

## 3.2. Solaranlagen zur Gebäudeheizung

### 3.2.1. Varianten

Der Einsatz der Solarenergie zu Heizzwecken stößt in Deutschland auf große Schwierigkeiten, da die Einstrahlungen nur im Sommer hoch sind, der überwiegende Bedarf jedoch im Winter liegt. Eine solare Heizungsanlage muß daher neben dem Kollektorfeld auch einen größeren Speicher aufweisen. Die in den Sonnenkollektoren gewonnene Energie wird direkt zu Heizung und Warmwasserbereitung genutzt oder bei Divergenzen von Angebot und Verbrauch in einen Speicher eingeladen oder aus diesem entnommen.

Je nachdem, mit welcher Intensität die Nutzung stattfinden soll, kann zwischen zwei Alternativen gewählt werden. Die erste Variante beinhaltet die Auslegung des Speichers für kurze Speicherzyklen. Hierbei wird die Sonnenwärme in den Mittagsstunden gespeichert und abends oder an nachfolgenden Tagen genutzt. Eine gute Effizienz liegt nur an klaren kalten Tagen vor, die entsprechend Bild 5 relativ selten sind. Unter den Bedingungen kontinentalen Klimas ist die Häufigkeit größer, so daß sich zum Beispiel in den USA bessere Einsatzmöglichkeiten ergeben.

Die solaren Deckungsraten überschreiten in Deutschland 35 % im allgemeinen nicht. Bei den sich einstellenden geringen Kollektorerträgen ist die Wirtschaftlichkeit zumeist sehr schlecht. Es gibt dennoch einen interessanten Einsatzbereich, nämlich die Kopplung mit minderkomfortablen Heizungssystemen, vorrangig der Holzheizung. Die Anzahl der Betriebstage wird im Jahresverlauf wesentlich verringert, was zu einer spürbaren Arbeitsentlastung führt. Dennoch bleibt hier als Problem, daß die Sonnenkollektoren im Sommer nicht ausgelastet werden können. Bei größeren Verbrauchern bietet sich hier die Installation einer solaren Klimatisierung gemäß Kapitel 3.3 an.

Ein anderes Konzept ist die saisonale Speicherung gemäß Bild 66. Der Speicher wird so groß ausgelegt, daß die Sonnenenergie im Sommer eingespeichert und im Winter genutzt werden kann. Hierbei werden Deckungsraten von 50 bis 80 % angestrebt. Kollektorfeld und Speicher müssen sehr groß dimensioniert werden, was zu hohen Kosten führt.

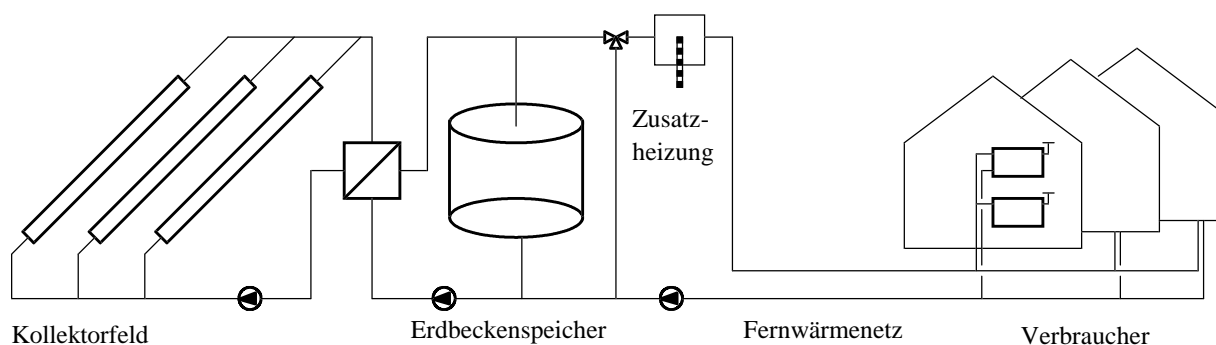


Bild 66: Solare Heizung mit saisonaler Speicherung

Beide Varianten können als zentrale wie auch als dezentrale Systeme ausgeführt werden. Für zentrale Anlagen spricht immer, daß die spezifischen Speicherkosten, ebenso wie die Wärmeverluste, mit der Größe absinken. Dagegen spricht der Kostenaufwand des Verteilungsnetzes und dessen Verluste. Bei zentralen Anlagen wird zweckmäßigerweise dem zentralen Speicher ein zentrales Kollektorfeld vorgeschaltet.

In Deutschland ist dies aufgrund begrenzter Flächen und hoher Grundstückspreise im Gegensatz zu Schweden zumeist nicht möglich. Die Kollektoren müssen dann dezentral auf den Gebäudedächern installiert werden. Sie werden spezifisch nur wenig teurer, während jedoch der Verteilungsaufwand enorm wächst. Im Extremfall wird ein Sechs-Leiter-Fernwärmenetz installiert.

Gegenstand der Untersuchungen in dieser Arbeit sind vorrangig zentrale Anlagen mit saisonaler Speicherung.

### **3.2.2. Kollektorarten**

Sonnenkollektoren bestehen allgemein aus zwei Bauteilen, dem Absorber, welcher die Sonnenstrahlung absorbiert und die Energie an ein Trägermedium übergibt, und einem Gehäuse, das die Wärmeverluste begrenzt. Das Gehäuse muß an mindestens einer Seite für Sonnenstrahlung transparent sein. Für Sonderanwendungen, wie für die Schwimmbad-Wassererwärmung, kann auf das Gehäuse verzichtet werden.

Spezielle Konstruktionen wie konzentrierende und nachgeführte Kollektoren oder Fluoreszenzabsorber haben sich unter deutschen Bedingungen für Zwecke von Heizung und Warmwasserbereitung als nicht sinnvoll erwiesen und werden hier nicht weiter behandelt.

Sonnenkollektoren sind gegenwärtig Stand der Technik, erfüllen aber keineswegs alle Wünsche. Ihre durchschnittlichen Wirkungsgrade liegen im Bereich um 25 bis 40 %, erscheinen also verbesserungsbedürftig. Sie sollen zwei Forderungen genügen, die sich zum Teil widersprechen. Zum einen muß möglichst viel Strahlung absorbiert werden. Dies wird durch einseitig, entspiegelte Glasoberflächen und durch hochabsorptive Beschichtungen erreicht.

Andererseits sollen die Energieverluste aus Wärmeabstrahlung, Konvektion und Leitung möglichst begrenzt werden. Bis etwa 1980 waren alle Absorber mit einer schwarzen Farbe beschichtet, die einen hohen Emissionskoeffizienten für Wärmestrahlung aufweisen. Die Strahlung wurde erst an der Abdeckscheibe wieder absorbiert, allerdings nur zum Teil wieder zurückgestrahlt. Um die Umgebungsverluste zu verringern, wurden deshalb auch Doppelverglasungen eingesetzt, die jedoch zu hohen Verlusten an Solarstrahlung führten.

Heute sind fast alle Absorber mit einer selektiven Beschichtung versehen, die einen hohen Absorptionskoeffizienten für Solarstrahlung und einen niedrigen Emissionskoeffizienten für Wärmestrahlung aufweist. Die wichtigsten Stoffe sind in Tabelle 1 aufgeführt. Dort ist auch zu erkennen, daß die gewünschte Verringerung der Emission mit einer Verringerung der Absorption erkauft werden muß. Welche Beschichtung jeweils am sinnvollsten ist, ist von den geplanten Betriebsparametern des Kollektors abhängig.

Der Einsatz dieser Schichten wird dadurch möglich, daß sich das Spektrum von Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung im relevanten Temperaturbereich extrem unterscheidet. 97 % der Energie der Sonnenstrahlung liegen im Wellenlängenbereich kleiner  $3 \mu\text{m}$ , während selbst bei einer ungewöhnlich hohen Absorbentemperatur von  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  über 99 % der Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich größer  $3 \mu\text{m}$  eingeordnet sind. Dieser Sachverhalt wird durch Bild 67 illustriert.

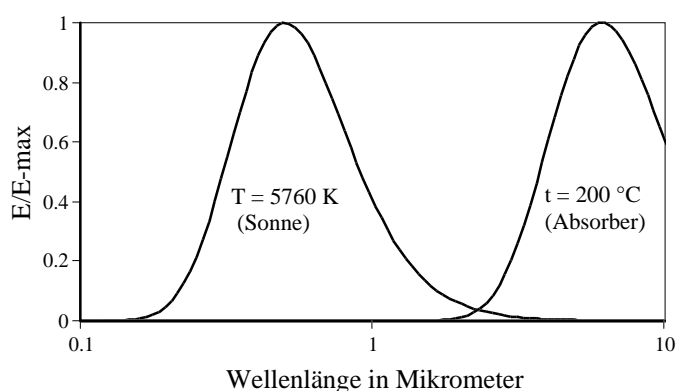


Bild 67: Normiertes Spektrum eines schwarzen Strahlers

Tabelle 1: Eigenschaften selektiver Schichten nach Lazarov /12/

Material	Absorptionsgrad Solarstrahlung	Emissionsgrad Wärmestrahlung
Schwarzchrom	0,90 ... 0,95	0,07 ... 0,10
Schwarznickel	0,90 ... 0,95	0,07 ... 0,10
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ni)	0,90 ... 0,92	0,07 .. 0,15
Edelstahl selektiv	0,80 ... 0,90	0,12 ... 0,17
amorpher Kohlenstoff	0,70 ... 0,90	0,02 ... 0,04
$\text{TiO}_x\text{N}_y$	0,75 ... 0,90	0,04 ... 0,07

Während die Reduktion der Strahlungsverluste durch selektive Beschichtungen - vorrangig Schwarzchrom - heute Stand der Technik ist, bereitet die Verringerung der Verluste durch Konvektion und Leitung mehr Schwierigkeiten. Die Leitung durch seitliche und rückwärtige Gehäuseteile wird durch Einbringen von Dämmmaterialien verringert. Dies ist bei der transparenten Abdeckung nicht möglich. Der Einsatz von Isolierverglasung scheitert an hohen optischen Verlusten und Wärmespannungen.

Eine Anwendung des gleichen Prinzips stellt das bei manchen Herstellern übliche Anbringen transparenter Wärmedämmung (TWD) oder von Folien jeweils im Bereich zwischen Absorber und Abdeckscheibe dar. Diese Konstruktionen verringern die auf den Absorber eindringende Strahlung, aber auch die Wärmeverluste, wobei beide Effekte bei der TWD ausgeprägter sind.

Eine nicht mit optischen Nachteilen verbundene Möglichkeit ist die Verringerung von Konvektion und Leitung im Spalt zwischen Absorber und Abdeckscheibe mittels Druckverringerung und/oder Einbringung von Inertgasen. In /76/ sind hierzu umfassende Meßergebnisse aufgeführt, die in Bild 68 dokumentiert sind.

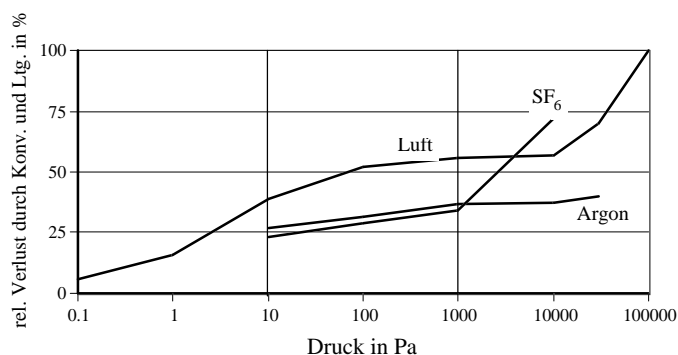


Bild 68: Druckabhängigkeit der Wärmeverluste

Bis zu einem Druck von  $10^4$  Pa geht die Konvektion in Luft linear zurück und ist unterhalb dieses Drucks vollständig unterdrückt. Zwischen 100 und  $10^4$  Pa sind die thermischen Verluste weitestgehend konstant. Ab 100 Pa setzt auch die Reduktion der Wärmeleitung ein. Bei 0,1 Pa ist die Wärmeleitung auf weniger als 10 % des Ursprungswertes reduziert. Das Verhalten von Argon ist ähnlich, nur mit niedrigeren Werten. Schwefelhexafluorid weist kein ausgeprägtes Plateau auf. Bis zu einem Druck von 1000 Pa ist es günstiger als Argon. Ab einem Druck von 5000 Pa sind die Verluste sogar größer als in Luft.

Im Einsatz befindlich sind gegenwärtig vorwiegend drei Typen von Kollektoren. Es handelt sich hierbei um Flachkollektoren, Vakuumflachkollektoren und Vakuumröhren. Die in Bild 69 dargestellten Flachkollektoren arbeiten bei Umgebungsdruck und müssen deshalb in Austausch mit der Außenluft stehen, was Risiken durch Verschmutzung, Kondensation und Korrosion birgt.

Vakuumflachkollektoren sind ähnlich Bild 69 aufgebaut, haben jedoch zusätzliche Abstützungen der Abdeckscheibe, um die mechanischen Belastungen abzufangen. Sie arbeiten im Druckbereich um  $10^4$  Pa, sollten also eher als Niederdruckkollektoren bezeichnet werden.

Gemäß Bild 68 gibt es bei ihnen noch einen beträchtlicher Wärmeverlust durch Leitung der Restluft. Um eine weitere Verbesserung zu erreichen, müßte der Druck deutlich unter 100 Pa gesenkt werden. Die dafür erforderliche Gehäusedichtheit konnte bisher nicht erreicht werden. Alternativ werden die Kollektoren mit einem Schwergas befüllt.

Vakuumröhren gemäß Bild 70 arbeiten im Druckbereich um 0,01 Pa, womit bei ihnen die Wärmeverluste durch Leitung fast vollständig unterdrückt sind. Möglich wird dies durch die spezielle Bauform, die zudem auch keine Verluste durch die Gehäuserückseite aufweist.

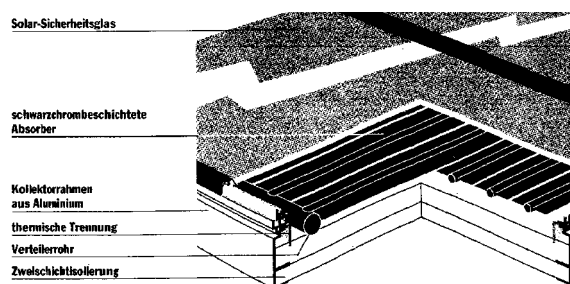


Bild 69: Schema eines Flachkollektors /77/

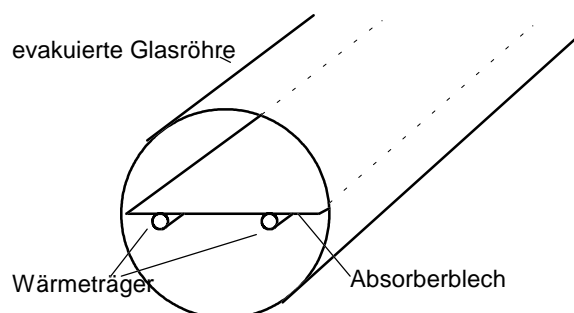


Bild 70: Schema eines Vakuumröhrenkollekt

Das Verhalten von Kollektoren läßt sich als sogenanntes "k-Modell" /76/ gemäß folgender Formel beschreiben:

$$Q_k = I \cdot \eta_{\text{opt}} - k \cdot (t_{k,m} - t_a)$$

$Q_k$	Kollektorwärmestrom	$\eta_{\text{opt}}$	optischer Wirkungsgrad
$k$	Wärmeverlustkoeffizient	$t_{k,m}$	mittlere Kollektortemperatur
$t_a$	Außentemperatur	$I$	Einstrahlung

In Tabelle 19 sind grob die Eigenschaften guter Kollektoren der entsprechenden Klassen und die Bezugskosten bei einer Bezugsmenge über 1000 m<sup>2</sup> festgehalten. Zusätzlich wurde noch die Stillstandstemperatur aufgetragen, die sich bei einer Einstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup>, fehlender Wärmeabnahme und einer Umgebungstemperatur von 30 °C einstellt.

Tabelle 19: Eigenschaften der Kollektortypen

		$\eta_{opt}$	k	$t_{still}$	Preis
		%	W/m <sup>2</sup> K	°C	DM/m <sup>2</sup>
Flachkollektor	nichtselektiv	80 ... 90	4,5 ... 6	120 ... 160	300 ... 500
	normal	75 ... 85	3,5 ... 4,5	150 ... 200	400 .. 600
	mit Folie	70 ... 80	3 ... 4	180 ... 220	500 ... 700
	mit TWD	50 ... 75	2 ... 3	180... 220	600 ... 800
Vakuumflachkollektor		75 ... 85	2,5 ... 3,5	200 ... 250	700 ... 1000
Vakuumröhre		70 ... 80	1 ... 2	250 ... 350	800 ... 1300

Der optische Wirkungsgrad ist ein Produkt aus Transmissionskoeffizient der Abdeckscheibe, Absorptionskoeffizient des Absorbers und einer die Güte des Wärmeübergangs im Absorber beschreibenden Größe. Der optische Wirkungsgrad für die direkte Strahlung ist vom Einstrahlungswinkel gemäß folgender Formel abhängig:

$$\eta_{opt} = \eta_{opt,0} \left(1 - b \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1\right)\right) \quad \theta : \text{Einstrahlungswinkel} \quad b : \text{Einstrahlungswinkelkoeffizient}$$

Der b- Koeffizient liegt gemeinhin bei 0,1 mit Schwankungen von 0 bis 0,2. Sein Einfluß auf den Tagesverlauf ist relativ groß, bei Ganzjahresberechnungen kann jedoch gut mit einem konstanten Wert gerechnet werden.

Der Wärmeverlustkoeffizient k ist ebenfalls keine Konstante, sondern eine Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Kollektormitteltemperatur und Außentemperatur gemäß folgender Formel:

$$k = k_0 + k_1(t_{k,m} - t_a)$$

$k_0$  linearer Verlustterm  
 $k_1$  parabolischer Verlustterm

Für sehr genaue Untersuchungen werden beide Terme auch noch gemäß folgender Formel als Funktion der Windgeschwindigkeit angesehen:

$$k_i = c_{i0} + c_{i1} * c_{wind} \quad c_{ij} \quad \text{Windterme}$$

$c_{wind}$

Windgeschwindigkeit

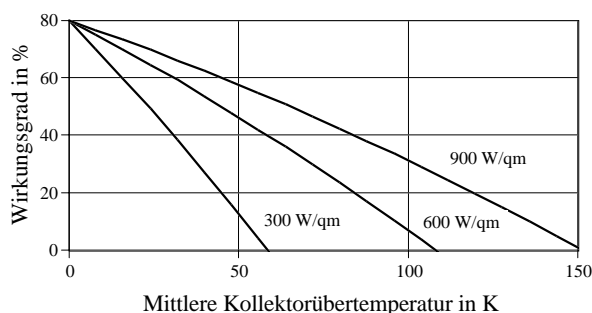


Bild 71: Kollektorkennlinienfeld SOLVIS F60

In Bild 71 ist das Kennlinienfeld eines in Oederan eingesetzten Flachkollektors SOLVIS F60 dargestellt. Mit steigender Übertemperatur und sinkender Einstrahlung nimmt der Wirkungsgrad ab. Bei einer bestimmten Temperatur erreicht er den Wert Null. Im üblichen Arbeitsbereich beträgt der Wirkungsgrad 30 bis 60 %.

### 3.2.3. Wärmespeicherung

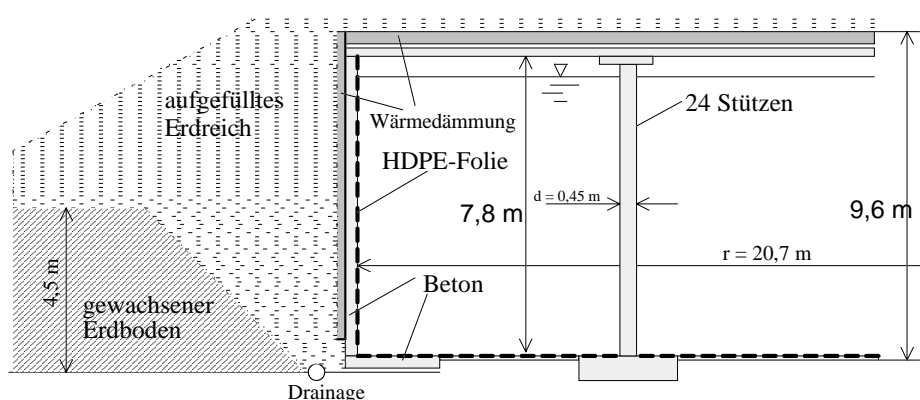
Für den Bau der benötigten großen Wärmespeicher werden gegenwärtig vier Konzepte verfolgt. Dies sind Stahlspeicher, Erdbeckenspeicher, Felskavernen und Aquifere.

Stahlspeicher werden bis zu einem Volumen von 2000 m<sup>3</sup> ausgeführt, bereiten keine Durchfeuchtungsprobleme und sind relativ teuer.

Felskavernen werden in Schweden favorisiert. Dies ist wesentlich durch die geologische Situation bedingt. Es ist relativ einfach und kostengünstig, große Kavernen in den Fels zu sprengen. Probleme bereitet die Abdichtung. In einem Fall wurden deshalb trotzdem Stahltanks in Spiro-Falztechnik in der Kaverne errichtet /20/.

Aquifere sind Bereiche in der Erde, die aufgrund des Zusammentreffens unterschiedlich durchlässiger Mineralien nicht der Durchströmung durch das Grundwasser unterliegen. Sie können auch mittels Schlitzwänden künstlich errichtet werden. Sie sind nicht dämmbar und scheitern voraussichtlich an Akzeptanzproblemen in Hinblick auf den Grundwasserschutz.

Bild 72: Schema eines Erdbeckenspeichers nach /21/



Erdbeckenspeicher gemäß Bild 72 werden in Deutschland für Großprojekte favorisiert. Die Hauptprobleme sieht man gegenwärtig in der Durchfeuchtung der Wärmedämmung. Unter den preiswerten Kunststofffolien erwies sich lediglich HDPE bis 70 °C als hinreichend diffusionsdicht, verliert jedoch nach etwa 5 bis 8 Jahren /21/ diese Eigenschaft. Metallfolien sind zwar dicht, jedoch teurer und bereiten aufgrund der notwendigen Dehnungsfugen konstruktive Probleme.

In Bild 73 sind die Kosten eines halb eingegrabenen Erdbeckenspeichers aufgetragen. Im für die solare Nahwärme bedeutsamen Bereich über 1000 m<sup>3</sup> Volumen kosten sie spezifisch 200 bis 100 DM/m<sup>3</sup> /21/. Kleinere Speicher unter 50 m<sup>3</sup> Größe, wie sie in Anlagen von Einfamilienhäusern üblich sind, kosten über 1000 DM/m<sup>3</sup>.

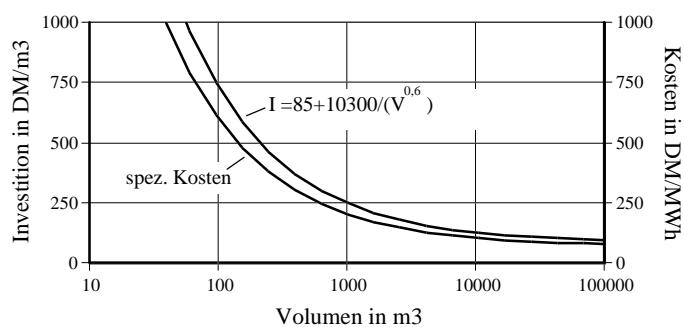


Bild 73: Speicherkosten

Im gleichen Bild sind die Kosten der aus dem Speicher entnommenen Wärme ablesbar. Es wird eine Temperaturspreizung von 50 K, eine Annuität von  $0,07 \text{ a}^{-1}$  und 1,5 Speicherzyklen pro Jahr vorausgesetzt. Die Kosten unterschreiten erst bei  $2000 \text{ m}^3$  Volumen einen Wert von 200 DM/MWh und bei Anlagen von  $100000 \text{ m}^3$  einen Wert von 110 DM/MWh. Dezentrale Anlagen erreichen Kosten bis über 1000 DM/MWh, sind also ziemlich bedenklich.

Ungünstig stellen sich bei kleinen Speichern zudem die Speicherverluste dar. Je kleiner ein Speicher ist, desto größer ist die volumenbezogene wärmeverlierende Oberfläche. In Bild 74 ist die Relation von jährlichem Verlust und Speicherinhalt dargestellt. Die durchschnittliche Temperaturdifferenz beträgt 55 K und die Isolierung besteht aus 1 m Mineralwolle.

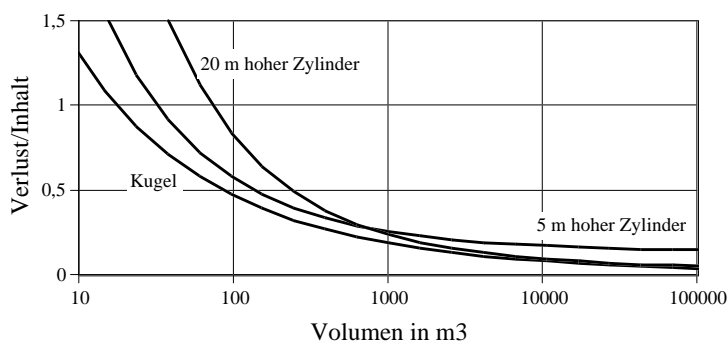


Bild 74: Speicherungsverluste

Im Idealfall, das heißt also bei einem kugelförmigen Speicher, verliert ein  $10 \text{ m}^3$ -Speicher im Jahr das 1,3-fache seines Wärmeinhalts. Ein Speicher von  $100000 \text{ m}^3$  verliert weniger als 10 %. Sinnvoll sind diese Überlegungen natürlich nur, wenn die Energie jederzeit vom Kollektorfeld nachgeliefert wird.

Leider können Speicher aus Kostengründen nicht als Kugeln ausgeführt werden. Üblich ist eine zylindrische Gestalt. Während ein ideal proportionierter Zylinder nur wenig mehr Wärme als eine Kugel verliert, existieren oft Restriktionen der Speicherhöhe. Bei Großspeichern darf zumeist die grundwasserführende Schicht nicht erreicht werden. Deshalb ist die Verlustrelation weiterhin für einen 5 m hohen und einen 20 m hohen Zylinder aufgetragen. Bei Großspeichern führt eine Höhe von 5 m zur deutlichen Vergrößerung des Verlustes gegenüber der Kugelgestalt, während dies bei einem 20 m hohen Speicher nur in geringem Maße der Fall ist.

Weiterhin ist zu beachten, daß kleine Speicher zumeist nicht mit einer 1 m dicken Isolierung versehen werden können, während bei Großspeichern auch dickere Isolierungen denkbar sind. Ein zusätzlicher Aspekt ist, daß ein Speicher nicht nur über seine Oberfläche, sondern auch über Wärmebrücken, die vorrangig durch Anschlußleitungen entstehen, Energie verliert. Dies macht sich bei kleineren Speichern in einem sehr viel größeren Maße bemerkbar. Es muß also festgestellt werden, daß die saisonale Speicherung nur in zentralen Anlagen, die mit sehr großen Speichern ausgestattet werden können, sinnvoll ist.

### 3.2.4. Ausgeführte Anlagen

Auf dem Sektor der dezentralen Anlagen wurden vorrangig in der Schweiz umfassende Erfahrungen gesammelt /18/. In Tabelle 20 sind eine Reihe derartiger Systeme zusammengefaßt.

Tabelle 20: Dezentrale solare Heizung mit saisonaler Speicherung

Ort	Landschaft	Objekt	Q <sub>Norm</sub>	A <sub>Koll</sub>	V <sub>Sp</sub>	DR
			kW	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	%
Oberburg	CH-Mittelland	EFH	2,8	84	118	> 100
Krattingen	Berner Oberland	Dpl-EFH	2 x 4	68	11	70
Graz	Steiermark	EFH	6,3	47	69	75
Dürrenroth	Emmental	EFH	10	28	4	50
Flims	Graubünden	EFH	9	43 (VRK)	7	< 100
Zollikofen	CH-Mittelland	EFH	5,3	53	23	80
Gwatt	Thunersee	EFH	14	71	16	55
Inwil	Zentral-CH	EFH	5	54	18	80
Leuk	Wallis	EFH	5	32	19	90
Villars	Westschweiz	EFH	4	28	12	70
Obergoldbach	Emmental	Dpl.-EFH	6	65	14	80
Reinhausen	Weserbergland	Dpl.-EFH	4	40	20	75
Münster	NRW	ZFH	2,5	32	20	90
Lamboing	Jura	ZFH	14	42	5	55
Hasle	Emmental	ZFH	10	57	9	55
Unterlangenegg	Thun	ZFH	6	63	18	< 100
Altikon	Ostschweiz	ZFH + GH	16	50	20	60
Sevelen	CH-Rheintal	8-FH	20	110	25	75

Das Institut für Energietechnik der TU Dresden betreute mehrere Jahre das Niedrigenergiehaus Reinhausen meßtechnisch /4/78/79/. Das in der Nähe von Göttingen befindliche große Einfamilienhaus von fast 200 m<sup>2</sup> Wohnfläche besitzt folgende Ausstattungsmerkmale:

- 30 cm Wärmedämmung aus Styropor im Erdgeschoß und 20 cm Isofloc im Dachbereich
- Ausrichtung der Wohnräume nach Süden und der Nutzräume nach Norden
- Große vierfach verglaste Fensterflächen im Süden und kleine Fenster im Norden
- Fensterluftkollektoren in den Wohnräumen des Erdgeschosses
- Solare Heizung und Warmwasserbereitung mit 40 m<sup>2</sup> Kollektorfläche, 70° geneigt
- Saisonaler Speicher mit 20 m<sup>3</sup> Volumen
- Be- und Entlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- kein eigener Heizkessel, sondern Nahwärmeverbund mit Nachbarhaus
- Regenwassernutzung, Photovoltaik und Wintergarten



In Bild 75 ist das Energieflußbild für das Jahr 1994 aufgetragen. Die Einstrahlung betrug mit 38,9 MWh nur 973 kWh/m<sup>2</sup>a. Dies ist Ergebnis der sehr steilen Ausrichtung des Kollektorfeldes, die im Bestreben einer hohen Ausbeute im Winter vorgesehen wurde. Das Kollektorfeld konnte eine Wärmemenge von 11,5 MWh gewinnen, was einem Kollektorwirkungsgrad von 29,5 % entspricht. Davon gingen jedoch 4,52 MWh im saisonalen Speicher verloren, so daß sich bei einer Solarwärme von 6,95 MWh ein Systemwirkungsgrad von nur 17,9 % ergibt.

Auf der Verbraucherseite finden sich 5,68 MWh Raumwärmebedarf, was weniger als 30 kWh/m<sup>2</sup>a und damit nur einem Drittel des Grenzwertes der Wärmeschutzverordnung entspricht. Dies ist jedoch nicht nur Ergebnis der guten Dämmung und der Wärmerückgewinnung, sondern auch der nur 18 °C betragenden Durchschnittstemperatur.

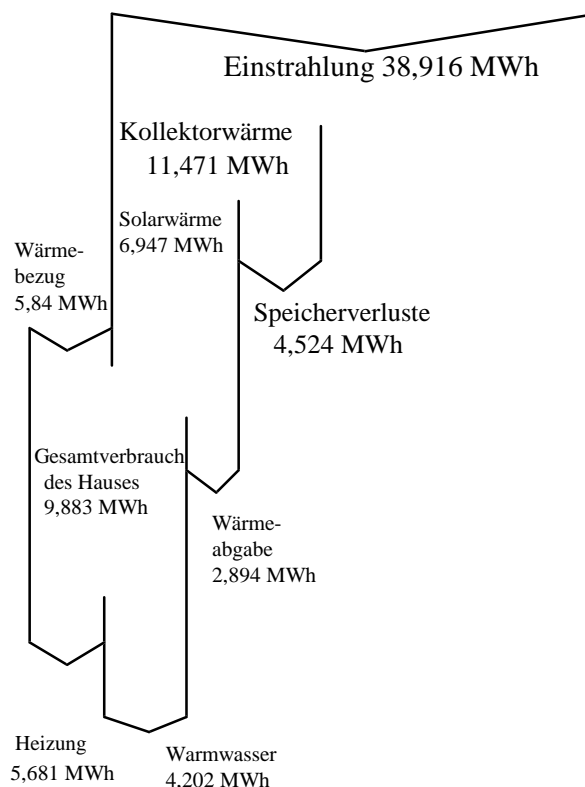


Bild 75: Energieflußbild 1994

Der Wärmebedarf der Warmwasserbereitung war mit 4,2 MWh fast so groß wie der Heizwärmebedarf.

Ein weiterer Verbraucher war mit 2,89 MWh das Nachbarhaus. Dem stand im Winter eine Wärmelieferung von 5,84 MWh/a gegenüber. Durch diesen Wärmeverbund unterscheidet sich das Objekt Reinhausen wesentlich von den anderen Häusern in Tabelle 20. Es ist daher auch nicht möglich, eine solare Deckungsrate zu definieren.

In Bild 76 ist der Jahresgang der Speichertemperaturen dargestellt. Obwohl der Speicher im Vergleich zum Kollektorfeld relativ klein ist, wird er in der obersten Schicht nur bis 80 °C beladen. Die unterste Schicht erreicht nur 50 °C. Eine Ursache waren die Speicherverluste, die durch den Einfluß von Wärmebrücken etwa doppelt so hoch wie theoretisch aus Dämmdicke und -wärmeleitfähigkeit berechnet waren. Eine zweite Ursache ist in der relativ großen Versorgungsaufgabe zu suchen.

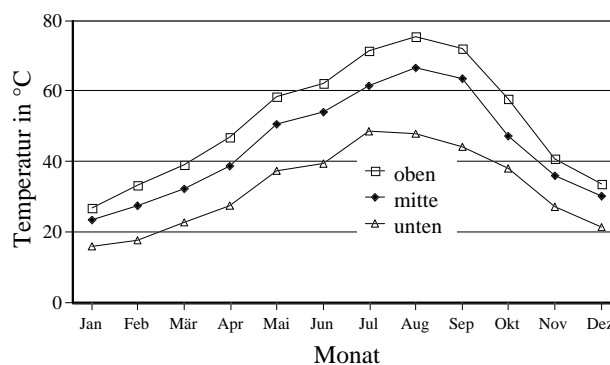


Bild 76: Jahresgang der Speichertemperaturen

Tabelle 21: Zentrale solare Heizung mit saisonaler Speicherung /20/

Land	Ort	Baujahr	Q <sub>a</sub>	A <sub>Koll</sub>	V <sub>Sp</sub>	DR	Q <sub>sol</sub>	V/A
			MWh/a	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	%	kWh/m <sup>2</sup> a	m
Dänemark	Tubberupvaenge			1.025	3.000			
Schweden	Fjäras	1.991	700	1.050	50	25	167	0,05
	Kullavik	1.986	700	700	50	25	250	0,07
	Igelstadt	1.988	1.000	2.400	5.000	70	292	2,08
	Lyckebo	1.983	8.500	Koll.: 4300	100.000	100	350	4,12
				Sim.: 20000				
	Särö	1.989	400	740	640	35	189	0,86
	Nykvarn	1.991	20.000	11.000	1.500	12	218	0,14
	Falkenberg	1.989	25.000	5.500	1.100	7	318	0,2
	Nynäshamn	geplant		130.000	350.000	75		2,69
	Kungälv	Studie		120.000	400.000			3,33
Deutschland	Friedrichshafen	1996 (lt.Plg.)	1.772	5.600	12.000	48	152	2,14
	Hamburg	in Planung	518	3.500	3.000	64	95	0,86
	Chemnitz	in Bau		2.000	8.000	54		4
	Bremen	Studie	620	1.500	2.500	50	207	1,67

In Bild 77 und Tabelle 21 sind Großanlagen der solaren Heizung mit ihren energetischen Kenngrößen aufgeführt. Diese Technik ist in Schweden am weitesten entwickelt.

Es wird erkennbar, daß die auf die Kollektorfläche bezogene Solarwärme bei hohen Deckungsraten geringer wird. Ursache sind die steigenden Verluste in Kollektor und Speicher. Eine Ausnahme bildet die sehr große Anlage in Lyckebo. Eine Teilerklärung liefert die Größe des Speichers. Aufgrund des günstigen Verhältnisses von Volumen und Oberfläche sind seine Verluste als gering anzusehen. Dies reicht als Erklärung jedoch nicht aus. Es ist anzunehmen, daß die elektrische Simulation der Kollektorfläche nicht vollständig gelingt. Eine unerklärlich hohe spezifische Solarwärme erreicht auch das System in Igelstadt.

Hinsichtlich der Speichergröße wird erkennbar: Je höher die solare Deckungsrate sein sollte, desto höher wurde auch das Speichervolumen im Vergleich zur Kollektorfläche gewählt. Im Bereich von 50 bis 80 % ist ein Quotient von 2 bis 3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> üblich.

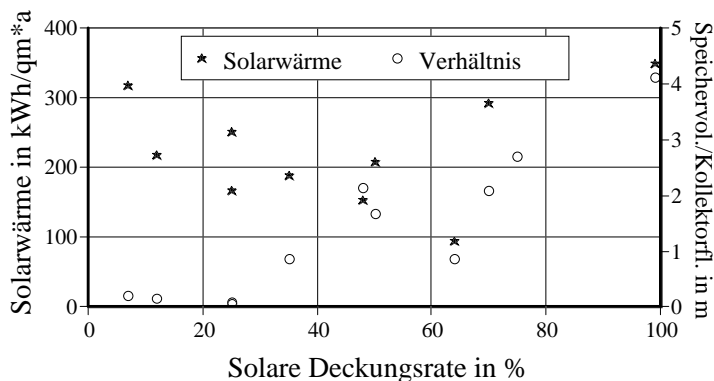


Bild 77: Eigenschaften der Großanlagen

### 3.2.5 Optimierung einer Beispielanlage

Es wird mit Hilfe der Computersimulation eine Beispielanlage der solaren Heizung mit saisonaler Speicherung untersucht. Es handelt sich hierbei um das an anderer Stelle bereits erwähnte Wohngebiet Oederan Freiburger Straße. Verwendet wird die Referenzvariante gemäß Kapitel 2.4.4. Die Versorgungsaufgabe wird für jeden Wohnblock durch folgende Verbrauchswerte definiert:

Heizwärmebedarf:	169,1 MWh/a	72,5 %	Zwischensumme WW:	64,14 MWh/a
Wassererwärmung:	38,07 MWh/a	16,3 %	Summe gesamt:	233,2 MWh/a
Zirkulation:	24,57 MWh/a	10,5 %		
Verluste WW-Sp.:	1,5 MWh/a	0,6 %		

Der Jahresgang des Wärmebedarfs ist in Bild 78 für alle Bedarfsträger dargestellt. Die Monatsmittelwerte des Verbrauchs der Warmwasserbereitung schwanken aufgrund unterschiedlicher Kaltwasser- und Netzumgebungstemperaturen um etwa 30 %. Der Heizwärmebedarf beträgt im Juni und August Null und erreicht im Januar einen Maximalwert. Der Gesamtwärmebedarf ist im Januar 9-mal so groß wie im August.

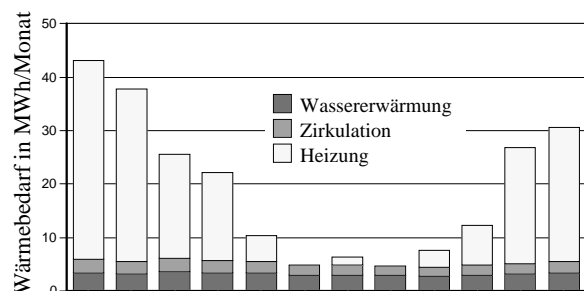


Bild 78: Jahresgang des Wärmebedarfs

Es soll eine Solaranlage zur Versorgung eines Vierleiternetzes untersucht werden. In Bild 79 ist sie dargestellt. Das Kollektorfeld beheizt, durch einen Wärmeübertrager hydraulisch getrennt, den saisonalen Speicher. Aus diesem Speicher wird dann die Wärme für Heizung und Warmwasserbereitung entnommen.

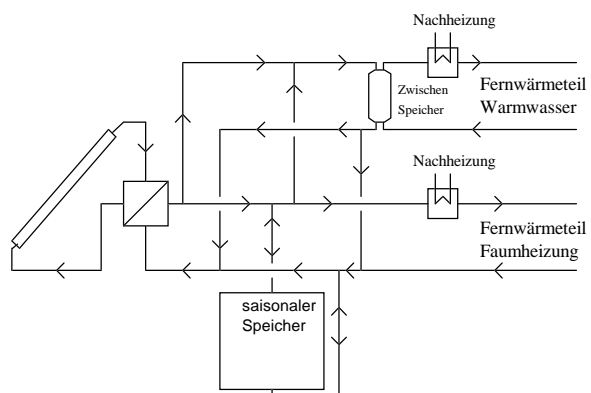


Bild 79: Schaltbild für ein Vierleiternetz

Die Warmwasserbereitung besitzt einen Zwischenspeicher. Er ermöglicht die Nutzung der Sonnenenergie zur Trinkwasservorwärmung, was zu höheren Wirkungsgraden führt. Andererseits kann der Saisonspeicher überbrückt werden, so daß die Sonnenstrahlung klarer Wintertage auch bei kaltem Saisonspeicher genutzt werden kann.

Es werden jeweils zwei Varianten betrachtet, einerseits die Versorgung eines Einzelblocks und andererseits die Versorgung eines Wohngebiets. Bild 79 widerspiegelt die Variante "Wohngebiet". Bei einem Einzelblock ist die Schaltung ähnlich, nur dienen die mit "Fernwärmeanteil" gekennzeichneten Leitungen direkt der Deckung von Heizwärme und Warmwasserbedarf. Der Zwischenspeicher ist dann noch mit einem Wärmeübertrager zur Trennung von Heiz- und Trinkwasser auszustatten.

In Bild 80 ist das prinzipielle Energieflußbild dargestellt. Die vom Kollektor abgegebene Wärme wird größtenteils zum Speicher transportiert. Ein geringer Anteil wird direkt zur Warmwasserbereitung genutzt. Der übrige Anteil, verringert durch die Speicherverluste, fließt indirekt der Heizung und Warmwasserbereitung zu. Jeweils fehlende Energiebeträge müssen durch eine Nachheizeinrichtung aufgebracht werden.

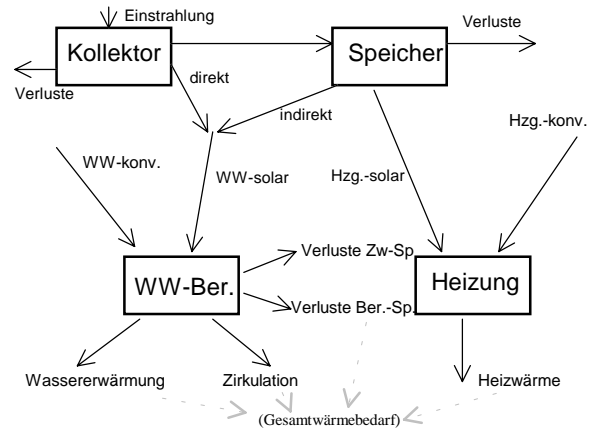


Bild 80: Energieflußbild

Auf der Warmwasserseite ist noch zu beachten, daß die Speicher Verluste aufweisen. Dabei sind die Verluste des Bereitschaftsspeichers als Bedarfsbestandteil anzusehen, da sie auch ohne Solaranlage vorliegen würden. Die solare Deckungsrate wird wie folgt definiert:

$$\text{Deckungsrate} = \frac{\text{Gesamtwärmebedarf} - \text{konv. Zusatzwärme}}{\text{Gesamtwärmebedarf}}$$

In Bild 81 ist der Jahresverlauf von Energiebilanz und Speichertemperatur prinzipiell dargestellt. Der Verlauf ist im Zusammenspiel mit den meteorologischen Daten gemäß Bild 8 zu sehen. Der Speicher besitzt im Januar nur noch eine geringe Temperatur. Dem gegenüber ist die Außentemperatur niedrig und die erforderliche Heizungsvorlauftemperatur hoch. Die Sonne kann daher nur im geringem Maße zur Deckung des Wärmebedarfs beitragen. Einige sonnige Tage im Januar führen jedoch zu einer leichten Erhöhung der Speichertemperatur. Mit steigenden Außentemperaturen steigt die Solarwärme ab März an. Da sich aber auch das Strahlungsangebot erhöht, steigt die Speichertemperatur weiter.

Ende April endet die Heizperiode. Aufgrund der nur noch geringen Wärmeabnahme steigt die Speichertemperatur steil an. Ende Juni setzt eine sommerliche Schlechtwetterperiode ein, die einen leichten Heizwärmebedarf verursacht. Dieser Wärmebedarf führt in Kombination mit der geringen Einstrahlung zu einer Verringerung der Speichertemperatur.

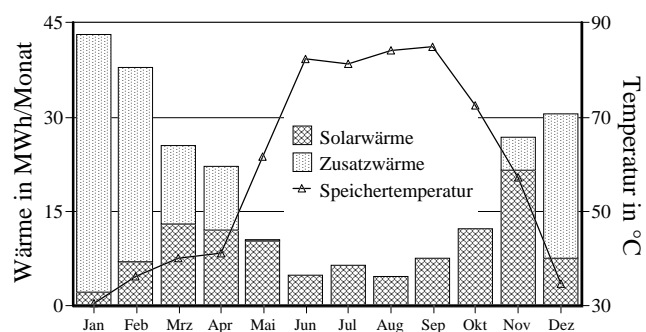


Bild 81: Jahresgang von Energie und Temperatur

Anfang August wird das Wetter deutlich besser. Durch die verringerte Tageslänge, verbunden mit dem durch die hohe Speichertemperatur bedingten geringem Kollektorwirkungsgrad, steigt die Speichertemperatur nur noch wenig.

Mitte September beginnt die Heizperiode wieder. Der gesamte Wärmebedarf kann solar abgedeckt werden. Der Herbst ist sehr mild, so daß die Speichertemperatur nur langsam absinkt. Im November ist der Heizwärmebedarf dann deutlich höher, kann jedoch immer noch zu einem großen Teil solar abgedeckt werden. Erst im Dezember, dem strahlungsärmsten Monat des Jahres, geht die Speichertemperatur soweit zurück, daß nur noch ein geringer Teil des Wärmebedarfs solar gedeckt werden kann.

In Tabelle 22 sind das Speicherverhalten und die Deckungsraten für unterschiedliche Kollektorflächen aufgeführt. Es wird von folgenden Eigenschaften ausgegangen, die eine allgemeine Referenzvariante kennzeichnen:

Kollektor:	Flachkollektor gemäß Tabelle 23
Ausrichtung:	Süd, 38° Neigung
Speichergröße:	1 m <sup>3</sup> Volumen je 1 m <sup>2</sup> Kollektorfläche
eff. Verlustkoeff. Speicher:	0,4 kJ/hm <sup>2</sup> K = 0,11 W/m <sup>2</sup> K
Auslegungsvorlauftemperatur:	70 °C
Auslegungsrücklauftemperatur:	45 °C

Tabelle 22: Variation der Kollektorfläche

A <sub>Koll</sub>	t <sub>Sp,anf</sub>	t <sub>Sp,min</sub>	t <sub>Sp,max</sub>	DR in %			Q <sub>sol</sub> kWh/m <sup>2</sup> a
				WW	Hzg.	gesamt	
	°C						
100	23,38	20,16	56,35	48,64	9,64	20,53	474,6
200	27,43	25,63	73,55	64,42	20,7	32,41	377,8
400	30,58	29,7	88,5	73,26	37,67	47,44	276,6
800	41,39	35,54	94	85,28	61,82	68,26	199

In Bild 82 sind die Daten gemäß Tabelle 22 graphisch dargestellt. Bild 83 enthält die Jahresgänge der Speichertemperatur. Anfängliche und minimale Speichertemperatur weisen nur eine geringe Abhängigkeit von der Kollektorfläche auf. Auch bei einer sehr großen Anlage kann bei einem Volumen/Fläche-Verhältnis von 1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (=> m) nur eine geringe Wärmemenge über den Jahreswechsel hinaus gespeichert werden. Die Maximaltemperatur steigt mit der Anlagengröße deutlich an und erreicht zwischen 400 und 800 m<sup>2</sup> Kollektorfläche den Grenzwert 94 °C, bei dem aus Sicherheitsgründen eine zeitweilige Abschaltung des Kollektorfeldes erfolgt.

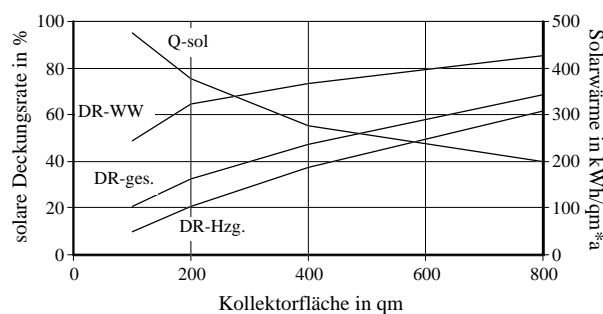


Bild 82: Variation der Kollektorfläche

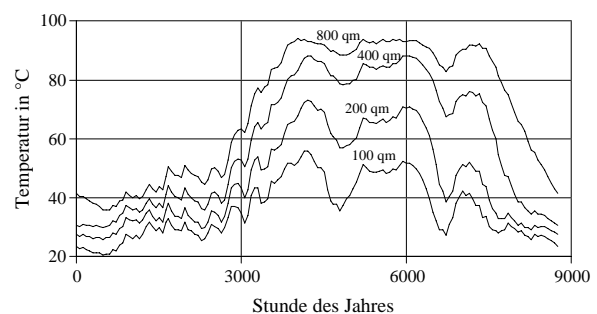


Bild 83: Jahresgänge der Speichertemperatur

Die solare Deckungsrate steigt mit der Kollektorfläche erwartungsgemäß an und erreicht bei einer Kollektorfläche von  $800 \text{ m}^2$  einen Wert von  $68,3 \%$ . Demgegenüber fällt die flächenspezifische Solarwärme von  $475$  auf  $199 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  ab. Dies ist vorrangig durch die mit der Kollektorfläche stark ansteigenden Systemtemperaturen bedingt. Da es sich bei der solaren Deckungsrate um die eigentliche Zielgröße handelt, werden nachfolgend alle Daten, vorrangig spezifische Solarwärmern und spezifische Kosten, als Funktion der Deckungsrate dargestellt.

In Bild 84 ist die Abhängigkeit der spezifischen Solarwärme für unterschiedliche Kollektorarten und Volumen/Fläche-Verhältnisse dargestellt. Die Kollektorarten mit ihren Eigenschaften und Preisen sind gemäß /14/ in Tabelle 23 belegt. Die Preise wurden aus Angeboten für Kleinanlagen bestimmt. Da an dieser Stelle Großanlagen untersucht werden, sind für die Preise das Minimalangebot abzüglich  $20 \%$  Rabatt angesetzt worden .

Tabelle 23: Kollektoreigenschaften

Kollektorart	Anbieter	Preis	$k_0$	$k_1$	$h_{\text{opt,max}}$	b
		DM/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	%	-
Flachkollektor	Ikarus	439	3,56	0,014	82	0,15
Vakuumflachkollektor	Thermosolar	953	2,61	0,008	81	0,15
Vakuurröhre	Elko-Klöckner	1.187	1,32	0,015	78	0,05

Mit Vakuumflachkollektoren ist eine bis zu  $20 \%$  größere spezifische Solarwärme realisierbar. Auch die solare Deckungsrate kann wesentlich vergrößert werden.

Ein weiterer Zuwachs der Solarwärmemenge ist mit Vakuurröhrenkollektoren möglich, jedoch können hohe Deckungsraten aufgrund mangelnder Konvergenz des Rechenalgorithmus nicht weiter verfolgt werden.

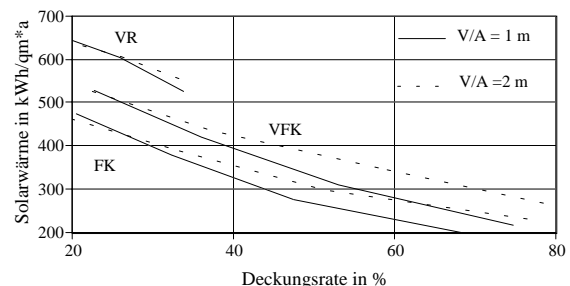


Bild 84: Variation der Kollektorart

Bei kleinen Deckungsraten ist eine Vergrößerung des Speichers energetisch nicht sinnvoll, da die Speicherverluste stärker als die Kollektorwärme ansteigen. Ab einer Deckungsrate von  $30 \%$  führt jedoch die Volumenvergrößerung zu einer Erhöhung der Solarwärmemenge, wobei diese Differenz bei einer Erhöhung der Deckungsrate immer größer wird.

In Bild 85 sind die spezifischen, durch Kollektor und Speicher verursachten Kosten der Solarwärme dargestellt. Die Investition für Verrohrung und Regelung hat bei derart großen Anlage keinen wesentlichen Anteil mehr und wird daher vernachlässigt.

Es ist erkennbar, daß Vakuumflach- und Vakuurröhrenkollektor kostenmäßig einander gleichwertig, aber wesentlich teurer als Flachkollektoren sind. Daher ist es nicht sinnvoll, beide Konzepte weiter zu verfolgen, weshalb auch nicht die Ursache der Nichtkonvergenz bei großen Röhrenflächen gesucht wird.

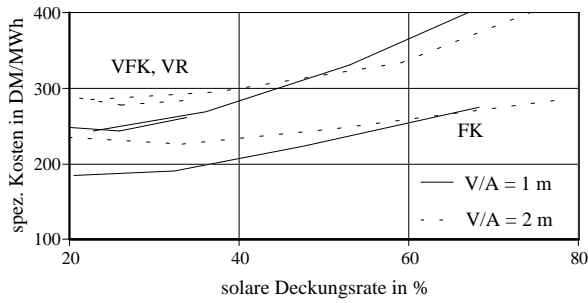


Bild 85: Kosten bei Einzelspeicherung

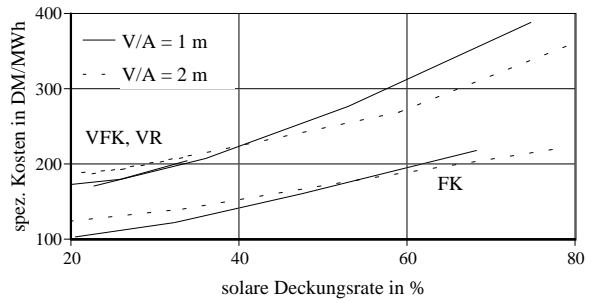


Bild 86: Kosten bei Gruppenspeicherung

Beim Einsatz von Flachkollektoren ist ein kleines Speichervolumen/Kollektorflächen-Verhältnis bis zu einer hohen Deckungsrate von 65 % am wirtschaftlichsten. Dies ergibt sich aus den bei kleinen Anlagen sehr hohen spezifischen Speicherkosten. Es wird daher auch die Versorgung einer Gruppe von 20 Häusern betrachtet, die einen gemeinsamen saisonalen Speicher besitzen. Die Kosten sind in Bild 86 dargestellt. Sie sind bis zu 30 % geringer als bei Einzelspeicherung, wobei eine Vergrößerung des Speichervolumens bereits bei einer Deckungsrate von 50 % sinnvoll ist.

Es lohnt sich, die Variation des Speichervolumens weiter zu vertiefen. In Tabelle 24 sind die Deckungsraten bei unterschiedlichen Flächen und Volumen/Flächen-Verhältnissen für den Flachkollektor aufgeführt.

Tabelle 24: Variation des Verhältnisses V/a

A <sub>koll</sub> in m <sup>2</sup>	V/A in m	solare Deckungsrate in %					
		0,5	1	1,5	2	3	4
100		20,3	20,53	20,21	19,88	19,77	19,52
200		31,48	32,41	33,06	33,31	33,86	34
400		45	47,44	49,57	51,29	53,91	55,51
800		62,28	68,26	74,17	78	82,32	84,63

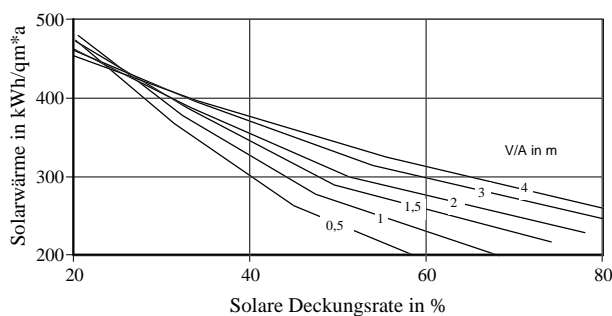


Bild 87: Variation der Speichergöße

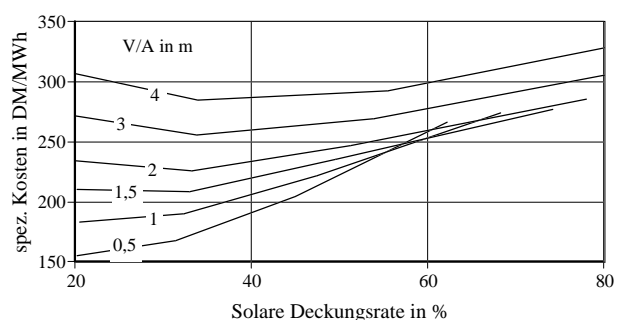


Bild 88: Kosten der Einzelspeicherung

In Bild 87 werden die entsprechenden Solarwärmern dargestellt. Je höher die Deckungsrate, desto günstiger sind große Speichervolumina. Bereits ab einer Deckungsrate von 35 % ist sogar ein Volumen/Flächen-Verhältnis von 4 m aus energetischer Sicht zu empfehlen.

Aus wirtschaftlicher Sicht stellt sich die Situation anders dar. In Bild 88 sind die Kosten der Einzelspeicherung aufgeführt. Erst ab einer Deckungsrate von 57 % wird beim Verhältnis V/A eine Erhöhung über 0,5 m sinnvoll. Auch bei sehr hohen Deckungsraten ist maximal  $V/A = 2$  m vorzusehen.

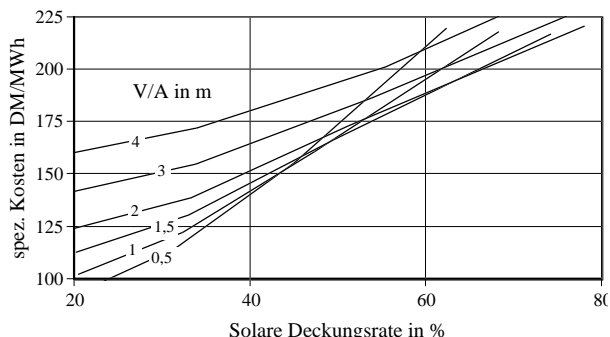


Bild 89: Gruppenspeicherung

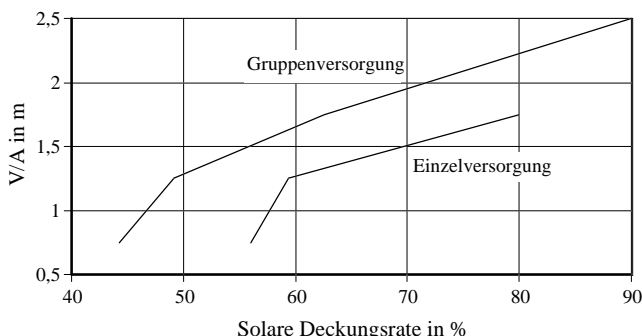


Bild 90: Optimales Verhältnis V/A

In Bild 89 ist die Situation bei einem gemeinsamen Speicher für eine Gruppe von 20 Häusern dargestellt. Der Speicherkostenanteil ist geringer, daher sind generell größere Speichervolumina sinnvoll. In Bild 90 sind die optimalen Verhältnisse für beide Versorgungsstrukturen zusammengefaßt. Auch wenn das optimale Verhältnis mit Deckungsrate und Anlagengröße ansteigt, ist ein Verhältnis von 1 im relevanten Bereich von 40 bis 70 % Deckungsrate der Kostenminimallinie ausreichend nahe und wird für die nachfolgenden Untersuchungen weiter verwendet.

Eine weitere Variationsgröße stellt die Speicherisolierung dar. In Tabelle 25 sind die solaren Deckungsraten für halbierte und verdoppelte effektive Isolierung (einschließlich Wärmebrückeneinfluß) bei unterschiedlichen Kollektorflächen und Verhältnissen V/A dargelegt.

Tabelle 25: Solare Deckungsraten in % bei Variation der Speicherisolierung

A <sub>Koll</sub> in m <sup>2</sup>	k <sub>Sp</sub> in kJ/hm <sup>2</sup> K	0,2		0,4		0,8		
		V/A in m	1	2	1	2	1	2
100			20,87	20,9	20,53	19,88	19,3	18,48
200			33,12	34,58	32,41	33,31	31,06	31,03
400			48,68	53,61	47,44	51,29	45,29	47,31
800			69,88	82,32	68,26	78	64,94	70,72

In Bild 91 ist dieser Sachverhalt graphisch dargestellt. Erwartungsgemäß steigt die Solarwärme bei Verbesserung der Isolierung an, wobei der Effekt bei großem V/A höher ist. Die Unterschiede in der Solarwärme bleiben mit der Deckungsrate als Absolutwert absolut konstant und steigen damit als Relativwert. Bei  $V/A = 1$  m und einer Verdoppelung der effektiven Isolierung beträgt der Unterschied etwa 25 kWh/m<sup>2</sup>a.

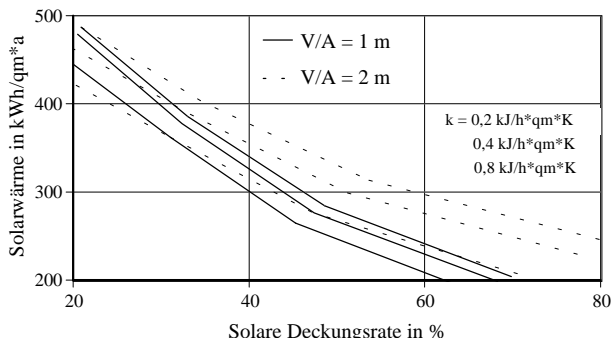


Bild 91: Variation der Speicherisolierung



Im Folgenden soll untersucht werden, welchen Einfluß der Warmwasserverbrauch auf die Funktion  $Q_{\text{sol}}(\text{DR})$  hat. Unterschieden wird nach Normalverbrauch (Bedarfsquotient 1), verdoppeltem Verbrauch (Bedarfsquotient 2) und keiner Warmwasserbereitung (Bedarfsquotient 0). Liegt Warmwasserbedarf vor, wird weiterhin nach vorhandener und nichtvorhandener Zirkulation unterschieden.

Tabelle 26: Deckungsrate in % für die Variation des Warmwasserverbrauchs

Bedarfsquotient	1	2	0	1	2
	Zirkulation vorhanden		keine Zirkulation		
Fläche in m <sup>2</sup>					
100	20,53	19,71	18,36	21,12	21,46
200	32,41	32,44	29,75	32,5	33,8
400	47,44	47,49	46,95	48,31	48,81
800	68,26	66,84	69,61	69,84	68,82
Bedarf in MWh/a	233,2	271,3	170,6	208,6	246,7

Je größer der Warmwasserbedarf, desto höher ist der Kollektorwirkungsgrad und damit die Solarwärme bei gleicher Deckungsrate. Der wichtigste Grund ist die beim Trinkwasservorwärmetrieb relativ geringe Temperatur im Kollektor. Eine zweite Ursache besteht in der Vergleichmäßigung des Jahresgangs des Gesamtwärmebedarfs. Daraus ergibt sich, daß auch die Existenz der Zirkulationsverluste zu einem Anstieg des Kollektorwirkungsgrades führt. Dieser Einfluß ist jedoch sehr klein und nimmt mit steigendem Verbrauch ab.

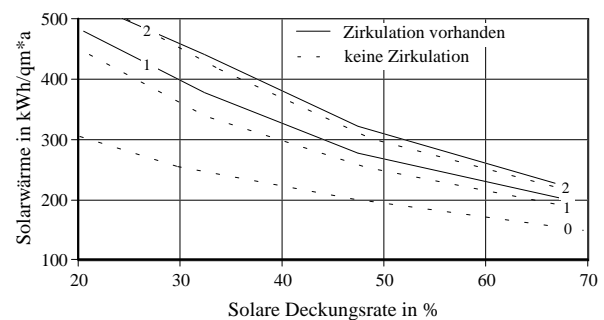


Bild 92: Variation des Warmwasserverbrauchs

Weiterhin wird der Einfluß der Heizflächenauslegung untersucht. Es ist eine größere Abhängigkeit der Solarwärme zu erwarten, da mit steigender Heizfläche die Vorlauftemperatur reduziert werden kann, was zu einer besseren Speicherentladung und geringeren Temperaturen im Kollektor führt.

Tabelle 27: Variation der Heizflächen

$t_{\text{vor,max}}$	90		70		55	
$A_{\text{heiz}}/A_{\text{norm}}$	1		1,94		4,18	
$A_{\text{koll}}$ in m <sup>2</sup>	DR in %	$Q_{\text{sol}}$ in kWh/m <sup>2</sup> a	DR in %	$Q_{\text{sol}}$ in kWh/m <sup>2</sup> a	DR in %	$Q_{\text{sol}}$ in kWh/m <sup>2</sup> a
100	19,23	448,5	20,53	474,6	21,26	495,8
200	29,89	348,6	32,41	377,8	34,26	399,4
400	43,05	251	47,44	276,6	50,54	294,6
800	61,55	179,4	68,26	199	73,03	212,9

Erwartungsgemäß steigt die Solarwärme mit sinkender Vorlauftemperatur an. Die temperaturbezogene Differenz ist von der Deckungsrate unabhängig und beträgt etwa  $2,4 \text{ kWh/m}^2\text{a/K}$ .

Der Vergrößerung der Solarwärme steht eine Erhöhung der Investitionskosten der Heizkörper gegenüber. Für eine Verringerung der Vorlauftemperatur von  $70 \text{ °C}$  auf  $55 \text{ °C}$  muß die Normleistung der Heizkörper von  $182 \text{ kW}$  auf  $268 \text{ kW}$  erhöht werden, was zu Mehrkosten von  $2000 \text{ DM/a}$  führt. Bei einer Deckungsrate von  $50 \%$  entspricht dies  $186 \text{ DM/MWh}$  und liegt damit in der Größenordnung der Kosten der Solarwärme.

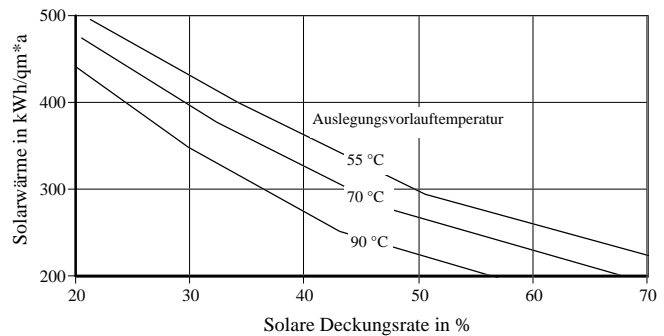


Bild 93: Variation der Heiznetzauslegung

Da der Wert aber immer noch geringer als die Kosten der Solarwärme ist, sollte eine Heizflächenauslegung mit niedrigen Temperaturen und dementsprechend großen Flächen gewählt werden. Die Bedeutung ist aber nicht so groß, wie bisher angenommen wurde.

Eine weitere interessante Variation stellt der Einfluß des Wärmeschutzes dar. Es sollen drei Varianten gemäß Kapitel 2.3.6 unterschieden werden.

- |    |                         |  |
|----|-------------------------|--|
| a) | schlechter              | keine Wärmedämmung, alte Fenster   |
| b) | Referenz                | 6 cm Wärmedämmung, übliche Fenster   |
| c) | exzellente Wärmedämmung | 10 cm Wärmedämmung, verbesserte Fenster, Wärmerückgewinnung, 60 % Rückgewinnungsgrad |

Tabelle 28: Variation des Wärmeschutzes

schlecht			Referenz			exzellent		
$A_{\text{koll}}$ $\text{m}^2$	DR %	$Q_{\text{sol}}$ $\text{kWh/m}^2\text{a}$	$A_{\text{koll}}$ $\text{m}^2$	DR %	$Q_{\text{sol}}$ $\text{kWh/m}^2\text{a}$	$A_{\text{koll}}$ $\text{m}^2$	DR %	$Q_{\text{sol}}$ $\text{kWh/m}^2\text{a}$
150	20,82	484,4	100	20,53	474,6	75	19,56	477,7
300	33,44	389,1	200	32,41	377,8	150	31,73	387,4
600	49,33	287	400	47,44	276,6	300	45,64	278,6
1.200	70,55	205,2	800	68,26	199	600	65,48	199,9
Bedarf in MWh/a		349,04			233,2			183,14

In Bild 94 ist die Abhängigkeit vom Dämmstandard graphisch dargestellt. Die Solarwärme geht mit der Verbesserung des Wärmeschutzes zurück, jedoch nur in sehr geringem Maße. Allerdings ist die durch Wärmeschutz eingesparte Energie spezifisch wesentlich billiger als Solarwärme, so daß dieser Effekt mehr als kompensiert wird.

In der Literatur /21/ wird angegeben, daß der Einsatz der Solarenergie erst unterhalb eines Heizwärmebedarfs von  $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  sinnvoll ist. Dies entspricht der Variante "exzellenter Wärmeschutz". Da die Kurven in Bild 94 fast identisch sind, werden die Berechnungen in diesem Kapitel dadurch nicht in Frage gestellt.

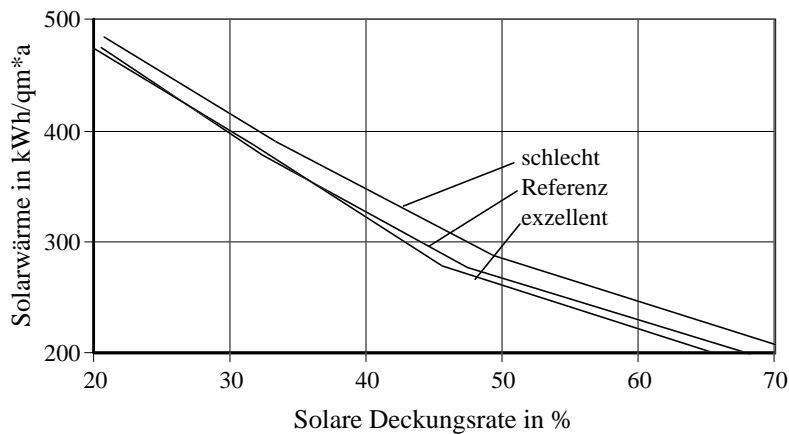


Bild 94: Variation des Wärmeschutzes

Als Letztes soll der Einfluß von Wetterbedingungen untersucht werden. Verglichen werden hierbei die Ergebnisse für die Wahnsdorfer Wetterdaten und Werte für drei unterschiedliche Testreferenzjahre.

Tabelle 29: Variation der Wetterdaten

$A_{\text{Koll}}$ in $\text{m}^2$	Deckungsrate in %			
	Dresden-Wahnsd.	TRY Essen	TRY Würzburg	TRY München
100	20,53	16,89	18,71	17,56
200	32,41	27,14	28,49	28,12
400	47,44	40,32	40,97	43,19
800	68,26	58,03	58,39	61,57
Bedarf in MWh/a	233,2	220,8	229,8	244,1

Die Wetterdaten sind, wie in Bild 95 erkennbar ist, ein äußerst bedeutender Einflußfaktor. Die Ergebnisse der mit verschiedenen Wetterdatensätzen gewonnenen Ergebnisse unterscheiden sich stärker als die Ergebnisse bei Variation der Heizungsvorlauf-temperatur. Der Wetterdateneinfluß ist ungefähr genauso groß wie der Einfluß der Kollektorart.

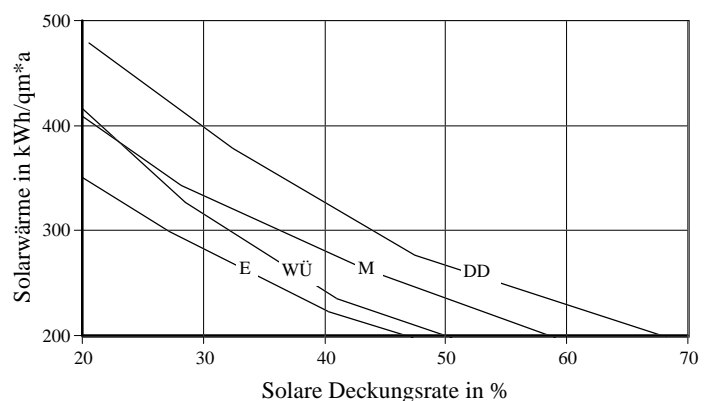


Bild 95: Variation der Wetterdaten

Dabei ist zu bedenken, daß Unterschiede nicht nur durch die Verschiedenheit der durch die vier Stationen repräsentierten Mikroklimata, sondern auch durch die Schwankungen des Wetters innerhalb einer TRY-Region entstehen können. So kann eine Solaranlage in Dresden in einem strahlungsarmen Jahr nur die Ergebnisse von Essen, aber eine Solaranlage in Essen in einem strahlungsreichen Jahr auch die Ergebnisse von Dresden erreichen.

Die berechneten Werte gelten also nur für die eingesetzten Wetterdatensätze. In konkreten Jahren können in jeder Stadt durchaus wesentlich andere Solarerträge auftreten.

Die konkreten Werte gemäß Tabelle 29 und Bild 95 sind im Kontext mit der Wetterdatenbeschreibung im Abschnitt 2.1.5 zu sehen. Zunächst ergeben sich durch abweichende Jahresdurchschnittstemperaturen Unterschiede im Wärmebedarf. Dieser ist in Essen geringer und in München höher als in Dresden.

Die größte Solarenergieausbeute läßt sich in Dresden erzielen, was hauptsächlich durch die hohen Einstrahlungswerte im Winter verursacht wird. Aufgrund geringer Einstrahlung im Winter ist die Solarwärme in Würzburg deutlich niedriger, obwohl die jährliche Strahlung höher ist.

Der Unterschied zwischen Dresden und Würzburg ist als Absolutwert von der Deckungsrate unabhängig und steigt damit als Relativwert mit der Deckungsrate stark an. Ursache ist die mit steigender Deckungsrate zunehmende Speicherauslastung, die erst mit der Abschaltung des Kollektorkreises aufgrund unzulässig hoher Speichertemperaturen eine Grenze findet. Angesichts des großen Unterschieds zwischen Sommer und Winter wird der saisonale Speicher in Würzburg stärker beansprucht.

In München tritt ebenfalls eine geringere Deckungsrate als in Dresden auf. Der Unterschied verringert sich mit steigender Deckungsrate deutlich. Zum einen sind die Temperaturen im Winter niedriger als in Dresden, was hohe Heizungsvorlauftemperaturen erforderlich macht, die nicht immer von der Solaranlage geliefert werden können, zum anderen sind die winterlichen Einstrahlungswerte niedriger als in Dresden, jedoch wesentlich höher als in Würzburg.

Den schlechtesten Ertrag würde eine Solaranlage in Essen erbringen. Dort sind die Einstrahlungswerte im Sommer wie im Winter deutlich niedriger als in anderen Orten.

Ergebnis der Wetterdatenvariation ist, daß die im gesamten Abschnitt 3.2 gewonnenen Erkenntnisse nicht als repräsentativ für ganz Deutschland angesehen werden können, sondern nur für strahlungsreiche Jahre und Orte. Es ist möglich, daß eine Berechnung mit dem Testreferenzjahr 07 "Freiburg" Ergebnisse wie in Dresden liefern würde, jedoch stand dieses aus Kostengründen nicht zur Verfügung.

Inwiefern die Ergebnisse für Dresden und Ostsachsen repräsentativ sind, kann nur durch die Fertigstellung eines offiziellen Testreferenzjahres für diese Region geklärt werden. Damit ist 1997 zu rechnen. Die Strahlungskarte gemäß Bild 2 weist die der Simulation zugrundegelegten Globalstrahlungswerte aus.

In folgenden Stichpunkten werden die Ergebnisse der Simulation **zusammengefaßt**:

- Systeme der solaren Heizung mit saisonaler Speicherung erreichen Deckungsraten über 70 %, kostenmäßig ist es günstiger, eine Deckungsrate um 50 % anzustreben.
- Es sollten besser konventionelle, selektive Flachkollektoren statt Vakuumröhren oder Vakuumflachkollektoren eingesetzt werden.
- Das optimale Verhältnis von Speichervolumen und Kollektorfläche ist von angestrebter Deckungsrate und Systemgröße abhängig. Es sollte nicht größer als  $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$  gewählt werden.
- Ein vorgegebener Wärmebedarf kann um so besser solar gedeckt werden, je höher der Anteil des Wassererwärmungs- und -zirkulationsbedarfs gegenüber dem Heizwärmebedarf ist.
- Je größer die Heizflächen sind, desto höher ist auch die solare Deckungsrate. Die damit möglichen Kosteneinsparungen auf der Solarseite sind jedoch nicht wesentlich größer als die Kosten der Heizflächenvergrößerung.
- Eine Verbesserung des Wärmeschutzes verlagert den verbleibenden Heizwärmebedarf mehr in die Wintermonate, so daß die solare Deckungsrate absinkt - jedoch nur in sehr geringem Maße.
- An Orten mit gleicher Gesamteinstrahlung sind die Deckungsraten höher, wenn der Jahresgang der Strahlung gleichmäßiger ist. Der verwendete Wetterdatensatz Dresden-Wahnsdorf 1954 bietet hier besonders gute Bedingungen.