

Eine Heizanlage mit elektrisch betriebener Wärmepumpe und Sonnenkollektoren

Autor(en): **Weiersmüller, René**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 14

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75110>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eine Heizanlage mit elektrisch betriebener Wärmepumpe und Sonnenkollektoren

Von René Weiersmüller, Schlieren

Auch bei heutigen Heizölpreisen dürfte beim Einfamilienhaus die konventionelle Ölheizung in Anschaffung und Betrieb immer noch am billigsten sein. Wenn sich ein Bauherr trotzdem (und wissentlich) für ein alternatives Heizsystem entscheidet, sollte er neben dem Anspruch von Exklusivität vor allem durch die Freude an der gut funktionierenden Anlage entschädigt werden. Das letzte ist aus verschiedensten Gründen oft nur mit grossem persönlichem Engagement des für den Anlagebau Verantwortlichen zu erreichen. Die Probleme sind dabei weniger mit dem Palavern über ökologische und soziologische Aspekte zu lösen, sondern mit Kenntnissen, die etwas über die Solar- und Heizungstechnik hinausgehen.

Im folgenden Beitrag werden einige Konzeptüberlegungen zu einer Wärmepumpenheizung beschrieben und es wird auf die gemachten Erfahrungen beim Bau und Betrieb der Anlage eingegangen. Im Anhang sind einige bisher wenig bekannte Zusammenhänge hergeleitet, die für die direkte Nutzung der Sonnenenergie von Wichtigkeit sind.

Monovalente Wärmebeschaffung mit Wärmepumpe

Bivalente Wärmeerzeugung kann in Einfamilienhäusern mit schon bestehender Heizanlage interessant sein. So kann mit einer *zusätzlichen*, z. B. elektrisch angetriebenen Wärmepumpe ein *unwirtschaftlicher Kessel* während des grössten Teils der Heizsaison abgestellt bleiben und nur noch für die *Spitzendeckung* benötigt werden.

Für den Neubau kommen bivalente Systeme nicht nur in der Anschaffung teurer. Die jährlich gleich zweifach auftretenden Unterhaltskosten (Wärmepumpenservice, Kaminfeger, amtliche Ölfeuerungskontrolle, Brennerservice, Tankkontrolle usw.) übersteigen *besonders im Einfamilienhaus* bald die jährlichen Energiekosten für die gesamte Anlage, abgesehen vom zusätzlichen Platzbedarf. Statt Geld für eine zweite konventionelle Heizanlage auszugeben, ist dieses wahrscheinlich besser in einem grosszügig ausgelegten, monovalenten Heizsystem angelegt.

Die monovalente Betriebsweise erschwert zumindest die Verwendung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe, besonders dann, wenn der Bauherr auch an sehr kalten Tagen keine Einbussen in bezug auf die Raumlufttemperatur tolerieren wird. Gegen den Wärmeentzug aus der Luft spricht im noch zu beschreibenden Fall auch die ruhige Wohnlage (teure Schalldämmmassnahmen am Ventilator) sowie der Betrieb während der Hochtarifzeit, der zwar über einen Speicher in die Niedertarifzeit verlegt werden könnte, doch fallen dann die mit der dreifachen Leistung wesentlich zunehmenden Kosten- und Lärmprobleme mit der schlechteren Leistungsziffer bei den tieferen Aussen-

temperaturen nachts zusammen und wirken sich nachteilig aus.

Im Normalfall, aber auch für den Betrieb in der Niedertarifzeit besser geeignet, dürfte im Neubau eine an einem genügend grossen Erdregister angeschlossene Wasser/Wasser-Wärmepumpe sein: So gibt es aus Temperaturgründen keine verminderte Leistungsziffer. Die Wärmeentzugstemperatur bleibt auch fast gleich, ob nun während Stunden oder während acht Stunden (dafür aber mit dreifacher Leistung) Wärme entzogen wird. Der Mehrpreis der stärkeren Wasser/Wasser-Wärmepumpe ist *im Einfamilienhaus* gering.

Wenig rentable direkte Sonnenenergienutzung

Von den Möglichkeiten der aktiven Sonnenenergienutzung wird die Trink- und Badwassererwärmung als die mit dem (noch) besten Kosten-/Nutzenverhältnis betrachtet. Dies mag wohl zutreffen, obschon gesagt werden muss, dass eine solare Trinkwassererwärmung im Mittelland zurzeit normalerweise unwirtschaftlich ist. Ähnliches gilt für die Badwassererwärmung: Rentabel wird die Anlage allenfalls unter günstigen Annahmen, wenn z. B. mit einer geradezu verschwenderischen Beheizung durch die Zentralheizung verglichen wird – die aber in der Praxis bei fehlender Sonnenheizung gar nicht eingeschaltet würde. Gebadet würde bei tieferer Temperatur oder gar nicht!

Indirekte Sonnenenergienutzung über ein Erdregister

Zur Vermeidung von Wachstumsrückständen in der darüberliegenden Hu-

musschicht ist ein Erdregister zweckmässigerweise durch Sonnenkollektoren zu unterstützen. Werden dafür verglaste Kollektoren verwendet, ist zusätzlich eine direkte Trinkwassererwärmung (zu gewissen Jahreszeiten) möglich: Bei schwacher Sonneneinstrahlung – die für die Trinkwassererwärmung nicht oder nur zum kleinen Teil ausreichen würde – wird die gewonnene Wärme ins Erdregister geleitet.

Eine einfache Anlage ist zweckmässiger

Unter Beachtung eines minimalen Aufwandes für Leitungsführung, Nutzungsmöglichkeiten, Regelungen und Anzahl Pumpen (das Selbstbewusstsein des Anlagebauers soll angeblich mit der Anzahl eingesetzter Pumpen zunehmen!) ist aus allen möglichen Kombinationen die recht einfache Schaltung nach Bild 1 für die Wärmebeschaffung gewählt worden.

Die Umwälzpumpe ist wegen der geringeren thermischen Belastung im Vorlauf der Wärmepumpe bzw. des Sonnenkollektors eingebaut. Da die Wärmepumpe sowieso nur nachts *während der Heizsaison* in Betrieb ist, der Sonnenkollektor jedoch eher tagsüber im Sommer Wärme produziert, ist eine *Mehrfachverwendung* von Pumpe und gewissen Leitungsteilen ohne Beeinträchtigung des Betriebs der Anlage gegeben. Allerdings muss auch nur kurzzeitiges Auftreten von unzulässig hohen Temperaturen im Erdregister und der Wärmepumpe durch den vorangegangenen Betrieb der Sonnenkollektor-/Speicherkombination mit einer geeigneten Leitungsführung und Regelung verhindert werden. Dasselbe gilt auch für interne Leitungszirkulationen.

Unmöglich ist (nach Bild 1) der Wärmeentzug mit der Wärmepumpe direkt vom Sonnenkollektor. Dies stört allerdings nicht, würden doch selbst grossflächige Anordnungen von verglasten Kollektoren beim Wärmeentzug *in der Nacht* Temperaturdifferenzen von mehreren zehn Grad Celsius ergeben und somit einen vernünftigen Wärmepumpenbetrieb verunmöglichen! *Am Tag* wäre ein Wärmeentzug bei grosser Sonneneinstrahlung zwar möglich, wegen den Stromkosten (Hochtarif) aber unerwünscht sowie den möglicherweise zu hoch werdenden Verdampfertemperaturen an der Wärmepumpe sehr riskant. Wärme von den Sonnenkollektoren kann also mit der Wärmepumpe *nur über das Erdregister* genutzt werden, was unter Berücksichtigung der nicht gegebenen Gleichzeitigkeit ver-

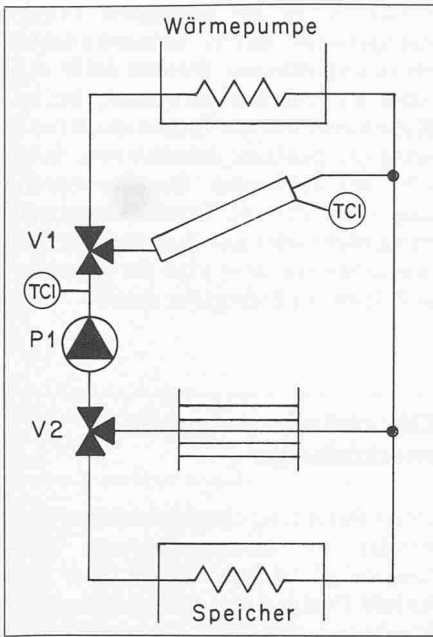


Bild 1. Wärmebeschaffungskreislauf

schiedener Angebots-/Nachfragezeiten durchaus sinnvoll sein dürfte. Übrigens kann der Wärmebeschaffungskreislauf mit einem zusätzlichen Dreiwegventil und einer einfachen Regelung ohne grossen Aufwand (wie im «Baukastensystem») mit einer Abwasserwärme-

rückgewinnung oder ähnlichem erweitert werden!

Die mit dem Erdregister verbundene Wärmepumpe kann auch am Tag in Betrieb genommen werden. Die sich bei grosser Sonneneinstrahlung ergebende Übertemperatur auf dem dann ungekühlten Kollektor ist problemlos, da die Anlage hinsichtlich Leerlauftemperaturen eigensicher ist.

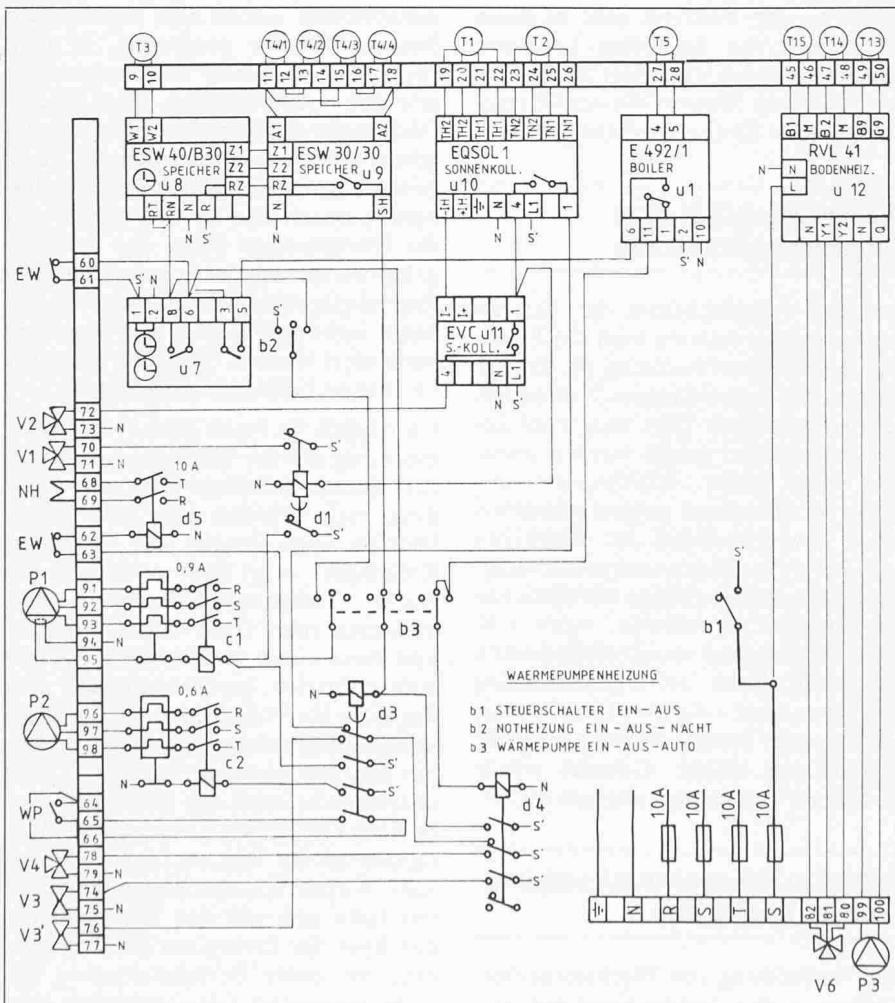
Die Ein-/Aus- bzw. Auf-/Zuregelung ist sehr einfach ausgeführt (Bild 2 mit dem vollständigen Schaltschema). Die Dreiwegventile V1 und V2 sind so geschaltet, dass in stromlosem Zustand Wärmepumpe und Erdregister miteinander verbunden sind. Bei Wärmepumpenbetrieb muss deshalb nur die Umwälzpumpe P1 auf Drehzahl II und die Wärmepumpe eingeschaltet werden – der Sonnenkollektorkreislauf und der Zufluss zum Wärmetauscher im Speicher ist dann wie erwähnt gesperrt.

Der Regelkreis mit dem Sonnenkollektor ist lediglich mit einem Differenzregler bestückt. Diese Anordnung ist zusammen mit dem «Speicherfühler» auf der Druckseite der Pumpe gegenüber der regeltechnisch einwandfreien Lösung mit zwei Differenzreglern und

den Speicherfühlern an Speicher und Erdregister bedeutend billiger, ohne irgendwelche Nachteile in der Praxis.

Die Umschaltung Speicher/Erdregister erfolgt durch einen am Sonnenkollektorfühler angekoppelten Festwertschalter, der beim Überschreiten der vorgegebenen Temperatur (z. Zt. etwa 28 °C) den Kreislauf vom Erdregister auf den Wärmeaustauscher im Speicher umschaltet. Der Temperaturfühler auf dem Sonnenkollektor ist zwischen zwei Rohren auf dem Kollektorblech des obersten Kollektors angebracht. Mit dieser unüblichen Anordnung ist die Regelung der Anlage – ergänzt durch den Timer im Regler, an dem sich eine minimale Pumpeneinschaltzeit einstellen lässt – *ausserordentlich träge*, ohne jedoch ein auch nur kurzzeitiges Verkehrtlaufen der Anlage (Wärmeabgabe vom Kollektor an die Umgebung) zuzulassen. Dies daher, weil die Temperaturdifferenz zwischen Kollektorvor- und -rücklauf selbst bei hohen Durchflussmengen sowie geringer Sonneneinstrahlung über einer genügend grossen und von der Regler- und Fühlerpräzision her beherrschbaren Einschalt-differenz bleibt. Noch interessanter ist aber, dass mit dieser Anordnung der Umschaltpunkt auf den Speicher von der Kollektorvorlauf-temperatur (entspricht etwa der Erdregistertemperatur) und von der Intensität der Sonneneinstrahlung abhängig wird (siehe Kasten).

Bild 2. Elektrisches Schaltschema



Im Frühling ist die Temperatur des auf das Erdregister geschalteten Kollektors eher tief. Auf die direkte Speichernutzung wird daher erst bei hoher Einstrahlungsdichte umgeschaltet. Umgekehrt wird der Speicher im Herbst schon bei geringer Sonneneinstrahlung eingeschaltet. Durch Einstellen der Höhe des Umschaltwertes zusammen mit der Durchflussmenge (z. Zt. 0,85 m³/h bei Drehzahl I) ist die Temperatur beeinflussbar, die bis zum Herbst im Erdregister gewünscht wird. Beachtet werden muss lediglich, dass die *Einschalt-differenz am Differenzregler* nicht zu hoch gewählt wird, ansonst die Umwälzpumpe erst in Betrieb kommt, wenn das Umschaltventil schon auf die direkte Speichernutzung umgeschaltet hat. Eine nachträgliche Schaltung auf das Erdregister ist wegen der für das Erdregister zu heissen Wärmeträgerflüssigkeit in den Leitungen unerwünscht und wird auch durch den Temperaturfühler bei der Umwälzpumpe automatisch unterdrückt. Umgekehrt ist am Wintermorgen nach Betrieb der Wärmepumpe die Temperatur an diesem Fühler tief, und die Umwälzpumpe wird schon bei schwacher Sonneneinstrahlung für die Regeneration des Erdregisters eingeschaltet.

Wärmebereitstellungskreislauf und Speicherung

Ein Speicher auf der Sekundärseite einer Wärmepumpe ist im Normalfall immer mit zusätzlichen Speicherverlusten und einer je nach Temperaturunterschied zwischen Speicher und Verbraucher verminderten Leistungszahl verbunden. Damit die den Verschleiss fördernde Zahl von Einschaltungen möglichst klein gehalten werden kann, ist beim Betrieb einer Wärmepumpe oft ein Speicher erforderlich. Speichermöglichkeiten werden zudem auch für die Trinkwassererwärmung sowie für die Stapelung der Wärme von den Sonnenkollektoren benötigt. Im vorliegenden Fall muss noch ein *Nachtaufladungsspeicher* für den Heizbetrieb vorgesehen werden.

Gemäss Literaturangaben sind das Einhalten einer ausgeprägten Temperaturschichtung sowie die Entnahme und die Speicherung auf möglichst den vom Erzeuger gelieferten bzw. vom Verbraucher benötigten Temperatur das A und O der Speicherphilosophie. *Konsequent* ist dies in der Praxis allerdings nur mit grösstem Aufwand und ferne von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen realisierbar; zudem kann der Anlagenerbauer schon bei der ersten Inbetriebnahme böse Überraschungen erleben. Der «Eintopfspeicher» nach Bild 3 ist zwar von der Schichtung her gesehen nicht als optimal einzustufen; unter Berücksichtigung aller relevanter Faktoren sowie den oben aufgeführten Überlegungen aber auch nicht sehr weit daneben!

Speicheraufladung mit Wärmepumpe

Der 6,5-m³-Speicher ist mit einem 500-l-Einschubboiler sowie einem 4-kW-Heizstab für Notfälle ausgerüstet. An der gegenüber dem Bild um 180° versetzten Anzapfung im oberen Speicherteil ist über ein Regelventil die *Bodenheizung* angeschlossen. Der Rücklauf von der Bodenheizung wird speicherseitig vor dem unteren Dreiwegventil in den Speicher zurückgeleitet. Der oberhalb der Anzapfung liegende Speicherteil wird auf mindestens 42 °C gehalten und wenn nötig mit der Wärmepumpe während des nächtlichen Aufladezyklus des unteren Speicherteils *zwischen* durch aufgeladen. Die Boilerregelung ist einfach: Ein Thermostat schaltet über eine Schaltuhr die Wärmepumpe und die Ventile entsprechend der eingezeichneten Flussrichtung ein bzw. bei Heizbetrieb die Ventile mit Priorität um.

Der untere Teil des Speichers (Heizspeicherteil) wird je nach Aussentemperatur und mittlerer Restwärme im Speicher (vier Temperaturfühler) nachts aufgeladen. Der Ladebeginn wird dabei entsprechend der Aussentemperatur und damit dem zu erwartenden Wärmebedarf von 6.00 Uhr an vorverlegt, d. h. die Wärmepumpe läuft in der Übergangszeit z. B. von 4.00 Uhr bis 6.00 Uhr, im kalten Winter von 23.00 Uhr bis 6.00 Uhr. Im Tag erfolgt also lediglich *ein einziger* (verschleissfördernder) Anlauf; während der Periode mit Boileraufladepriorität (etwa von 4.00–5.00 Uhr) werden mit laufender Wärmepumpe nur die Ventile umgeschaltet. Die geringe Anzahl Anläufe dürften auch der Grund sein, weshalb das zuständige Elektrizitätswerk den Anlaufbetrieb ohne Sanftanlasser (Kosten etwa Fr. 1000.–) auf Zusehen hin toleriert.

Nicht eingezeichnet ist in Bild 3 die Schwimmbadheizung über einen äusserst wirksamen Plattenwärmeaustauscher. Diese kann ebenfalls wie eine Cheminéeheizung problemlos (je ein Dreiwegventil mit Regelung bzw. Handschalter wird zusätzlich benötigt) in die Anlage integriert werden.

Speicheraufladung durch Sonnenenergie

Der Rippenrohr-Wärmeaustauscher zur direkten Speicheraufladung über die Sonnenkollektoren ist aus rostfreiem Stahl und hat eine Austauschfläche von 8 m². Damit die sekundärseitige Wasserzirkulation etwas grösser ist, wurde der Wärmeaustauscher nicht im untersten Teil des Speichers angebracht. So kann der Speicher weder absichtlich noch unabsichtlich über den Sonnenkollektor entladen werden.

Die Austauscherfläche von 8 m² mag hoch erscheinen. Bei einem gemessenen *k*-Wert von etwa 60 W/m²K und einer vergleichsweise «mikrigen» Wärmeabgabe von 4000 W (entspricht je nach Speicher- und Aussentemperatur etwa einer Sonneneinstrahlung von 300–600 W/m² auf 28 m² Kollektorfläche, siehe auch Anhang) ergibt sich am Wärmeaustauscher schon ein *mittlerer* Temperaturunterschied von 8 K.

Der schlechte Wärmeübergang am Austauscher und die dadurch bedingte hohe Kollektortemperatur ist u. a. auf das sekundärseitig praktisch stehende Wasser zurückzuführen. Die Wärmeübergabe an den Speicher könnte mit einem externen Plattenwärmespeicher verbessert werden. Im Rahmen dieser Untersuchung ist diese Anwendung ins-

Temperaturdifferenzen auf der Kollektoroberfläche

Je nach Wärmegewinn des Sonnenkollektors stellt sich wegen dem Wärmewiderstand des Kollektorbleches eine Temperaturdifferenz zwischen den glykolführenden Rohren und dem dazwischenliegenden Blech ein. Die maximale Temperaturdifferenz ΔT_{max} ist dabei

$$\Delta T_{max} \cong \frac{1}{8} \frac{G' \cdot a^2}{\lambda \cdot d} \text{ [K]}$$

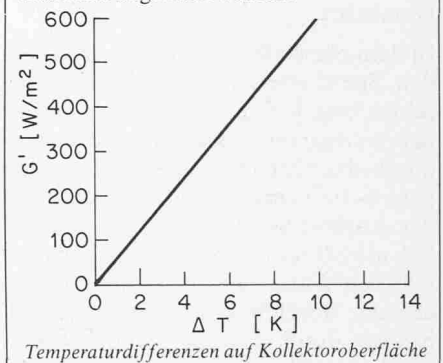
G' : Wärmegewinn des Kollektors [W/m²]

a : Rohrabstand [m]

λ : Wärmeleitfähigkeit des Kollektormaterials [W/mK]

d : Blechstärke des Kollektors [m]

Für den als Spezialausführung verlangten einfach verglasten Kupferkollektor ($\lambda_{cu} = 370 \text{ W/mK}$, Blechdicke $d = 0,4 \text{ mm}$, Rohrabstand $a = 140 \text{ mm}$) kann die maximale Temperaturdifferenz in Funktion des Einstrahlungsgewinnes gemäss Bild abgelesen werden.

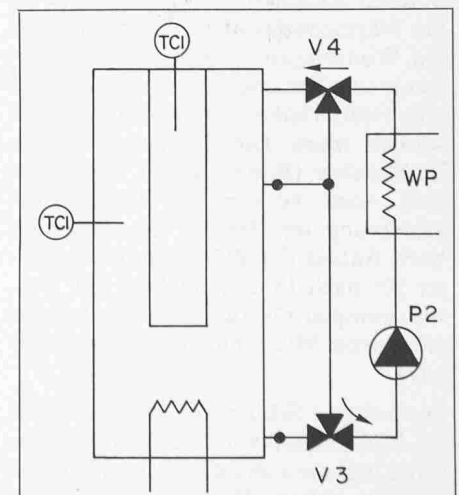


besondere hinsichtlich Temperaturschichtung im Speicher zu wenig intensiv studiert worden.

Temperaturschichtungen im Speicher bei Wärmepumpenbetrieb

Zu Messzwecken ist die ganze Anlage mit einer Vielzahl von Temperaturfüh-

Bild 3. Wärmebereitstellung und Speicherung



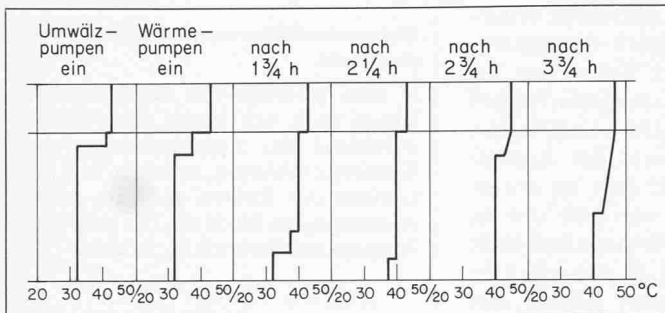


Bild 4. Temperaturprofile

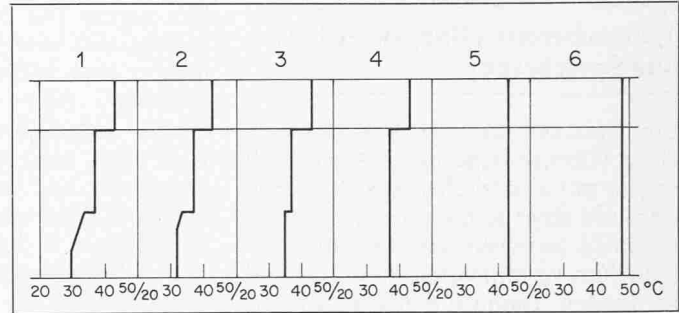


Bild 5. Temperaturprofile

lern ausgerüstet worden, wovon neun am Speicher. Die verwendeten *Mehrkanalpunktschreiber* sind zur Vermeidung eines übermässigen Papieranfalls über einen Timer lediglich im Verhältnis 3:1 (9,6' Pause 3,2' Betrieb) eingeschaltet. Die seit der Inbetriebnahme der Anlage im Herbst 1980 aufgezeichneten Temperaturen erlauben interessante, aber keinesfalls abgeschlossene Erkenntnisse.

In dem oberhalb der Anzapfung liegenden Speicherteil ist eine Temperaturschichtung lediglich über den Betrieb der Wärmepumpe möglich. Dazu wird durch die oberste Einspeisung das um etwa 6–10 °C erwärmte Heizwasser von der Anzapfung eingespiesen – anfänglich allerdings mit dem möglicherweise kälteren Wasser aus dem unteren Speicherteil durchmischt. Wahrscheinlich bedingt durch die «dämpfende» Wärmeübertragung auf das Boilerwasser und der Durchmischung mit den rund 300 l Wasser oberhalb der obersten Einspeisung («Totvolumen» durch plombierten Deckel), ist die Schichtung im doch nur 0,6 m hohen, genutzten Trinkwassererwärmungsteil oft etwas verwischt, was sich aber nicht nachteilig auswirkt.

Im oberen Speicherteil sind höhere Temperaturen als die mit dem Thermostaten regelten 42–45 °C bei Wärmepumpenbetrieb und direkter Sonnenenergieeinspeisung nur über eine entsprechende Temperaturerhöhung im unteren Speicherteil möglich. Dies ist bei Wärmepumpenbetrieb an sehr kalten Wintertagen dann wahrscheinlich, wenn der Speicher in der Nacht auf eine relativ hohe Temperatur gebracht werden muss. Die Temperaturprofile im Speicher (Bild 4) zeigen, dass dann eine noch vorhandene Temperaturschichtung im Heizteil des Speichers nach Anlauf der Wärmepumpe (schaltet 10' nach Inbetriebnahme der Umwälzpumpen ein) zuerst zerstört bzw. in eine neue Mischschicht umgewandelt wird.

Die kälteste Schicht im Speicher stellt ein Mischmasch von Rücklauftemperaturen dar, die sich im Verlauf des Tages ergeben haben. Damit die für kalte

Tage notwendigen Vorlauftemperaturen in den ersten Stunden nach Anlauf der Wärmepumpe nicht unterschritten werden, muss die Temperaturdifferenz auf der Heizwasserseite der Wärmepumpe mindestens der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf entsprechen (im Minimum etwa 6 °C, weil mit Aufnahme des Wärmepumpenbetriebs die Speicherheizung zu einer *Direktheizung* wird; die Speicheraufladung erfolgt eigentlich nur über den Wärmeüberschuss). Der Zusammenbruch der Vorlauftemperatur in den ersten zehn Minuten vor Anlauf der Wärmepumpe könnte zwar durch mehrere Massnahmen verhindert werden – da dieser Unterbruch aber nie störend in Erscheinung getreten ist, lohnt sich selbst der geringste Aufwand kaum.

Temperaturschichtung im Speicher bei direkter Sonnenenergie-Nutzung

Kommt die Wärme für eine höhere obere Speichertemperatur (>45°) von den Sonnenkollektoren, kann eine Temperaturdurchmischung im unteren Speicherteil als sicher angesehen werden (Bild 5). Mit dem Erreichen der Speichertemperatur im oberen Teil wird die Temperatur im ganzen Speicher gleichmässig ansteigen.

Es mag zusammen mit der zur Kollektorfläche grossen Speicherkapazität als nachteilig angesehen werden, wenn für die Erreichung der Boilerendtemperatur zuerst der *gesamte Speicher* auf diese Temperatur angehoben werden muss. Es wird vielmehr von den meisten Anlagenerbauern erwartet, dass mit einem intensiven Strahlungsangebot über eine kurze Dauer besser einen Teil des Boilers direkt auf die benötigte Endtemperatur gebracht wird. Dies stimmt zwar ohne Einschränkung, wenn keine Möglichkeit für das Nachheizen des Boilerwassers vorhanden ist. Im Falle einer zusätzlichen und vor allem auch sehr billigen Aufheizeinrichtung wie der Wärmepumpe ist die optimale Verwertung über eine möglichst

weitgehende Überführung der Sonnenwärme in den Speicher – genauer in den *kältesten* Speicherteil – gegeben. Die maximale und erst noch temperatur-optimale Wärmeüberführung ist fast nur bei fiktiven Verhältnissen möglich, und wenn die Regeleinrichtungen Fähigkeiten eines Hellsiehers bezüglich *künftiger* Speichertemperatur und Strahlungsangebot aufweisen. Gerade aber die einfache Sonneneinstrahlungsregel für das Mittelland «Sommer viel – Winter wenig» lässt erwarten, dass der Speicher im Sommer sowieso immer auf der Solltemperatur für die Trinkwassererwärmung ist. Diese Überlegungen werden bei dieser Anlage durch fehlende Wärmepumpenbetriebsstunden im Sommer (und wenige Betriebsstunden der Kollektor-/Speicherkombination im Winter) bestätigt!

Noch deutlicher kann die Richtigkeit der Prioritätsverteilung «Wärmemenge vor Temperatur» während der Heizsaison beobachtet werden. Geringe Wärmegewinne von den Kollektoren werden wie erwähnt ins Erdregister transportiert – nicht im Sinne einer Speicherung, sondern um zu erreichen, dass die Erdreichtemperatur möglichst nicht in die Nähe des Gefrierpunktes kommt. Erst bei Einstrahlungsintensitäten oberhalb 300–600 W/m² (bei tiefer Erdregistertemperatur eher die höhere Zahl) schaltet der Kreislauf wie erwähnt auf die *direkte Speichernutzung* um; im Winter also auch bei schönem Wetter nicht vor 9.00 Uhr.

Am wirkungsvollsten ist die Wärmeübergabe auf möglichst tiefem Temperaturniveau, d. h. auf der Temperatur des Heizungsrücklaufs. Als nicht optimal ist dabei die *direkte Rücklauferwärmung* der Bodenheizung zu bezeichnen, weil nämlich die passive Wärmenutzung an sonnigen Tagen eine aktive Beheizung erübrigt und somit gar kein Rücklauf aufzuwärmen ist! Das Dreiwegventil zur Einstellung der Vorlauftemperatur schliesst in solchen Fällen selbst im kalten Winter ganz, dies übrigens deshalb, weil in dem Leichtbau mit der trägen Bodenheizung beste Erfahrungen mit einem schwarz lackierten Aussentemperaturfühler auf der

Südwestseite gemacht wurden. Anstelle der so nicht funktionierenden, direkten Rücklauferwärmung ist aber die indirekte über den Speicher gegeben: Mit Abschluss des Wärmepumpenbetriebs beginnen die Anreicherungen an Rücklaufwasser im unteren Speicherteil, d. h. die geforderte Wärmeübergabe auf tiefstem Temperaturniveau ist wenigstens teilweise möglich.

Die aufgeführten Überlegungen zu den verschiedenen Speicherstrategien in Zusammenhang mit Sonnenenergie erinnern allerdings etwas an Sandkastenübungen, denn meist hat es *entweder nichts oder dann soviel*, dass die Schichtung im Speicher nur nebensächlich ist. So ist an sehr sonnigen Tagen jedoch ein speicherseitiger Temperaturanstieg von bis zu 15 °C/Tag möglich; die Rücklauftemperatur kann dabei bis etwa 80 °C ansteigen!

Eine problemlose Bodenheizung

Solar- und Wärmepumpenheizungen sind auf eine möglichst tiefe Vorlauftemperatur angewiesen. Die Bodenheizung kann diesbezüglich doch noch etwas mehr bieten, obschon sie auch einige meist weniger relevante Nachteile aufweist. In diesem Fall sind die Rohrlängen und Verlegungsabstände nicht speziell berechnet worden; verlegt wurden soviel Rohre, wie mit vertretbarem Aufwand maximal untergebracht werden konnten. Interessanterweise ergaben sich für die einzelnen Stränge mit der üblichen Voreinstellung sowohl recht ausgeglichene Raumtemperaturen als auch *gleichmässige Rücklauftemperaturen*. Das letzte ist besonders wichtig, weil ein Strang mit einer zu hohen Rücklauftemperatur – im ungünstigsten Fall zusammen mit einer grossen Durchflussmenge – die Speicherkapazität stark einengen kann, was mit Anheben der Speicherladetemperatur kompensiert werden muss. Leider konnten die Rücklauftemperaturen an den schlecht wärmeleitenden Kunststoffrohren der einzelnen Stränge selbst mit einer hochwertigen Kombination Digitalthermometer/Oberflächenfühler (Firma Quartz AG) nicht direkt gemessen werden. Durch Abstellen einzelner Stränge und Beobachten der sowieso registrierten gemeinsamen Rücklauftemperaturen unmittelbar vor dem Mischventil wurde wenigstens sichergestellt, dass einzelne grobe Abweichungen nicht vorlagen.

Damit die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf gross gehalten werden kann, ist auch der besonders bei Bodenheizungen üblicherweise anzu-

treffende Bypass am Vorlaufmischer ganz geschlossen worden! Interessant ist in dieser Hinsicht auch die Umwälzpumpe mit drei von Hand einstellbaren Drehzahlen: Mit kleinerer Drehzahl (geringere Fördermenge und kleinerer Förderdruck) sinkt zwar die Rücklauftemperatur. Gleichzeitig *muss* aber die Vorlauftemperatur erhöht werden. Da dann auch die Speichertemperatur entsprechend angehoben werden muss (was mit zusätzlichen Erzeuger- und Speicherverlusten verbunden ist), ist der Absenkung der Rücklauftemperatur durch Verringerung der Fördermenge eine gewisse Grenze gesetzt. Die optimale Fördermenge ist somit in erster Linie abhängig vom Speichervolumen – eine entsprechende Arbeit über diese Zusammenhänge sowie über die Temperaturschichtung im Speicher ist für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen.

Bei minus 10 °C Aussentemperatur und 21–22 °C Raumlufttemperatur konnte eine Vorlauftemperatur von 39 °C (Rücklauftemperatur etwa 32 °C) eingehalten werden. Wäre die ganze Wohnung nicht mit relativ dicken Spannteppichen und teilweise noch zusätzlich mit Perserteppichen ausgelegt, könnte die Vorlauftemperatur tiefer angesetzt werden. Ähnliches gilt auch für die Unterlagsbodenisolierung, die aus Platzgründen (vorfabriziertes Haus) nicht dicker als 6 cm gewählt werden konnte. Ein nicht gerade extrem kalter Keller ist aber manchmal auch angenehm!

In diesem Zusammenhang ist übrigens festgestellt worden, dass wegen der gut geheizten Küche die übrige Wohnung (besonders nach dem Mittagessen) als zu kühl empfunden wurde. Abhilfe schaffen durch generelles Erhöhen der Vorlauftemperatur wäre aber falsch, da die *Temperaturdifferenz* Küche/übrige Räume immer noch gleich bleibt. Richtig ist, wenn die Durchflussmenge der Bodenheizung für den Küchenstrang tiefer eingestellt wird. Dazu ist der abnehmbare Kunststoffgriff (siehe Bild 6) neu so zu befestigen, dass die Arretierung am Griff entsprechend dem gewünschten maximalen Öffnungswinkel an der Nocke des Ventilkörpers ansteht.

Aufwendige Materialwahl

Grosse Bedeutung wurde der Materialwahl zugemessen. In der Praxis werden z.T. Anlagen angetroffen, wo ohne die geringsten Hemmungen von Aluminium über Grauguss sowie verzinktes Eisen bis zum Kupfer alles, was die Installationsbranche zu bieten hat, im gleichen Kreislauf eingebaut wird. So-

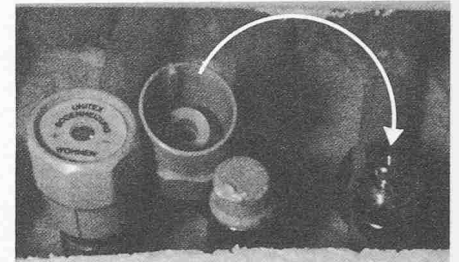


Bild 6. Begrenzung der Durchflussmenge einzelner Stränge

wohl wasserlösliche Wärmeübertragungsflüssigkeiten als auch Frostschutzlösungen mit Inhibitoren vermögen die Korrosion durch Elementbildung auf die Dauer kaum wirksam zu verhindern – mit Sauerstoffeintrag an den verschiedenen Stopfbüchsen muss auch bei unter Überdruck stehender Anlage immer gerechnet werden. Auf der Sekundärseite der Wärmepumpe ist daher kein Kupfer, auf der Primärseite nur rostfreier Stahl, Kupfer, Messing, Bronze oder Kunststoffe eingesetzt worden. Besonderen Suchaufwand erforderten ausser der geeigneten Umwälzpumpe die *Umschaltventile*. Diese mussten aus dem passenden Material sein, einen kleinen Druckverlust aufweisen, schnelle Umschaltzeiten gewährleisten sowie im geschlossenen Zustand dicht sein. Das Suchen hat sich aber gelohnt: Für Fr. 254.– ist ein Messingventil mit Motorantrieb und Federücklauf erhältlich, das als 1½"-Ausführung einen *kv*-Wert von 18 hat.

Eine Wärmepumpe ohne Kondensator (Sekundärseite) in Kupfer zu finden ist auch nicht einfach. Die letztlich eingesetzte Ausführung eines bedeutenden Schweizer Herstellers hat einen Monelwärmeaustauscher (Aufpreis etwa Fr. 500.–). Leider hat sich trotz entsprechender Beteuerungen gezeigt, dass einige Teile auf der Verdampferseite (Primärseite) aus verzinktem Eisen sind; die absolute Materialtreue auf Seite der Wärmebeschaffung konnte also nicht eingehalten werden!

Heizleistung der Wärmepumpe

Für das Gebäude wurde nach einem gegenüber der Norm SIA 380 etwas modifizierten Verfahren ein Wärmeleistungsbedarf von 7,8 kW (inkl. Trinkwassererwärmung) bei –11 °C Aussentemperatur berechnet. Für den vorgesehenen Nachtbetrieb sind aber nicht die Auslegungsverhältnisse massgebend; in solchen (seltenen) Fällen könnte die Wärmepumpe *schon am Nachmittag* in Betrieb genommen werden. Eine realistische Leistungsauslegung ist z. B. die Forderung, die Wärmepumpe im Januar mit durchschnittlich acht Stunden

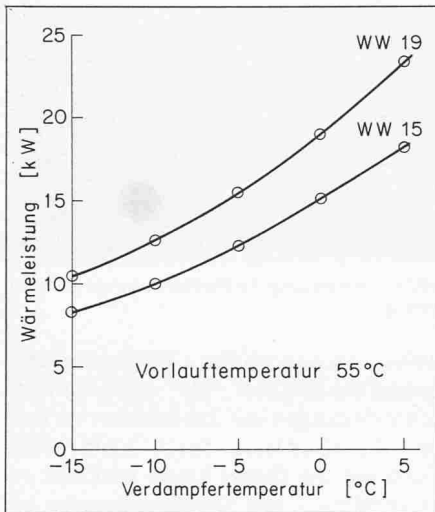


Bild 7. Wärmeleistung zweier Wärmepumpen

Laufzeit im Niedertarifbereich auskommen zu lassen. Bei einer mittleren Aussentemperatur von null Grad Celsius wird der Wärmeleistungsbedarf an sonnenlosen Tagen unter Berücksichtigung der inneren Abwärmen sowie der in der Praxis eher tieferen Werte als nach Berechnung etwa 4,7 kW (inkl. Trinkwassererwärmung und Speicherverluste) sein. Bezogen auf den Achtstundenbetrieb sind dies 14,1 kW.

Nach Bild 7 ist die Leistung der Wärmepumpe in erster Linie von der Verdampfertemperatur abhängig. Diese stellt sich je nach Temperatur des Verdampferücklaufs (abhängig von der Umwälzmenge und des Erdregisterücklaufs) sowie der Temperaturdifferenz am Verdampfer selbst ein. Es ist bei der Grösse des Erdregisters (etwa 420 m²) nicht zu erwarten, dass der Rücklauf des Erdregisters bis auf null Grad fallen wird. Bei grossen Umwälzmengen (mehr als 2 m³/h) und den Firmenangaben hinsichtlich der Temperaturdifferenzen am Verdampfer sollte eine Verdampfertemperatur von etwa -6 °C nicht unterschritten werden. Trotz der knappen Leistung in diesem Bereich (Bild 7) wurde der Typ WW 15 gewählt: Da beide Wärmepumpen mit identischen Verdampfern und Kondensatoren ausgerüstet sind, muss die Leistungsziffer der WW 19 wegen der sich grösser einstellenden Temperaturdifferenzen aus der Wärmeübertragung an Verdampfer und Kondensator bei gleichen (möglichst grossen) Durchflussmengen kleiner ausfallen. Diese kann mit vernünftigem Aufwand auf der Pumpenseite beim Kondensator auf etwa 2 m³/h gesteigert werden, was dann bei voller Leistung einer Temperaturerhöhung des durchfliessenden Heizwassers um bis zu 10 °C (WW 15) bzw. bis zu 12 °C (WW 19) ergeben kann. Je höher diese Temperaturdifferenz ausfällt, um so weniger hohe Heiz-

wassertemperaturen können mit der Wärmepumpe erreicht werden: Hat z. B. der Heizwasserzulauf aus dem Speicher zur Wärmepumpe eine Temperatur von 43 °C (auch im Sommer beim Aufladen des Boilerteiles durchaus realistisch), stellt sich zusammen mit der Erwärmung um 12 °C und der in diesem Leistungsbereich mindestens 6 °C betragenden Temperaturerhöhung am Kondensator eine Verdampfertemperatur über 60 °C ein, was ein sofortiges Abschalten der Wärmepumpe zur Folge hat. Eine kleinere Wärmepumpenleistung ist daher bei wenig leistungsfähigen Wärmeaustauschern nur von Vorteil, während sonst wegen der kleiner werdenden Laufzeiten am Tage eindeutig die leistungsstärkere Ausführung WW 19 gewählt worden wäre. Das Beispiel zeigt aber ebenfalls, wie kritisch sich Durchflussmengen bzw. Druckdifferenzen sowie Wärmedurchgangszahlen von Wärmeaustauschern auf die max. erreichbare Heizwassertemperatur auswirken können – nicht zu reden von den Stromkosten für die stärkeren Umwälzpumpen.

Ähnliche Verhältnisse ergeben sich beim Verdampfer. Die für die Leistung besonders wichtige Verdampfertemperatur kann nur mit einem für diesbezüglichen Druckverlust (hohe Durchflussmengen möglich) und Wärmeübergang (kleine Temperaturdifferenzen) grosszügig bemessenen Verdampfer tief gehalten werden. Es ist in diesem Zusammenhang klar, dass gewisse Anlagen mit einem Glykol-Kreislauf in 3/4"-Dimensionen (inkl. der entsprechenden Absperr- und Motor- bzw. Magnetventile!) und «schwächbrüstigen» Umwälzpumpen, angeschlossen an einem Erdregister aus 8–10 Einzelregistern zu 100 m aus Peh 20/16 mm, absolut unbefriedigende Ergebnisse liefern. Ein Blick in eine Druckverlusttabelle würde nämlich zeigen, dass es so nicht gehen kann, insbesondere unter Berücksichtigung der Viskosität von kalten Glykollösungen! Meist (glücklicherweise?) werden aber schlechtlaufende Anlagen mangels geeigneter Instrumentierung und Zeit zum Ausmessen gar nicht als solche erkannt!

Im vorliegenden Fall ist das Erdregister aus 20 Einzelregistern zu 70 m Länge (Peh 20/16 mm, Fläche 420 m², Tiefe 1,5 m) aufgebaut worden. Der Druckverlust ist zusammen mit den 5/4"-Zuleitungen zur Wärmepumpe, den Handventilen in 3/4" und 1/2" sowie den 1/2"-Motorventilen gegenüber dem Druckverlust des Wärmepumpenverdampfers fast vernachlässigbar. Auch bei Ausfall von drei Einzelregistern wäre immer noch eine genügend grosse Umwälzmenge gewährleistet.

Die Umwälzpumpe sollte nie zu knapp in der Leistung gewählt werden, fällt doch die Umwälzmenge gegenüber Wasser bei steigender elektrischer Leistungsaufnahme deutlich ab. Äthylenglykol in möglichst niedriger Konzentration ist zwar wegen der Giftigkeit nicht überall verwendbar, wegen der besseren Verpumpbarkeit aber von Vorteil.

Im Gegensatz zum Wärmepumpenbetrieb darf die Durchflussmenge durch den Sonnenkollektor nicht zu hoch sein – die für ein Umschalten auf direkte Speichernutzung notwendige Kollektortemperatur wird sonst bei der Leistungsfähigkeit des Erdregisters fast nicht erreicht. Ausgezeichnet bewährt hat sich dabei das Vorhandensein von drei Drehzahlen an der Umwälzpumpe: Für die Speisung der Wärmepumpe läuft die Umwälzpumpe auf der zweithöchsten Drehzahl, bei Sonnenkollektorbetrieb (im Hochtarif) wird die Pumpe mit einer einfachen Regelung auf die kleinste Drehzahl umgeschaltet. Durch diese Massnahme kann der im Sommer doch recht erhebliche Elektrizitätsverbrauch (bei vielfach kleinem Nutzen, sei es für das Erdregister oder den Speicher) um einiges vermindert werden. Allerdings ist die Pumpenleistung bei der kleinsten Drehzahl immer noch zu gross, so dass der Kreislauf etwas ange-drosselt werden musste. Eine 1"-Leitung zum Sonnenkollektor hätte daher genügt.

Betriebserfahrungen

Sorgen mit Undichtigkeiten

Es begann schon bei der Dichtheitskontrolle des Erdregisters: Bei nachträglichen Gartenarbeiten mit dem Trax ist ein Strang des Erdregisters verletzt worden. Dieser ist zwar reparierbar; ausser den grossen Umtrieben für die Behebung des Schadens wirkt sich aber eine ausgebesserte Stelle immer ungünstig auf die Lebensdauer des später nicht mehr zugänglichen Registers aus.

Richtig los ging's aber erst beim Füllen der Anlage mit der Wärmeübertragungsflüssigkeit. Dazu einige Stichworte (untertriebene Darstellung!):

Anlage mit Wärmeübertragungsflüssigkeit füllen, ein Sonnenkollektor undicht, Wärmeübertragungsflüssigkeit ablassen, einige Tage warten, Kollektor heraustrennen und wechseln, Wärmeübertragungsflüssigkeit wieder einfüllen, undichte Lötverbindungen und Ventilverschraubungen, erneut Wärmeübertragungsflüssigkeit ablassen, Keller putzen, warten, u. a. an nicht

mehr ausbaubaren Ventilen löten (!), Anlage mit Wärmeübertragungsflüssigkeit füllen, Ventilverschraubungen und -stopfbüchsen erst recht undicht, Wärmeübertragungsflüssigkeit ablassen, Keller putzen, einige Tage warten, Ventile heraussägen und neue (mit Holänderverschraubung) einbauen, Anlage auffüllen und in Betrieb nehmen, Zirkulationsmenge wesentlich kleiner als nach Theorie, eine Woche später beginnt Wärmeübertragungsflüssigkeit von der Garagendecke zu tropfen, nach Ansicht des Installateurs ist die Wärmeübertragungsflüssigkeit vom automatischen Entlüfter auf dem Dach ausgetreten, das mit Zustimmung der Lieferfirma als Mischventil eingesetzte Dreiweg-(Verteil-)Ventil Erdregister/Speicherwärmeaustauscher fängt an «zu schlagen», Installateur lässt sich nicht mehr blicken, mit anderem Installateur Wärmeübertragungsflüssigkeit abgelassen, Ventil im Vorlauf Erdregister/Speicherwärmeaustauscher einsetzen, prophylaktisch das andere Dreiwegventil in Wärmeübertragungsflüssigkeitskreislauf austauschen, zu kleines Ausdehnungsgefäß auswechseln, unmögliche Leitungsführung auf dem Dach ändern und automatische Entlüfter durch Handventile ersetzen, Durchflussmenge immer noch zu gering, und von der Garagendecke tropft es weiter, arbeitsintensive Messungen an Pumpe und Leitungen, Wärmeübertragungsflüssigkeit ablassen, Garagendecke aufspitzen, in der Wohnung Kontrollöffnungen anbringen, Leitung mit undichter Lötstelle auswechseln, nicht mehr zugängliche Filter heraussägen, mit Hanf- und Kunststoffteilen total verschmutztes Filter ersetzen und an zugänglicher Stelle installieren . . .

Und die Lehren

Ein ortsansässiger Installateur ist einem ortsfremden vorzuziehen, nicht nur weil sein Anfahrtsweg kürzer ist, sondern weil er wahrscheinlich auch an seinem guten Ruf als Geschäftsmann interessiert ist. Die Leitungsführung ist möglichst genau festzulegen. So können in Ruhe optimale (kürzeste) Verbindungen überlegt werden; interne Zirkulationen, unzugängliche Armaturen und unästhetische Leitungsführungen sind so weniger wahrscheinlich (Bild 8). Eine «Nach-mir-die-Sintflut»-Installation muss vermieden werden: Alle Leitungen sollten nach Möglichkeit stets zugänglich und kontrollierbar sein, sind also wenn möglich in Leitungskanälen unterzubringen, Mauerdurchbrüche z. B. nur ausschäumen, Erdregisteranschlüsse in einem zugänglichen Schacht vorsehen, Zuleitungen zum Haus mit einem isolierten Zementrohr schützen, nachträglich schlecht

zugängliche Leitungen nur an einem Stück ausführen usw.

Sorgen mit der Wärmepumpe

Obwohl betriebsbereit bestellt, wurde die Wärmepumpe zwar mit allen im Gehäuse montierten Bestandteilen, aber ohne eine interne elektrische Verdrahtung geliefert. Bereits bei der ersten Inbetriebnahme durch die Lieferfirma (nach deren Ansicht natürlich erfolgreichen) stand die nicht unerhebliche Diskrepanz zwischen der Leistung nach Firmenangabe und der Wirklichkeit fest. Wie erwähnt, war zwar anfänglich die Durchflussmenge der Wärmeübertragungsflüssigkeit durch den Verdampfer keineswegs optimal, aber immer noch oberhalb üblicher Mengen. Die ungenügende Leistung war jedoch eindeutig auf die zu tiefe Verdampferoperatortemperatur, hervorgerufen durch einen unerklärlichen Temperaturunterschied zwischen dem verdampfenden Freon und dem kälteren der beiden Rückläufe der Wärmeübertragungsflüssigkeit aus den beiden parallelgeschalteten Verdampferteilen, zurückzuführen. Der Unterschied zwischen beiden Rücklauftemperaturen – der eine Rücklauf entsprach fast der Temperatur des Vorlaufes – war ein weiteres Indiz dafür, dass mit dem Verdampfer etwas nicht in Ordnung war. Die Fördermenge konnte durch Drehzahlumschaltung der Umwälzpumpe innerhalb eines weiten Bereichs variiert werden, was auf die Verdampferoperatortemperatur ohne nennenswerte Auswirkungen blieb, d. h. ein Fehler auf dem Peripheriebereich der Wärmepumpe konnte ausgeschlossen werden. Wer nun glaubt, die Lieferfirma hätte angesichts der eindeutigen Sachlage etwas Konkretes unternommen, hat sich getäuscht. Vielmehr wurde versucht, dem Lieferanten der Wärmeübertragungsflüssigkeit die Schuld in die Schuhe zu schieben, was dieser mit dem Hinweis auf die ihm nur bekannten Probleme mit Wärmepumpen dieses Herstellers energisch zurückwies. blieb nur die Lösung, die Wärmeübertragungsflüssigkeit gegen eine Mischung aus Äthylen-Glykol und Wasser auszuwechseln; allerdings erst nach der zwischen dem Wärmepumpenhersteller und dem Lieferanten der Wärmeübertragungsflüssigkeit geregelten Kosten.

Natürlich war nach dem Austausch der Flüssigkeit kein Unterschied an der Verdampferoperatortemperatur feststellbar – auch nicht nach nochmaligen Einstellarbeiten. Der Wärmepumpen-Hersteller hat dann auch bezahlt (über eine Gutschrift für einen Jahresservice), allerdings nicht ohne noch zu versuchen, sich um die Bezahlung zu drücken. Das

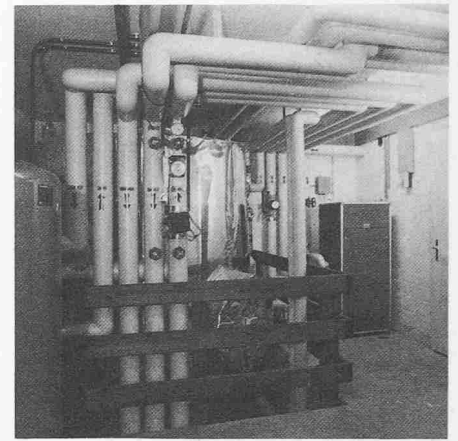


Bild 8. Anlageansicht

Insistieren hat sich schliesslich gelohnt: Rund ein halbes Jahr nach der ersten Inbetriebnahme findet der Lieferant plötzlich einen Fehler im Verdampfer seiner Wärmepumpen. Der Wärmepumpen-Verdampfer wurde an Ort geändert und die Leistung entspricht seither nicht den Datenblättern, ist aber doch akzeptierbar. Wie viele Wärmepumpen den gleichen Fehler gehabt haben bzw. immer noch haben, ist unbekannt. Immerhin sollte besonders im Falle der Wärmepumpe von seiten des Projektierenden nichts unterlassen werden, um die Funktionsweise der Anlage überprüfen zu können. Insbesondere sollten Verdampfer- und Kondensationstemperatur sowie alle Vorlauf- und Rücklauftemperaturen dauernd und gleichzeitig kontrollierbar sein. Eine kontinuierliche Messung der Durchflussmengen (Rotameter?) ist ebenfalls in Erwägung zu ziehen.

Nach diesen Erfahrungen (sie erinnern an die Pionierzeit der Wärmepumpe vor vielen Jahren) muss man sich fragen, wie die Sache mit einer der vielen wie aus dem Boden geschossenen und unterdessen wieder verschwundenen Wärmepumpen-Verkaufsfirmen abgelaufen wäre. Denn obschon

- Verdampfer und Kondensator der Wärmepumpe eindeutig zu wenig leistungsfähig sind,
- ihre Druckverluste viel zu gross sind,
- sämtliche Leistungsangaben zwar immer innerhalb der Toleranzen, aber stets am äussersten Rand der noch zumutbaren Abweichung anzutreffen sind,

ein Gespräch mit der Firma war immer möglich, und Befürchtungen, diese mache demnächst Konkurs, mussten nicht gehegt werden. Wenn aber die Firma behauptet, kaum Probleme zu haben, so sei hier die Vermutung geäußert, dass nur deshalb wenig Probleme bekannt werden, weil die Schwierigkeiten vom Projektierenden bzw. Benüt-

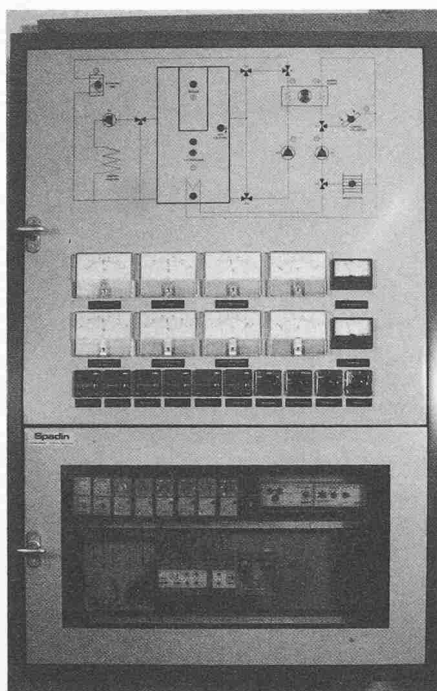


Bild 9. Schaltschrank

zer mangels Messeinrichtungen bzw. zuwenig leistungsfähiger Peripherie (Durchflussmenge, Leitungsdimensionen, Pumpenleistungen usw.) gar nicht erkannt werden. Die Richtigkeit dieser Hypothese wird auch untermauert durch die serienmässige Ausrüstung der Wärmepumpe mit einem zu schwachen Wärmepaket im Hauptschütz, das einen Betrieb gemäss den Leistungsblättern gar nicht zulassen würde!

Sorgen mit der Regelung

Fast ohne Einschränkungen nur Positives ist von den Elektrikern bzw. dem Erbauer des Schaltkastens zu berichten (Bild 9). Ärger dagegen bereitete die Speicheraufladesteuerung. Das Gerät ist auf Störungsspitzen über die Netzleitung (und wahrscheinlich auch über die Fühlerzuleitungen) dermassen empfindlich, dass nach jeder Betätigung eines Schützens oder Relais' «der gesamte Schaltkasteninhalt Amok lief». Versuche mit Netzfiltern und bessere Siebung der Gleichspannung im Regler brachten ungenügende Resultate. Da eine separate Phase für den Regler nicht zur Verfügung stand, wurden die Störungen über eine Verzögerung des Schaltsignals (Verzögerungszeit etwa zwei Sekunden) unterdrückt.

Die Störanfälligkeit des Reglers ist dem Hersteller bekannt. Es sollte daher möglich sein, dass dieser die Verzögerung gleich fest in den Regler einbaut; ein zusätzliches Relais wird dann nicht mehr benötigt. Angenehmer wäre auch eine *einstellbare Schaltdifferenz*, können doch die Temperaturverhältnisse im Speicher mit anlaufender Umwälzpumpe (Wärmepumpe steht noch still)

sich so ändern, dass der Sollwert wieder erreicht wird und die Umwälzpumpen nochmals stillstehen.

Überhaupt ist die Einstellungsanleitung für den Betrieb mit einer Wärmepumpe wenig geeignet. Im Gegensatz zu Elektrospeicherheizungen muss nämlich auf einen Ladegrad mit möglichst kleinem Überschuss geachtet werden. Ausserdem darf der Ist-Wert bei einmal eingeschalteter Wärmepumpe nicht mehr den Sollwert erreichen, sonst schaltet die Wärmepumpe in der Aufladepriode mehrmals ein bzw. aus. Die richtige Einstellung konnte der Verfasser erst vornehmen, nachdem die Parameter über ein Computermodell simuliert werden konnten. Dann wird auch offensichtlich, dass eine gewünschte Funktionsweise mit unendlich vielen Einstellmöglichkeiten realisierbar ist, was sich auf das Verständnis der Sache ungünstig auswirkt. Es hat (ausser dem Korrekturregler) eine Einstellmöglichkeit zuviel!

Bei den Temperaturreglern wäre zu begrüssen, wenn diese nicht mit den allerbilligsten Kohleschichttrimmern (zehn Rappen das Stück) ausgerüstet würden. Bei dem Preis der Regler sollten qualitativ hochstehende Zehngangpotentiometer eingesetzt werden, mit denen im eingebauten Zustand von aussen der Leitungswiderstand der Fühler bzw. die Eichungen oder Kontrollen vorgenommen werden können.

Zum Zeitpunkt der Reglerevaluation war die Mehrfachverwendung des Fühlersignals sowie die gleichzeitige digitale Anzeige der Temperatur, zusammen mit einem brauchbaren Bereich (z. B. -10°C bis 100°C) und einer einstellbaren Schaltdifferenz, fast nicht erhältlich. Die realisierte Lösung hat z. B. drei Fühler zur Erfassung der Aussentemperatur (für den Speicheraufladeregler, für die witterungsabhängige Vorlauftemperaturregelung sowie für die Registrierung) und für die Laderegelung und Registrierung zweimal vier Temperaturfühler. Durch die Mehrfachverwendung hätten somit Fühler, Geräte, elektrische Leitungen, d. h. Aufwand und Geld gespart werden können. In einigen Fällen mussten zudem die Messbereiche mit Präzisionswiderständen verschoben werden. Ein zwar teurer Mikroprozessor wäre vielleicht heute das Richtige, könnte aber im Störfall nur durch einen hochbezahlten Spezialisten repariert werden. Die konventionelle Technik hat diesbezüglich doch auch noch gewisse Vorteile!

Andere Sorgen

Der fast vier Meter hohe Speicher steht in einer Grube. Entgegen den Abma-

chungen hat die Grube keinen Ablauf (und auch keinen Pumpensumpf). Ausgelaufene Flüssigkeit muss daher mit einem Lappen vom Grubenboden aufgewischt werden, was angesichts der knappen Platzverhältnisse bei nur 10 cm Speicherisolationdicke (ein Fehler des Projektierenden) eine Zumutung bedeutet.

Keine ideale Lösung stellt die bei stillstehender Anlage offene Verbindung zwischen der Wärmepumpe und dem Speicher dar. Wäre der Speicher höher gelegen als die Wärmepumpe, hätte diese auch immer die tiefste Temperatur des Speichers. Mit der sich so ergebenden Anordnung mit der Wärmepumpe auf etwa der halben Speicherhöhe ergibt sich durch Thermosyphon-Wirkung eine Wärmepumpentemperatur entsprechend der Speichertemperatur auf dieser Höhe. Mit dem sowieso vorgesehenen vorbeugenden Ersatz des ebenfalls mit Zustimmung der Lieferfirma als Mischventil eingesetzten Dreiwegventils V3 durch zwei Durchgangsventile löst sich aber das Problem von selbst.

Freuden gibt es aber auch

Ausgenommen von einem zweimal hintereinander undicht gewordenen automatischen Entlüfter sind seit mehr als einem Jahr keine Störungen mehr aufgetreten. Die Regelungen, Dreiwegventile, die Wärmepumpe usw. versehen problemlos ihren Dienst. Durch einen zusätzlichen Mehrfachschalter ist die manuelle Eingriffsmöglichkeit in die Anlage soweit verbessert worden, dass auch keine Fehlbedienungen durch Handeingriffe über das Verstellen der Sollwerte an den Reglern aufgetreten sind.

Nachtrag Dez. 1982: Ein «durchgeschmortes» Zeitrelais (Swiss made!) hatte zur Folge, dass die Wärmepumpe nicht anlieft. Der Wärmepumpenhersteller offerierte sofort Garantieersatz, da die mangelhafte Qualität des Zeitrelais (angeblich aus einer fehlerbehafteten Serie) dem Hersteller offensichtlich bestens bekannt war. Das gleichtags eingesetzte neue Relais aus einer anderen Serie hielt gerade bis zum Nachtesen. Also nochmals zum Kunden hinfahren und zwecks Aufrechterhaltung des Heizbetriebes mit schlechtem Gewissen das Zeitrelais überbrücken. Nein, falsch angenommen! Auf einen weiteren Garantieersatz wurde grosszügig verzichtet und die Störung mit einem Relais eines anderen Herstellers endgültig behoben.

Bei üblicher Kostenberechnung hätte das defekte Relais inkl. Fehlersuche und Umtrieben mehr gekostet als ein Jahresstromverbrauch der Wärmepum-

pe. Je «alternativer» die Heizung, d. h. je weniger reine Betriebskosten bei immer höheren Investitionskosten und steigender Komplexität anfallen, um so drastischer wird das Kosten/Nutzenverhältnis durch Unterhalts- oder Reparaturkosten noch weiter verschlechtert. Diese Erkenntnis macht sich nicht nur langsam unter den Bauherren breit – auch die Begeisterung der Fachbranchen für «Alternativen» scheint trotz den hohen Energiepreisen abzuflauen.

Die Wärmepumpenhersteller sollten sich daher vorsehen: Schlamperei verärgert nämlich nicht nur den Käufer!

Der Stromverbrauch der gesamten Anlage (Umwälzpumpen, Heizungs- und Wärmepumpe, Ventile, Regelungen) in einem klimatischen Normaljahr dürfte knapp unter 10 000 kWh liegen. Davon entfallen etwa 20 Prozent auf die Hochtarifzeit. Dies bedeutet, dass die Fremdenergie für die Heizung, Trinkwassererwärmung und teilw. Beheizung des Schwimmbades auf rund Fr. 800.– je Normaljahr zu stehen kommt.

Die Leistungsziffer der Wärmepumpe allein beträgt im gewichteten Jahresmittel brutto 3,4 und reduziert sich unter Berücksichtigung der Stromaufnahme u. a. beider Umwälzpumpen auf netto 3,2. Durch einige kleinere Massnahmen auf Seite des Benutzerverhaltens und der Heizanlage sollte der Verbrauch noch um etwa 10 Prozent vermindert sein. Grosse Investitionen lohnen sich aber bei diesem Verbrauch nicht mehr, denn ein Minderverbrauch von 10 Prozent entspricht lediglich einer absoluten jährlichen Einsparung von Fr. 80.–.

Ungenügende Wirtschaftlichkeit

Unter der fraglichen Voraussetzung gleicher Wärmeabgabe im Winter und besonders verschwenderisch im Sommer würde die Gebäudebeheizung, die Trinkwassererwärmung und die Schwimmbadbeheizung mit einer guten Ölfeuerung rund 4000 Liter Heizöl brauchen, d. h. bei einem Heizölpreis von Fr. 70.–/100 kg würden die Brennstoffkosten etwa Fr. 2400.– betragen. Die Kosten für Fremdenergie kommen also mit der Wärmepumpe auf rund einen Drittel zu stehen. Würde aber – was wahrscheinlich wäre – im Falle der Ölfeuerung mit der Heizwärme weniger grosszügig umgegangen, müsste eher mit den zwei- bis zweieinhalbfachen Fremdenergiekosten für die Wärmepumpe gerechnet werden. Durch die Wartungsarbeiten (für die Öl- und die Wärmepumpenheizung) wird das Kostenverhältnis noch weiter verschlechtert; der jährlich empfohlene Wärmepumpenservice kostet z. B. Fr. 350.–,

das ist fast die Hälfte der jährlichen Fremdenergiekosten; mit Fr. 600.– muss für das für alle zwei Jahre vorgeschlagene Auswechseln der Wärmeübertragungsflüssigkeit gerechnet werden.

Eine wirtschaftlichere Betriebsweise wäre möglich, wenn insbesondere ausserhalb der kältesten Tage im Winter bedeutend mehr Wärme «verbraucht» würde. Die Kostendifferenz aus dem Fremdenergiebedarf würde dann grösser bei gleichbleibenden Investitions- und übrigen Betriebskosten. Eine gute Wärmedämmung wirkt sich daher so gesehen kontraproduktiv aus, ist aber wegen der benötigten tiefen Vorlauftemperaturen für den Wärmepumpenbetrieb absolut notwendig!

Die komplette Wärmepumpen-Heizanlage kostete in den Jahren 1979/80 inkl. aller Randkosten wie Bodenheizung, Elektriker usw. rund 80 000 Fr. Das ist etwa das Doppelte, was eine ebenfalls komplette konventionelle Heizanlage der gehobenen Mittelklasse gekostet hätte. Bezogen auf die damaligen Preise wären heute sicher einige kleinere Einsparungen möglich, z. B. ein einfacherer Schaltschrank mit weniger Temperaturanzeigen, eine etwas einfachere Leitungsführung mit z. T. kleineren Dimensionen, eine kleinere Kollektorflä-

che und ein günstigeres Verhältnis Sonnenkollektor-/Wärmeaustauscherfläche (siehe Anhang) usw. Die grosse Einsparung ist jedoch nicht möglich. Eine Amortisationsrechnung über die Fremdenergiekosten ist daher auch bei höheren Energiekosten nicht einmal der Recherei wert.

Es hat sich eingebürgert, bei z. T. unwirtschaftlichen Massnahmen zur Verminderung des Energieverbrauchs eine sogenannte *dynamische Kostenberechnung* durchzuführen. Die dabei anzunehmenden (und auf einer unsicheren Prognose beruhenden) jährlichen Energiepreissteigerungen beeinflussen aber das Endergebnis ausserordentlich stark! Dieses Vorgehen ist um so ungewisser, als mit der heute noch üblichen Art des Teuerungsausgleichs der Energiepreisanstieg real gar keiner mehr ist (man vergleiche dazu einmal die Energiepreise und das mittlere Einkommen ab 1950). Andererseits muss man sich fragen, ob denn alles rentabel zu sein braucht. Oder rechnet der Einfamilienhausbesitzer aus, was ihn die Rosen in den Rabatten bei den heutigen Bodenpreisen eigentlich kosten? Eine gewisse Unabhängigkeit ist doch auch etwas wert, denn «die Nachfrage macht den Preis und die Abhängigkeit».

Anhang: Betrachtungen zur Umwälzmenge bei Sonnenkollektoranlagen und Bemessung des Wärmeaustauschers

In Sonnenenergieanlagen mit unterhalb der Kollektoren angeordneten Speichern und Wärmeaustauschern muss die Zirkulation der Wärmeübertragungsflüssigkeit durch eine Pumpe gewährleistet sein. Ob dabei die gefühlsmässige Ansicht zutrifft, eine hohe Umwälzmenge ergebe ein wesentlich besseren Wirkungsgrad als eine schwache Pumpe mit niedrigerem Fremdenergiebedarf, ist näherungsweise über folgende Ansätze herleitbar:

Die von den Kollektoren abgegebene Wärmeleistung \dot{Q} ist

$$(1) \quad \dot{Q} \cong [G \cdot A - k_0 (\vartheta_m - \vartheta_a)] F_0$$

G : Globalstrahlung [W/m²]

A : Optischer Wirkungsgrad des Kollektors [-]

k_0 : Thermischer Verlustfaktor des Kollektors in der Nähe der Umgebungstemperatur [W/m²K]

ϑ_m : Mittlere Kollektortemperatur bzw. näherungsweise mittlere Mediumtemperatur [°C]

ϑ_a : Umgebungstemperatur des Kollektors [°C]

F_0 : Kollektorfläche [m²]

Insbesondere bei einem in horizontaler Ebene angeordneten Wärmeaustauscher ist die an den Speicher abgegebene Wärmeleistung

$$(2) \quad \dot{Q} \cong k_{WT} \cdot F_{WT} (\vartheta_m - \vartheta_{Sp})$$

k_{WT} : Wärmedurchgangszahl des Wärmeaustauschers [W/m²K]

F_{WT} : Fläche des Wärmeaustauschers [m²]

ϑ_{Sp} : Mittlere Speichertemperatur in der Umgebung des Wärmeaustauschers [°C]

Durch Gleichsetzen von Gl. (1) und Gl. (2) sowie Auflösen nach ϑ_m wird

$$(3) \quad \vartheta_m \cong \frac{F_0 \cdot G \cdot A + F_0 \cdot k_0 \cdot \vartheta_a + F_{WT} \cdot k_{WT} \cdot \vartheta_{Sp}}{F_0 \cdot k_0 + F_{WT} \cdot k_{WT}}$$

Durchflussmengen im Normalbereich unwichtig

Welche mittlere Mediumtemperatur (Mittel zwischen Kollektorvorlauf- und Rücklauf-temperatur) sich einstellt, ist offensichtlich von vielen Einflussgrössen abhängig, nur nicht direkt von der Durchflussmenge. Dies ist in der Praxis auch gut nachweisbar, sinkt doch mit der Drosselung der Umwälzmenge die Vorlauf-temperatur bzw. steigt um praktisch den gleichen Betrag auch die Rücklauf-temperatur (siehe dazu Bilder 10 und 11). Das Mittel aus Vor- und Rücklauf bleibt annähernd gleich, ausser es wird durch Einstellen einer Fördermenge unter etwa 10 l Wärmeübertragungsflüssigkeit je Stunde und Quadratmeter Kollektor in den Grenzbe-

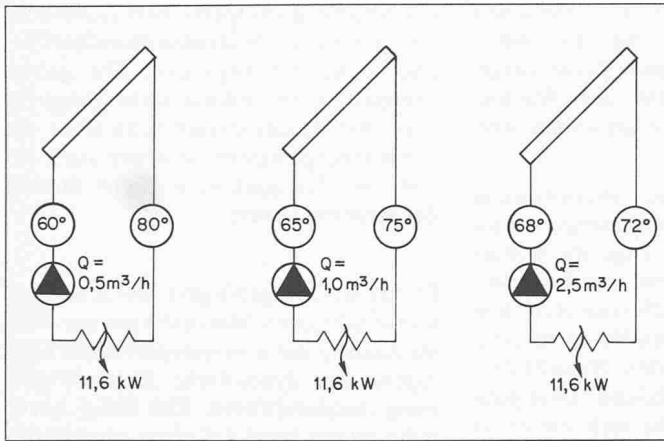


Bild 10. Unterschiedliche Umwälzmengen - praktisch gleiche mittlere Temperaturen und Leistungen

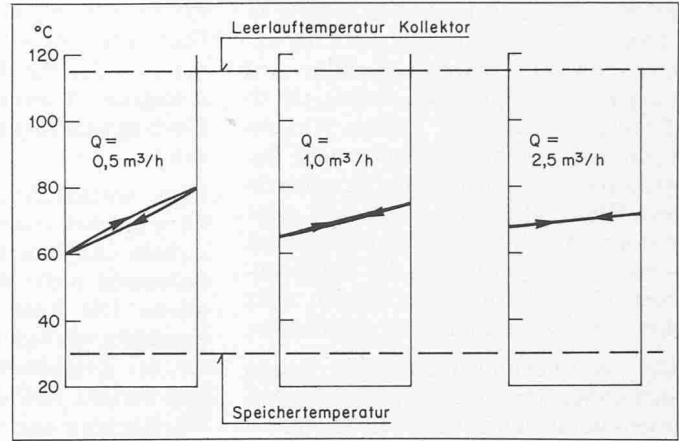


Bild 11. Temperaturverläufe an Kollektor bzw. Wärmeaustauscher bei verschiedenen Umwälzmengen

reich vorstossen, wo der Unterschied zwischen den eigentlich korrekterweise einzusetzenden logarithmischen Mitteltemperaturen und den ersatzweise eingesetzten arithmetischen Mitteltemperaturen zu gross wird! In diesem Fall wird die Näherung noch zusätzlich ungenauer, weil der thermische Verlustfaktor des Kollektors (Strahlungsanteil) mit steigender Temperaturdifferenz grösser wird. Die Durchflussmenge und damit indirekt die Strömungsgeschwindigkeit hat dagegen auf die Wärmedurchgangszahl k_{WT} (und ähnlich auf den thermischen Verlustfaktor k_0 des Kollektors) kaum Auswirkungen, wird doch diese nahezu ausschliesslich durch die sehr tiefe Wärmeübergangszahl Wärmeaustauscher/Speichermedium bestimmt.

Eine ausreichende Genauigkeit der Gleichungen ist bei mehr oder weniger gleichmässigem Durchfluss der einzelnen Kollektorelemente immerhin gegeben, wenn die Differenz zwischen Kollektorrücklauf-temperatur/Kollektorleerlauf-temperatur mind. doppelt so gross ist wie die Differenz Kollektorrücklauf-temperatur/Kollektorleer-

temperatur (analoges gilt für den Wärmeaustauscher im Speicher). Der Fehler aus der Wärmeübertragung ist dann kleiner als 5 Prozent; der nichtlineare Einfluss des thermischen Verlustfaktors sowie allenfalls der Temperaturdifferenzen zwischen den flüssigkeitsführenden Kollektorrohren und den dazwischenliegenden Flächen kann so ebenfalls nahezu vernachlässigt werden. Die Durchflussmenge sollte daher vorwiegend auf die Anforderungen der Regelung zugeschnitten werden!

Erstrebenswert: Tiefe mittlere Kreislauf-temperaturen

Etwas übersichtlicher werden die Zusammenhänge nach Gleichung (3), wenn diese nach der Differenz zwischen der mittleren Medium- und der Speichertemperatur umgeformt wird. Dann ist

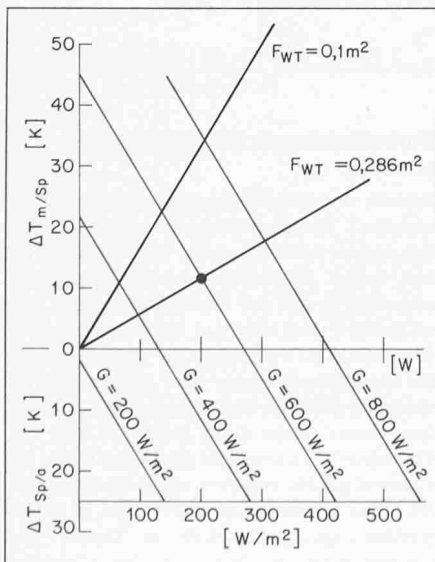
$$(4) \quad \Delta T_{m/Sp} \cong \frac{\frac{G \cdot A}{k_0} - \Delta T_{Sp/a}}{\frac{F_{WT} \cdot k_{WT}}{F_0 \cdot k_0} + 1}$$

$\Delta T_{m/Sp}$: Temperaturunterschied zwischen der mittleren Kreislauf-temperatur und der Speichertemperatur [K]

$\Delta T_{Sp/a}$: Temperaturunterschied zwischen der Speichertemperatur und der Aussentemperatur [K]

Bild 12. Charakteristik von Kollektor und Wärmeaustauscher
Annahmen:

Kollektor: $A = 0,7$; $k_0 = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$; Kollektorfläche $F_0 = 1 \text{ m}^2$. Wärmeaustauscher: $k_{WT} = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$; Tauscherfläche $F_{WT} = 0,1$ bzw. $0,286 \text{ m}^2$



Im Zähler von Gleichung (4) entspricht der Ausdruck $G \cdot A / k_0$ näherungsweise der maximal erreichbaren Temperaturerhöhung (Leerlauf-temperatur) des Kollektors gegenüber der Aussentemperatur bei gegebenem G , A und k_0 . Der Ausdruck wird um den Temperaturunterschied Speicher/Aussentemperatur vermindert. Im Nenner erscheint u. a. der Quotient aus den Produkten k -Werte und Flächen.

Mit gegebenem Nenner fällt der Temperaturunterschied $\Delta T_{m/Sp}$ dann gross aus, wenn der Unterschied zwischen der Speicher- und der Aussentemperatur klein, die Globalstrahlung dagegen gross ist. Ein grosser Temperaturunterschied ist auch mit gegebenem Zähler möglich. Dazu muss die Kollektorfläche gegenüber der Wärmeaustauscherfläche sehr gross gewählt werden. Ist umgekehrt die Fläche des Wärmeaustauschers sehr gross, wird die Kreislauf-temperatur bei genügend

grossen Durchflussmengen fast gleich der Speichertemperatur (und entsprechend der mittleren Kollektortemperatur). In diesem Fall ist der Wirkungsgrad der Globalstrahlung zu der tatsächlich in den Speicher überführten Wärmeleistung am grössten, d. h. der Wirkungsgrad scheint offensichtlich auch eine Frage der Bemessung der Wärmeaustauscherfläche zu sein.

Betriebspunkt(e) einer Anlage

Bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Sonnenenergieanlage wird meist von der Speichergrösse, von der Quadratmeterzahl der Kollektoren, allenfalls von ihren Kenngrössen, aber fast nie vom Wärmeaustauscher im Speicher gesprochen. Genau gleich wie der Betriebspunkt einer Zentrifugalpumpe erst zusammen mit der Rohrleitungscharakteristik bestimmt werden kann, ist die Beurteilung der Wirksamkeit einer Anlage erst zusammen mit dem Wärmeaustauscher möglich. Sich allzustark über die Kennlinien von Kollektoren allein zu ereifern, hat wenig Sinn.

Der Vergleich mit dem Betriebspunkt eines Pumpensystems führt auch zu ähnlichen Lösungsmöglichkeiten. Ausgehend von den etwas modifizierten Gleichungen (1) und (2) kann ein Diagramm gezeichnet werden, in dem die Leistung des Kollektors je Quadratmeter und des Wärmeaustauschers in Abhängigkeit der verschiedenen Temperaturunterschiede aufgezeichnet ist (Bild 12).

Durch die zusätzlichen Wärmeverluste aus der Differenz Speichertemperatur/Aussentemperatur wird die Darstellung mit den verschiedenen Temperaturdifferenzen auf der Ordinate etwas unübersichtlich. Als Basis-temperatur ist jedoch die Speichertemperatur anzusehen; je nach Anstieg der mittleren Kreislauf-temperatur gegenüber der Speichertemperatur erhöht sich die an den Speicher abgegebene Wärmeleistung in Funktion der Wärmeaustauscherfläche.

Durch Aufbau der Kollektorkennlinien auf einer den Temperaturunterschied Speicher/Aussenklima berücksichtigenden Hilfsabszisse sind die sich ergebenden Betriebsbedingungen direkt ablesbar. Das gezeichnete Diagramm gilt für eine Temperaturdifferenz von 25 K zwischen Speicher und Aussenklima; bei anderer Temperaturdifferenz muss die Hilfsabszisse zusammen mit den Kollektorkennlinien vertikal verschoben werden,

was durch eine entsprechende *Transparentkopie* einfach realisierbar ist.

Beispiel

Aussetemperatur: 5 °C
Speichertemperatur: 30 °C
Globalstrahlung: 600 W

Mit 0,286 m² Tauscherfläche im Speicher je Quadratmeter Sonnenkollektor stellt sich eine mittlere Kreislaufumtemperatur (entsprechend etwa der mittleren Kollektortemperatur) von 30° (Speicher) + 12° (Übertemperatur) = 42 °C ein. Der *optische Verlust* des Kollektors ist $0,3 \cdot 600 = 180 \text{ W/m}^2$, der thermische 220 W/m^2 . Als *Nutzungsleistung* bleiben noch 200 W/m^2 , die sich bei Verwendung von lediglich $0,1 \text{ m}^2$ Tauscherfläche sogar auf 135 W/m^2 erniedrigt. Der Wirkungsgrad bei diesen durchaus nicht extremen Verhältnissen ist dabei 0,33 bzw. 0,225.

Die bei angenommener Speicher- und Aussetemperatur maximal mögliche Wärmeleistung ergibt sich bei Verwendung einer unendlich grossen Wärmeaustauscherfläche (und sehr grosser Durchflussmenge). Dies entspricht direkt dem *Schnittpunkt der Kollektorkennlinie* mit der Hauptabszisse; mittlere Kollektortemperatur, mittlere Kreislaufumtemperatur und die Speichertemperatur wären praktisch gleich hoch. Bezogen auf diese maximale Wärmeleistung von 270 W/m^2 ist der relative Wirkungsgrad bei $0,286 \text{ m}^2$ Tauscherfläche 0,74 bzw. bei $0,1 \text{ m}^2$ 0,5.

Genauigkeit und Weiterentwicklungen

Wie bereits mehrfach darauf hingewiesen, sind die Charakteristiken auf *Näherungen* aufgebaut. Immerhin ist die Genauigkeit im praxisnahen Bereich so gut, dass eine fälschlicherweise um 20 Prozent zu gross eingesetzte Wärmeaustauscherfläche beim Verifizieren bereits eine intensive Suche nach Rechenfehlern ausgelöst hat. Würde auf der Ordinate das logarithmische Mittel der Temperaturdifferenz und gemessene Charakteristiken von Kollektoren (k_0 und teilweise A sind je nach Randbedingung unterschiedlich!) und von Wärmeaustauschern (die Temperaturdifferenz beeinflusst die Wärmeübergangszahl sekundärseitig!) aufgetragen, wäre das Diagramm praktisch ohne Einschränkungen auch in der Nähe der Leerlaufumtemperatur von Kollektor und/oder Speicher richtig. Der Aufwand für die exakte Bestimmung der einzelnen Charakteristiken würde aber unverhältnismässig gross, zumindest was über die Bestimmung der Kollektorleerlaufumtemperatur bei bestimmter Globalstrahlung hinausgeht.

Wirkungsgrad und relativer Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Anlage als Verhältnis der Globalstrahlung zu der genutzten Wärmeleistung ist aus der Kombination von Gleichung (2) und (4) sowie um die Erweiterung mit der Globalstrahlung auch direkt berechenbar:

$$(5) \quad \eta \cong \frac{A - \frac{\Delta T_{Sp/a}}{G} \cdot k_0}{1 + \frac{F_0}{F_{WT}} \cdot \frac{k_0}{k_{WT}}}$$

Der maximale Wirkungsgrad η_{max} mit unendlich grosser Wärmeaustauscherfläche bei grossen Durchflussmengen ist dann

$$(6) \quad \eta_{max} \cong A - \frac{\Delta T_{Sp/a}}{G} \cdot k_0$$

Nur für den Fall einer unendlich grossen Wärmeaustauscherfläche (oder sehr grossem k_{WT} bzw. sehr kleinem k_0 oder F_0) sind also die Kollektorcharakteristiken A direkt und k_0 über die Globalstrahlung und die Differenz zwischen Speicher- und Aussetemperatur massgebend. Wird dagegen das Verhältnis der Produkte aus k -Werte und Flächen von Kollektoren und Wärmeaustauschern mit berücksichtigt, kann der relative Wirkungsgrad η_{rel} mit der Bezugsbasis η_{max} nur kleiner werden.

Es ist also

$$(7) \quad \eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_{max}} \cong \frac{1}{1 + \frac{F_0}{F_{WT}} \cdot \frac{k_0}{k_{WT}}}$$

Erst mit diesem Ansatz - er ist unabhängig von Globalstrahlung, Speicher- und Aussetemperaturen - ist «das Vorgehene vom maximal überhaupt Möglichen» berechenbar. Die Gleichung ist zeitlos; sie gilt für *jede Betriebsbedingung während der ganzen Lebensdauer* der Anlage (graphische Darstellung siehe Bild 13).

Grösserer Wärmeaustauscher - kleinere Kosten

Die Zusammenhänge können nur für die Berechnung des kostenoptimalen Flächenverhältnisses Wärmeaustauscher/Kollektor benutzt werden. Es ist

$$(8) \quad \frac{F_{WT}}{F_0} \text{ (opt.)} \cong \sqrt{\frac{\Delta K_0 \cdot k_0}{\Delta K_{WT} \cdot k_{WT}}}$$

ΔK_0 : Mehrkosten des Kollektors je m²

ΔK_{WT} : Mehrkosten des Wärmeaustauschers je m²

Im hier besprochenen Fall mit Kollektormehrkosten von Fr. 400.-/m² und Wärmeaustauschermehrkosten von Fr. 150.-/m² ($k_0 = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_{WT} = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$) wäre das Verhältnis mit dem besten Kosten-/Nutzen-Verhältnis

$$\frac{F_{WT}}{F_0} \text{ (opt.)} \cong \sqrt{\frac{400}{150} \cdot \frac{6}{60}} = 0,52$$

Der relative Wirkungsgrad wäre dann nach (7)

$$\eta_{rel} \cong \frac{1}{1 + 1,92 \cdot \frac{6}{60}} = 0,84$$

anstatt

$$\eta_{rel} \cong \frac{1}{1 + \frac{28}{8} \cdot \frac{6}{60}} = 0,74$$

d. h. anstelle von 28 m^2 Kollektor mit $\eta_{rel} = 0,74$ hätten theoretisch $28 \times 0,74 / 0,84 = 24,7 \text{ m}^2$ Kollektorfläche, zusammen mit $24,7 \times 0,52 = 12,8 \text{ m}^2$ Wärmeaustauscherfläche die gleiche Leistung bei Verwendung

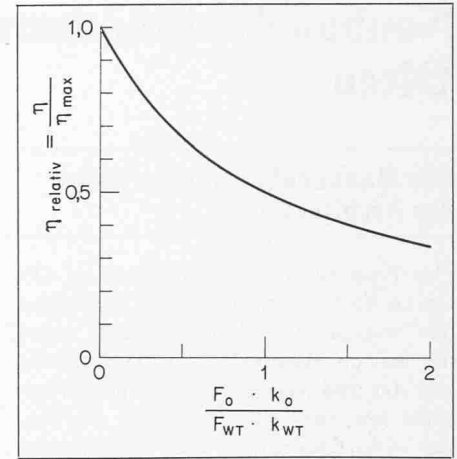


Bild 13. Relativer Wirkungsgrad einer Sonnenenergieanlage

ohne Erdregister erbracht. Die *optimale* Lösung wäre allerdings um Fr. 600.- ($3,3 \text{ m}^2$ Sonnenkollektor zu Fr. 400.-/m² minus $4,8 \text{ m}^2$ Wärmeaustauscherfläche zu Fr. 150.-/m²) *billiger* gewesen, d. h. etwa 4 Prozent der Kosten für Kollektor und Wärmeaustauscher.

Noch günstiger wäre die Verwendung eines Spiralrohrwärmeaustauschers (Glattrohrwärmeaustauscher) gekommen. Je Quadratmeter Austauschfläche ist das Spiralrohr zwar etwa doppelt so teuer, die Wärmedurchgangszahl aber etwa drei- bis viermal grösser als mit Rippenrohr (die Rippenrohrfläche wird wegen der Wärmeleitfähigkeit der Rippen mit zunehmendem Abstand vom flüssigkeitsführenden Rohr immer unwirksamer!). In zukünftigen Anlagen werden daher Spiralrohrwärmeaustauscher eingesetzt.

In der Praxis genügt meist eine *ungefähre Abschätzung* der Flächenverhältnisse, besteht doch die Kollektorfläche vorwiegend aus grossen, *unzerteilbaren Elementen*, und die Fläche des Wärmeaustauschers im Speicher kann aus *Platzgründen* oft auch nicht beliebig gross gewählt werden. Immerhin sollte aber aus diesen theoretischen und als Näherung zu bezeichnende Ausführungen ersichtlich sein, dass je Quadratmeter Rippenrohr-Wärmeaustauscherfläche höchstens $2\text{--}4 \text{ m}^2$ Sonnenkollektorfläche vorgesehen werden sollten, je Quadratmeter Glattrohrwärmeaustauscher etwa 5 m^2 . Die Sanierung einer Anlage mit 10 m^2 Kollektor und $0,5 \text{ m}^2$ Rippenrohrwärmeaustauscherfläche durch Verdoppelung der Kollektorfläche auf 20 m^2 ist somit verschwendetes Geld!

Adresse des Verfassers: R. Weiersmüller, Chemiker HTL, Industriest. 11, 8952 Schlieren.