgrade von etwa 10 bis 20 % bezogen auf die Energienachfrage für Raumwärme und Brauchwarmwasser erreichen /4-21/. Mit saisonalen Langzeitspeichern sind höhere solare Deckungsgrade möglich. Werden aus Platzgründen die Kollektoren vorwiegend auf den Gebäudedächern installiert, lassen sich bei der heute in vielen Staaten Mittel- und Nordeuropas geltenden Wärmeschutzverordnung mit den derzeit vorhandenen Dachflächen und einer Langzeitwärmespeicherung solare Deckungsgrade von maximal 50 bis 60 % erreichen; bei verstärkten Wärmedämm-Maßnahmen sind es entsprechend mehr /4-22/. Erst wenn noch höhere solare Deckungsgrade angestrebt werden und in solchen Fällen, in denen in direkter Nähe der Verbraucher größere sonstige nicht anderweitig nutzbare Flächen verfügbar sind, werden die Kollektoren auf Freiflächen untergebracht.

Bei solaren Nahwärmesystemen bietet sich die Verwendung hocheffizienter Flachkollektoren mit optischen Wirkungsgraden nahe 80 % und thermischen Verlustfaktoren von etwa $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ an. Diese können als großflächige Kollektormodule ($> 10 \text{ m}^2$) mit niedrigen Druckverlusten seriell und/oder parallel zu großen Kollektorfeldern verschaltet werden. Werden solche Kollektoren zugrunde gelegt, kann bei Systemen zur teilsolaren Deckung der Brauchwarmwassernachfrage (d. h. bei Systemen ohne Langzeitwärmespeicherung) näherungsweise mit Kollekt-

torflächen von 0,9 bis 1,2 m² je Person und einem Speichervolumen von 40 bis 60 l je Quadratmeter Kollektorfläche gerechnet werden. Handelt es sich um Systeme mit Langzeitwärmespeicher sollte dieser etwa ein Volumen von 2 bis 3 m³ je Quadratmeter Kollektorfläche umfassen und die Kollektorfläche etwa 0,4 bis 0,7 m² je GJ Jahreswärmenachfrage betragen. Bei Systemen zur teilsolaren Deckung von Raumwärme und Brauchwarmwasser lassen sich nutzbare Wärmegevinne am Ausgang der Solaranlage (d. h. am Ausgang des Speichers) von rund 900 bis 1 370 MJ/(m² a) bzw. 250 bis 380 kWh/(m² a) erzielen /4-22/. Dient das solare Nahwärmesystem lediglich zur zentralen solaren Brauchwarmwasserunterstützung liegen die spezifischen Erträge höher, da die Speicherverluste dann geringer sind (vgl. /4-21/, /4-22/, /4-25/, /4-26/, /4-28/, /4-43/).

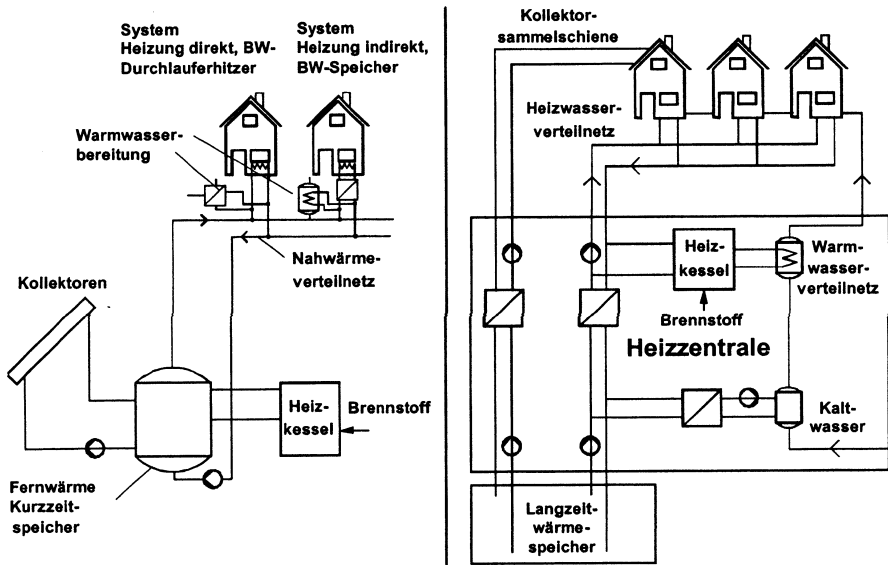


Abb. 4.15 Solare Nahwärmesysteme: Zwei-Leiter-System mit zentral unterstützter Heizwassererwärmung (links) (nach /4-53/) und Vier-Leiter-System mit Langzeitwärmespeicher (rechts) (BW Brauchwarmwasser; nach /4-22/)

Sonstige Anwendungen. Unter dem in Mittel- und Nordeuropa gegebenen Strahlungs- und Temperaturniveau bietet sich die solarthermische Wärmenutzung immer dann an, wenn Wärme auf einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau benötigt wird und zusätzlich Wärmenachfrage sowie solares Strahlungsangebot gleichzeitig auftreten oder zumindest nicht eine gegenläufige Charakteristik aufweisen. Neben der Brauchwarmwasserversorgung in Haushalten ist dies vor allem in vielen öffentlichen Einrichtungen gegeben. Dazu zählt z. B. die Duschwasserbereitstellung in öffentlichen Sportanlagen, insbesondere dann, wenn diese Anlagen vorrangig oder ausschließlich im Sommer betrieben werden (z. B. Frei-

luftnissanlagen). Andere Beispiele, bei denen eine hohe Wärmenachfrage auch im Sommer auftritt, sind Campingplätze, Beherbergungsbetriebe, Krankenhäuser sowie Alten- und Pflegeheime /4-14/, /4-44/, /4-45/. Daneben gibt es weitere Anwendungsmöglichkeiten.

- Mit einem vergleichsweise geringen Aufwand können Flachkollektoren in bestehende Heiznetze zur Fernwärmeversorgung integriert werden. Die Kollektoren speisen dann direkt in den Rücklauf eines Fernheiznetzes ein und können somit vor allem im Sommer einen Teil der Wärmenachfrage decken /4-22/, /4-43/.
- Durch die Verwendung von hocheffizienten Flachkollektoren oder Vakuumröhrenkollektoren kann auch unter den in Mittel- und Nordeuropa gegebenen Strahlungsverhältnissen ohne Strahlungskonzentration Wärme mit Temperaturen von mehr als 90 °C (typischerweise zwischen 90 und 120 °C) für industrielle Anwendungen oder für GHD (d. h. Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Übrige; im Wesentlichen Kleinverbraucher) bereitgestellt werden.
- Viele industrielle Anwendungen benötigen warmes Wasser mit Temperaturen von bis zu 60 °C (z. B. Photolabor, Waschen von Teilen), die solar bereitgestellt werden könnten.
- Im Sommer geerntetes Heu oder Körnerfrüchte können solar getrocknet werden. Dabei können Luftkollektoren zur Anwendung kommen.
- Bei großen Gebäuden mit ganzjährigem Heizungs- und Kühlungsbedarf können Sonnenkollektoren im Sommer zur Erwärmung sowie Nachts und im Winter zur Kühlung verwendet werden.
- Sonnenkollektoren können auch über sorptionsgestützte Klimatisierungsprozesse zur Raumkühlung eingesetzt werden.

4.3 Ökonomische und ökologische Analyse

Im Folgenden werden für ausgewählte solarthermische Anlagen, deren technische Kenndaten das derzeitige Marktspektrum wiedergeben, die Kosten und ausgewählte Umwelteffekte analysiert.

4.3.1 Referenzanlagen

Betrachtet werden für das Klima Würzburg (Deutschland) die folgenden fünf Anwendungsfälle, die zur Versorgung der in Kapitel 1 festgelegten Versorgungsaufgaben eingesetzt werden können und deren Systemkennwerte Tabelle 4.6 zeigt.

- Solarthermische Anlage zur Brauchwarmwasserbereitung und Heizungsunterstützung (EFH-I) mit 25 m² Kollektorfläche. Hierbei handelt es sich um ein solares Kombisystem für ein Haus mit 5 kW Heizlast (bei –12 °C Außentemperatur). Hier werden etwa 62 % der durchschnittlichen Brauchwarmwassernachfrage von etwa 200 l/d mit einer Temperatur von 45 °C solar bereit-