

Dimensionierung von Brauchwassersolaranlagen für Freibäder

*Klaus Vajen, Frank Hilmer
Universität Marburg, FB Physik
D-35032 Marburg
Tel.: 06421/284131, Fax: 06421/286535*

Inhalt

In den Jahren 1993 und '94 wurden im Marburger Freibad u.a. der Warmwasserverbrauch und verschiedene meteorologische Parameter in Minutenaufösung gemessen. Mit dem so gewonnenen Verbrauchsprofil wurden TRNSYS-Simulationsrechnungen /TRN94/ durchgeführt, die Dimensionierungskriterien für solare Brauchwasseranlagen im Freibadbereich liefern.

Einführung

Absorberanlagen zur Beckenwassererwärmung haben inzwischen in öffentlichen Freibädern weite Verbreitung gefunden. Vielen Badegästen und kommunalen Entscheidungsträgern haben sie, oft zum ersten Mal, die Leistungsfähigkeit der Solartechnik nahebringen können. Die Wirtschaftlichkeit von Absorberanlagen gründet sich zum einen auf ihre vergleichsweise einfache Bauart, zum anderen auf die gute saisonale Übereinstimmung von solarem Strahlungs-

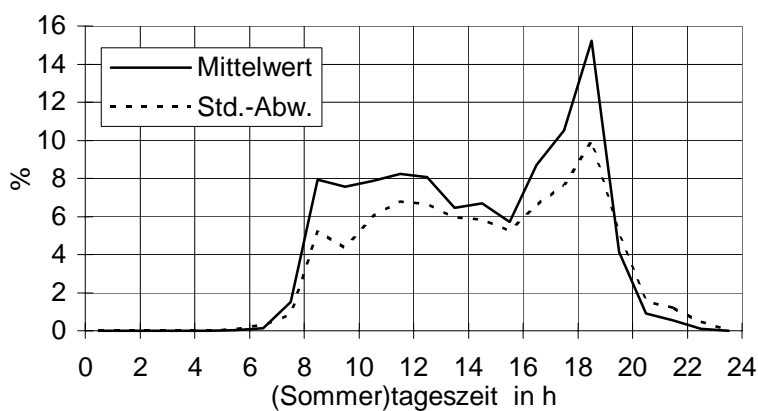


Abb. 1:

Prozentualer Anteil des stündlichen Verbrauchsvolumenstroms an der jeweiligen Tagessumme, gemittelt über den Zeitraum vom 19.5.94 - 1.9.94, sowie die Standardabweichung der Einzelwerte vom Mittel. Das Bad war von 8.00 - 19.30 geöffnet. Außerhalb dieser Zeiten wurde noch Wasser zur Aufrechterhaltung des Bäderbetriebs entnommen.

angebot und Wärmebedarf. Bei der Duschwasserbereitung besteht darüberhinaus eine starke tageszeitliche (vgl. Abb. 1) sowie eine schwache Tagessummen-Korrelation (vgl. Abb. 2) zwischen solarem Wärmeangebot und Nachfrage. Diese Umstände ermöglichen besonders günstige Anlagenkonfigurationen und lassen vermuten, daß solarthermische Duschwasserbereitung im Freibadbereich sehr bald auch betriebswirtschaftlich interessant wird.

Das mittlere tägliche Verbrauchsprofil (Abb. 1) zeigt einem ausgeprägten Spitzenbedarf am Spätnachmittag mit hohen Schwankungen von Tag zu Tag. Die Standardabweichung der Einzelwerte vom Mittelwert ist fast so groß wie der Mittelwert selbst.

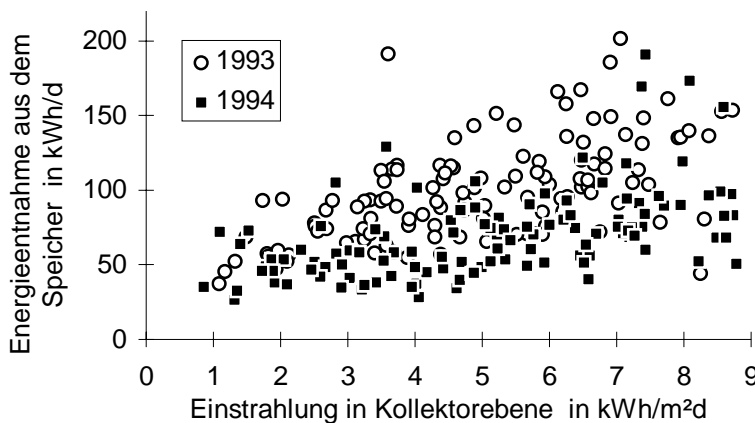


Abb. 2:
Tagessummen der gemessenen Energieentnahme aus dem Warmwasserspeicher (ohne Zirkulationsverluste) in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung in eine mögliche Kollektorebene (Süd, 20° Neigung)

Überraschenderweise ist der tägliche Warmwasserverbrauch im untersuchten Zeitraum nur schwach von der jeweiligen Besucherzahl abhängig, vgl. Abb. 3. Bei kälterem Wetter kommen naturgemäß nur sehr wenige Besucher, die dann aber offenbar zum größeren Teil warm duschen möchten.

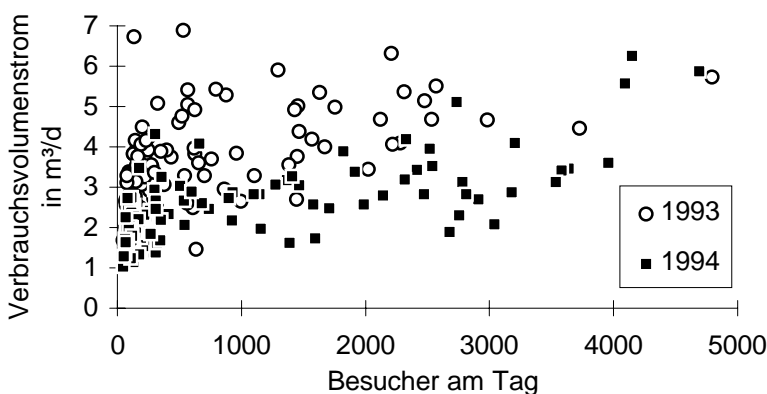


Abb. 3:
Tagessummen des gemessenen Verbrauchsvolumenstroms, umgerechnet auf 40 °C (vgl. Text), in Abhängigkeit von der Besucheranzahl.

Dimensionierungsrechnungen mit einem mittleren täglichen oder einem an der Badegastzahl orientierten Verbrauchsprofil würden daher zu Fehlanpassungen der Anlage an den tatsächli-

chen Bedarf führen. Nur die gleichzeitige Messung von zumindest solarer Einstrahlung und Warmwasserverbrauch vermag Hinweise auf optimale Anlagenkonfigurationen zu geben.

Messungen

1993 und '94 wurde im Marburger Sommerbad während der gesamten Betriebsperiode (Mitte Mai bis Mitte September) der Warmwasserverbrauch, die Kaltwassereintrittstemperatur sowie verschiedene meteorologische Parameter (u.a. globale und diffuse Strahlung, Umgebungstemperatur) in Minutenauflösung gemessen. Die Besucherzahlen liegen aus täglichen Zählungen vor. In ca. wöchentlichen Abständen wurden die Münzen aus den Duschautomaten eingesammelt und gezählt.

	Einheit	1993	1994	Mittelwert	Bemerkungen
Badegäste	1/Saison	76'200	120'900	98'550	langjähr. Durchschnitt: ca. 100.000
	1/d	620	960	790	
Öffnungsdauer	d	123	126		Summe: 249
davon ausgewertet	d	118	118		Summe: 236
Öffnungszeit	h	8.00 .. 19.30			Sommerzeit
Duschvorgänge	1/Saison	5'713	4'164	4'939	gesamte Saison
	1/d	46.4	33.0	39.7	langjähr. Durchschnitt: ca. 4600/a
Duschpreis	DM / 5min	0.50	1.00		

Tab. 1:

Einige wichtige Größen und Rahmenbedingungen. Das Freibad in Marburg verfügt über ein Schwimmer- (1050 m²) und ein Nichtschwimmerbecken (590 m²). Trotz wetterbedingt gesteigener Badegastzahlen wurde 1994 weniger geduscht, was im wesentlichen auf eine Preiserhöhung zurückgeführt werden kann.

Vorgehensweise

Aufgrund der Schwankungen der Speicherein- und austrittstemperaturen wurden die entnommenen Wärmeströme in Volumenströme mit einer Nutzttemperatur von 40 °C umgerechnet. Über den Ansatz

$$V_{\text{ges}} = V_{\text{bad}} + V_{\text{dusch}}$$

$$= b \Delta t_{\text{sammel}} + d M(\Delta t_{\text{sammel}})$$

V := verbrauchtes Warmwasservolumen (40°C) in l

b := Bäderbetriebsverbrauch während der Öffnungszeit in l/h

d := Duschwasserverbrauch in l/Duschbad

M := eingesammelte Duschkünzen

Δt_{sammel} := Zeitraum zwischen den Duschkünzen-Einsammellungen in h

konnten mit einer Kurvenanpassung Werte für $b = 50 \pm 25$ l/h und $d = 54 \pm 9$ l/Duschbad bestimmt werden. Die hohen Unsicherheiten rühren zum einen daher, daß nur 22 Werte ausge-

wertet werden konnten; zum anderen treten im Rahmen des Bäderbetriebs offenbar seltene, aber hohe Warmwasserentnahmen auf. Während der Öffnungszeit beträgt der Duschwasseranteil allerdings rund 85%, so daß mit dieser Methode Bäderbetriebs- und Duschwasserverbrauch getrennt wurden. Für eine Übertragung des gemessenen Verbrauchsprofils auf Bäder mit doppelten bzw. halben Jahresbesucherzahlen wurde angenommen, daß der zeitabhängige Duschwasserverbrauch proportional zur Jahressumme der Badegäste ist und der Bäderbetriebsverbrauch um 20% steigt bzw. sinkt.

Aus den Meßwerten der globalen und diffusen Einstrahlung wurden mit dem Hay-Davies-Modell /Hay80/ die Einstrahlungswerte auf eine um 20° nach Süden geneigte potentielle Kollektorfläche berechnet.

	Einheit	1993	1994	Mittelwert
Globalstrahlung	kWh/m ² Saison	593.3	602.3	597.8
	kWh/m ² d	5.03	5.10	5.07
Strahlung auf Südfläche, 20° Neigung	kWh/m ² Saison	618.7	628.9	623.8
	kWh/m ² d	5.24	5.33	5.29
durchschn. Lufttemperatur 8. ⁰⁰ -19. ⁰⁰ h	°C	18.6	19.7	19.2
Messung: 100'000 Badegäste/Saison				
verbrauchttes Warmwasser (40 °C)	m ³ /Saison	440.1	305.3	372.7
	m ³ /d	3.73	2.59	3.16
davon für Badbetrieb insgesamt ca.	%	18	28	23
Maximalwert Gesamtverbrauch	l/min	70	63	67
bei Mittelung über 10 min	l/min	55	42	48
Rechnung: 50'000 Badegäste /Saison				
verbrauchttes Warmwasser (40 °C)	m ³ /Saison	244	178	211
	m ³ /d	2.1	1.5	1.8
Maximalwert Gesamtverbrauch	l/min	38	35	37
bei Mittelung über 10 min	l/min	30	23	27
Rechnung: 200'000 Badegäste /Saison				
verbrauchttes Warmwasser (40 °C)	m ³ /Saison	820	539	679
	m ³ /d	6.9	4.6	5.8
Maximalwert Gesamtverbrauch	l/min	135	117	126
bei Mittelung über 10 min	l/min	100	77	88

Tab. 2:

Einige wichtige Größen zur solaren Einstrahlung und dem Warmwasserverbrauch. Alle Summen sind vom Auswertungszeitraum (118 Tagen pro Jahr) hochgerechnet auf eine Saison (15.5.-15.9., 124 Tage). Zu den Annahmen bei der Umrechnung der gemessenen Werte (100.000 Gäste/Saison) auf Bäder mit abweichenden jährlichen Besucherzahlen vgl. Text.

Simulationsrechnungen

Mit den gewonnenen Daten wurden TRNSYS-Simulationsrechnungen durchgeführt. Die für zwei Sommer ermittelten Zeitreihen von Verbrauch, Kaltwassertemperatur, Solareinstrahlung

Abb. 4:
 Schaltbild der simulierten Anlage. Der Kühler wurde nicht simuliert, sollte aber beim Bau einer Anlage ggf. vorgesehen werden. Bei den Rechnungen wurde eine Überhitzung des Speichers durch Abschalten der Speicherladepumpe bei Überschreitung einer Temperatur von 90 °C in der untersten Speicherschicht sichergestellt.

und Umgebungstemperatur wurden aneinandergehängt und das Systemverhalten einer thermischen Solaranlage in einem Durchlauf für die Summe beider Jahre ermittelt. Dies ermöglicht eine gute Mittelung sowohl über Schwankungen der meteorologische Bedingungen, vgl. Tab. 2, als auch des Verbrauchsverhaltens, vgl. Tab.1. Untersucht wurde ein Solarsystem bestehend aus einem einfachverglasten Flachkollektor und einem Speicher. Die solare Wärmeübertragung erfolgte durch einen externen Wärmetauscher, die fossile Nachheizung wurde intern im oberen Speicherdrittel simuliert (vgl. Abb. 4). Die ‘Legionellenrichtlinie’ /DVGW93/ wurde bei den Rechnungen berücksichtigt.

Untersuchungsparameter waren insbesondere die Kollektor- und Speichergröße. Die Ausrichtung des Kollektors spielt bei reinen Sommeranwendungen nur eine untergeordnete Rolle und wurde mit 20° Neigung nach Süden für alle Rechnungen gleich gewählt.

		Einheit	
Kollektor	η_0	-	0.751
(Trnsys Type 1)	k1	W/m ² K	3.361
	k2	W/m ² K ²	0.0213
	Neigung	°	20
	Ausrichtung		Süd
	Durchfluß	kg/m ² h	40
	Rohrleitung, einf. Weg	m	40
Speicher	Wärmedämmung oben	cm	15
(Trnsys Type 74)	Seite	cm	10
	unten	cm	5
	λ (Dämmmaterial)	W/mK	0.04
Verteilsystem:	Zirkulation, einf. Weg	m	40
	Zirkulationszeit	h	6. ⁰⁰ ..22. ⁰⁰
	Aufheizung auf 60°C	h	22. ⁰⁰ ..23. ⁰⁰

Tab. 3:
 Einige Simulationsparameter. Die Kollektorumwälzpumpe wurde einstrahlungsabhängig geschaltet (ein: 200, aus: 150 W/m²), die Speicherladepumpe nach der Temperaturdifferenz zwischen dem Kollektorkreis und dem unteren Speicherviertel (ein: 6 , aus: 1.5 K).

Ergebnisse

Die Abb. 5 bis 7 zeigen als Ergebnisse der Simulationsrechnungen für verschiedene Nutzungsanforderungen den fossilen Nutzenergiebedarf als Funktion der Speichergröße. Die solare Deckungsrate f_{sol} ,

$$f_{\text{sol}} := Q_{\text{sol}} / (Q_{\text{sol}} + Q_{\text{hgz}})$$

Q_{sol} := Nutzenergiezufuhr in den Speicher durch die Solaranlage

Q_{hgz} := Nutzenergiezufuhr in den Speicher durch die fossile Nachheizung

ist hier nicht der beste Indikator für ein optimal dimensioniertes Solarsystem. Ihr Maximum liegt, im Vergleich zum Kriterium 'fossiler Nutzenergiebedarf', bei etwas größeren Speichern. Aufgrund der damit verbundenen höheren Speicherverluste ist in diesen Fällen aber auch eine (geringfügig) größere Nachheizenergie erforderlich. Dennoch sind in Abb. 8 die berechneten solaren Deckungsraten angegeben.

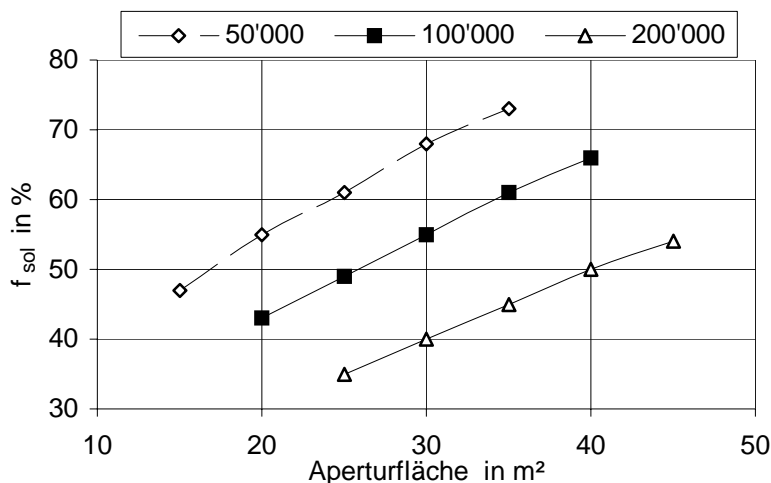


Abb. 8

Mittlere solare Deckungsraten in % in Abhängigkeit von der Kollektorgroße für verschiedene Nutzungsanforderungen (Besucher/Saison). Die Deckungsraten sind, ähnlich wie der fossile Nachheizbedarf, nur schwach von der Speichergröße abhängig.

Für die Speicherdimensionierung sind im wesentlichen die Tagessumme und das Profil des Warmwasserbedarfs ausschlaggebend. Solarspeicher in Einfamilienhäusern werden typischerweise in einer Größe von 1.5 bis 2 Warmwasser-Tagesverbräuchen installiert. In größeren Solarsystemen in Wohnanlagen sollten sie eine Kapazität von knapp einem Warmwasser-Tagesbedarf aufweisen /Gat94/. Wegen der täglichen Aufheizung auf 60°C (Legionellenrichtlinie) haben größere Speicher selbst bei hohen angestrebten solaren Deckungsraten nur einen begrenzten Nutzen. Zu kleine Speicher wiederum sind nicht in der Lage, die während der verbrauchsarmen Sonnenscheinzeit gesammelte Wärme für die Verbrauchsspitzen abends und morgens zu bevorraten.

Bei der solaren Duschwassererwärmung in Freibädern bestehen jedoch aufgrund des speziellen Verbrauchsprofils günstigere Randbedingungen. Der frühmorgendliche Verbrauch wird aus der nächtlichen Desinfektionsaufheizung gedeckt, der untere Speicherbereich ist noch vor Beginn der Hauptsonnenscheinzeit abgekühlt. Der Speicher muß tagsüber nur Wärme im Umfang der nachmittäglichen Nachfragespitze ansammeln, das Solarsystem kann während der sonnenreichen Tageszeit de facto als Durchlauferhitzer arbeiten. Aufgrund des großen Wärmebedarfs sind zwar beachtliche Kollektorflächen und hohe Deckungsraten möglich, der Speicher kann im Vergleich dazu aber außergewöhnlich klein gehalten werden. Sein Volumen kann auf ca. 1/3 bis 1/4 (!) des Tagesverbrauchs (40 °C) begrenzt bleiben. Bei solaren Deckungsraten um 50 % ist dies sogar die günstigste Konfiguration.

Bei einer Anlagenkonfiguration mit sehr kleinem Speicher können Betriebszustände auftreten, die kurzzeitig eine Kühlung des Kollektorkreises erfordern. Technisch könnte dies über ein thermostatisch gesteuertes 3-Wege-Ventil im Kollektorkreis erfolgen, woran eine ausreichend dimensionierte unisolierte Rohrleitung und/oder ein LKW-Kühler mit Ventilator angeschlossen würde, vgl. Abb. 4. Eine andere Möglichkeit wäre eine in der Heizungstechnik gebräuchliche thermische Ablaufsicherung in der Warmwasserentnahmeleitung zwischen Speicher und Brauchwassermischer. Das so entnommene Trinkwasser kann dann gegebenenfalls sogar zur Schwimmbeckenerwärmung genutzt werden. Ein solches Kühlsystems wird in den meisten Fällen deutlich kostengünstiger sein als rund 1000 Liter zusätzliches Speichervolumen.

Systemtechnische Vorteile bieten kleine Speicher darüberhinaus außerhalb der Badesaison, wo der Warmwasserbedarf deutlich sinkt, die tägliche Desinfektionsaufheizung aber weiter erfolgen müßte.

Besucher/Saison	th. Nachheizleistung in kW	bei $A_{\text{kollektor}}$ in m^2	und V_{speicher} in l
50'000	23	15	400
	8	35	1200
100'000	57	20	400
	33	35	1200
200'000	80	40	2500

Tab. 4:

Erforderliche thermische Nettoleistung eines externen Durchlauferhitzers für die angegebenen Anlagenkonfigurationen. Zugrundegelegt sind 10-min Mittelwerte. Die benötigte Leistung sinkt mit der installierten Kollektorfläche und der Speichergröße. Wegen der hohen Leistungen scheint beim Verbrauchsprofil 200.000 Besucher/Saison eine externe Nachheizung nur bei großen Systemkomponenten (Kollektor, Speicher) sinnvoll.

Als besonders günstige Lösung bietet sich die externe fossile Nachheizung mit einem temperaturgesteuerten Gasdurchlauferhitzer an. Das Speichervolumen kann so nochmals auf ca. 1/4 bis 1/5 des Tagesbedarfes (40 °C) verkleinert werden, außerhalb der Saison würde der Solarpeicher stillgelegt. Die erforderlichen Nachheizleistungen wurden aus den Simulationsergebnissen ermittelt und sind in Tab. 4 zusammengefaßt.

Der notwendige Pumpenstrom steigt zu kleineren Speichern hin geringfügig, da die Speicherladepumpe morgens und zu Beginn der nachmittäglichen Nachfragespitze etwas eher anläuft. Bei hohen Deckungsraten kann der Pumpenstrom bis zu 7 % der fossilen thermischen Nutzenergiezufuhr ausmachen, bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Primärenergie-Umwandlungswirkungsgrade wird der Anteil sogar noch entsprechend größer. Dennoch erreichen alle vorgestellten Solarsysteme Arbeitszahlen, also solarer Nutzenergieertrag geteilt durch den elektrischen Endenergieeinsatz, zwischen 40 ($f_{\text{sol}} \approx 70\%$) und 60 ($f_{\text{sol}} \approx 40\%$).

Übertragbarkeit der Ergebnisse

Wie das Marburger, so gehören die meisten Freibäder in Deutschland zu den sogenannten 'Schönwetterbädern'. Ebenfalls wird überwiegend eine geringe Schutzgebühr für eine warme Dusche erhoben, so daß sich die Verbrauchscharakteristik in vielen Bädern nicht wesentlich von der in Marburg unterscheiden dürfte. Eine weitgehende Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse scheint daher möglich. Mit Hilfe der in der Regel verfügbaren Jahressummen der Besucheranzahl, der verkauften Duschmarken und der Globalstrahlung kann somit die Dimensionierung einer thermischen Solaranlage zur Duschwasserbereitung in den meisten Fällen erfolgen.

Zusammenfassung

Die Duschwassererwärmung in Freibädern ist aufgrund des speziellen Verbrauchsprofils nahezu ideal für den Einsatz von Solarkollektoren geeignet. Es lassen sich hohe solare Deckungsraten erzielen.

Eine Übertragung von Dimensionierungsrichtlinien für Solarsysteme zur Brauchwassererwärmung in Mehrfamilienhäusern auf den Freibadbereich ist nicht sinnvoll. Dort können und sollten für die Duschwassererwärmung besonders kleine Speicher in der Größe von rund einem viertel des täglichen Durchschnittsverbrauchs (40 °C) verwendet werden. Besondere systemtechnische Vorteile bietet eine fossile Nachheizung mittels eines temperaturgesteuerten Durchlauferhitzers.

Literatur

- /DVGW93/ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
Trinkwassererwärmungs- und Leitungsanlagen; Technische
Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums
Arbeitsblatt W 551, Eschborn 1993
- /Gat94/ Gatzka, Bernhard
Auswirkungen der 'Legionellenverordnung' auf den Ertrag und die
Auslegung thermischer Solaranlagen
Viertes Symposium Thermische Solarenergie
Tagungsbericht S.277, Staffelstein 1994
- /Hay80/ Hay, J.E., Davies, J.A.
Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface
Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop, S. 59 (1980)
- /TRN94/ Klein, S.A. et al
TRNSYS - A Transient System Simulation Program
Version 14.1, Madison 1994

Danksagungen

Besonderer Dank gilt dem Bäderamt der Stadt Marburg und dem Betriebspersonal des Marburger Freibades für ihre vielfältige Unterstützung, R. Kübler und H. Drück vom ITW Stuttgart für die Überlassung des Speichermodells Type74, A. Knirsch und T. Auer von der Fa. Transsolar für ihre geduldige Faxkorrespondenz sowie R. Orths von der Fa. Wagner Solartechnik für viele anregende Diskussionen und Hinweise.

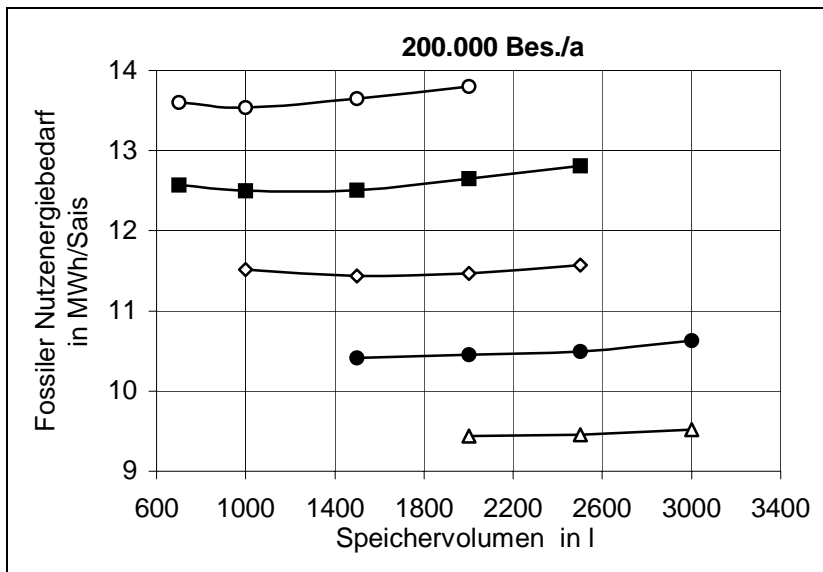
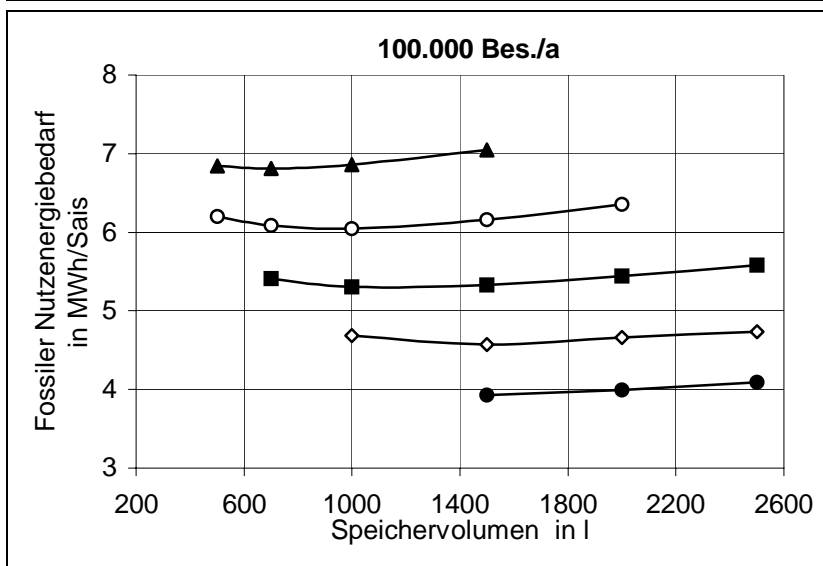
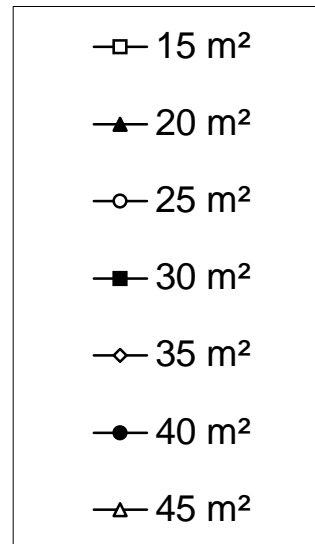
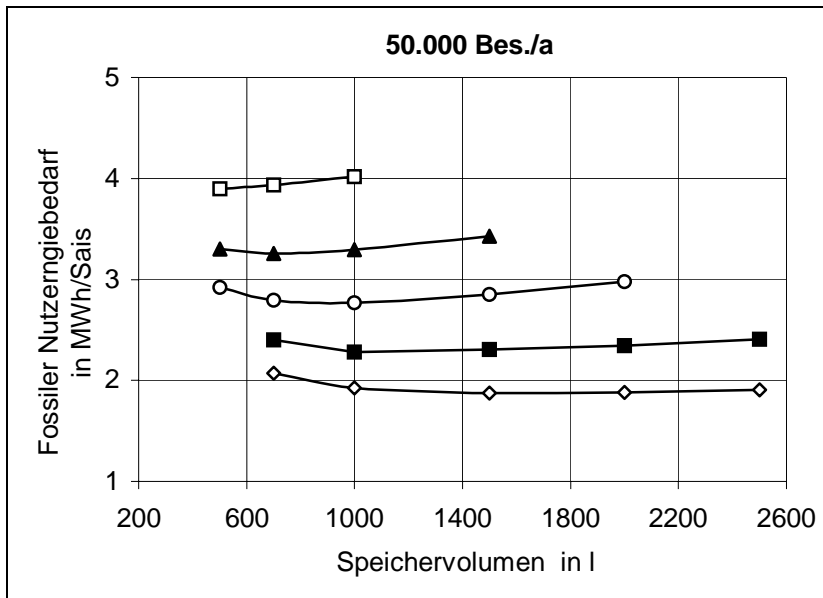


Abb. 5 bis 7:
 Benötigte fossile Nachheizwärme in Abhängigkeit vom Speichervolumen für verschiedene Verbrauchsprofile und Kollektoraperturflächen. Der fossile Nutzenergiebedarf ist für größere Speicher wie erwartet im wesentlichen unabhängig von der Speicherdimensionierung. Erstaunlicherweise gilt dies aber auch im Bereich kleiner Volumina. Bei Deckungsraten um 50% stellen im Verhältnis zur Kollektorfläche sehr kleine Speicher sogar die energetisch günstigste Lösung dar. Bei Konfigurationen 'links unterhalb' der zusätzlich eingezeichneten Linien ist in jedem Fall ein Kühlsystem für den Kollektorkreis vorzusehen. Ohne Solaranlage sind 7.5, 12.1 bzw. 20.9 MWh/Saison an fossilem Nutzenergiebedarf erforderlich.

