

4.3 Auslegung solarer Warmwasserbereitungsanlagen

4.3.1 Anlagengröße

Im folgenden ist zu untersuchen, wie in Abhängigkeit vom Bedarf eine solare Warmwasserbereitungsanlage sinnvoll auszulegen ist. Aufgrund unterschiedlicher Kostenfunktionen muß hierbei zwischen kleineren und größeren Anlagen unterschieden werden. Zunächst wurden für einen Bedarf von 300 l/d und einen von 3000 l/d die solaren Deckungsraten für unterschiedliche Kollektor- und Speichergrößen mittels TRNSYS bestimmt. Es soll hierbei auf Flachkollektoren mit $k_m = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ orientiert werden, die auf einem mit 45° geneigten Süddach montiert sind. Der Bedarf liegt bei 45°C vor und weist einen Tagesgang entsprechend Bild 42 auf.

Wie nicht anders zu erwarten, steigt die solare Deckungsrate entsprechend Bild 136 und 137 mit der Kollektorfläche an, scheint jedoch einem Grenzwert zuzustreben. Bei kleinen Flächen erreichen Anlagen mit kleinen Speichern optimale Ausbeuten, bei größeren Flächen muß auch das Speichervolumen erhöht werden.

Als zweiter Schritt wurden die spezifischen Kosten der gelieferten Solarwärme bestimmt. Hierzu mußten zunächst Ansätze für die aufzubringende Investitionssumme aufgestellt werden. Aus einem Katalog /77/ und begründeten Annahmen zu Montagekosten wurden folgende Abhängigkeiten von Kollektorfläche und Speichervolumen gefunden:

$$\text{Kleinanlage: } I = 4975 \text{ DM} + 965 \text{ DM/m}^2 * A_{\text{Koll}} + 5175 \text{ DM/m}^3 * V_{\text{Sp}}$$

$$\text{Großanlage: } I = 7900 \text{ DM} + 912 \text{ DM/m}^2 * A_{\text{Koll}} + 3000 \text{ DM/m}^3 * V_{\text{Sp}}$$

Bei Kleinanlagen wird noch eine Förderung von 20 % berücksichtigt und anschließend die eingesparte Investition des konventionellen kleineren Speichers mit einem Wärmeübertrager in Höhe von 1500 DM abgezogen. Bei Großanlagen kann aufgrund der Bestellmenge ein Rabatt von 20 % und ebenfalls eine Förderung von 20 % angenommen werden. Es ergeben sich dann folgende Abhängigkeiten:

$$\text{Kleinanlage: } I = 2480 \text{ DM} + 770 \text{ DM/m}^2 * A_{\text{Koll}} + 3340 \text{ DM/m}^3 * V_{\text{Sp}}$$

$$\text{Großanlage: } I = 5060 \text{ DM} + 585 \text{ DM/m}^2 * A_{\text{Koll}} + 1920 \text{ DM/m}^3 * V_{\text{Sp}}$$

Die Investition wird mittels des korrigierten Annuitätenmodells gemäß Kap. 2.8. in Kapitalkosten umgesetzt. Weiterhin sind noch Wartungs- und Betriebskosten gemäß folgender Gleichung zu berücksichtigen:

$$\text{Kleinanlage: } K_B = 100 \text{ DM/a} + 15 \text{ DM/am}^2 * A_{\text{Koll}}$$

$$\text{Großanlage: } K_B = 500 \text{ DM/a} + 10 \text{ DM/am}^2 * A_{\text{Koll}}$$

Die kleine Anlage erreichte entsprechend Bild 136 ein Optimum bei einer Fläche von $4,5 \text{ m}^2$, bei der sich eine Deckungsrate von 55 % einstellt. Bei der Großanlage verschiebt sich entsprechend Bild 137 aufgrund des geringeren Einflusses größenunabhängiger Kosten das Optimum zu einer geringeren Kollektorfläche. In diesem Fall sind dies 35 m^2 , bei der sich eine Deckungsrate um 45 % einstellt.

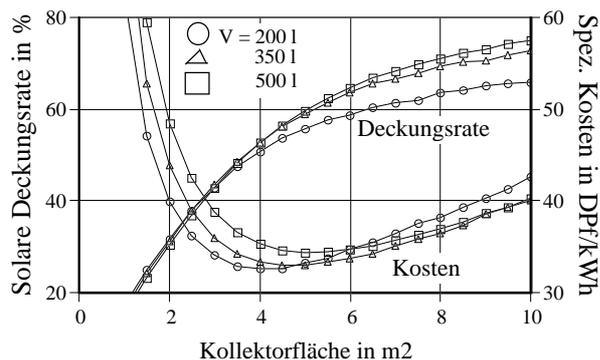


Bild 136: Auslegung einer Kleinanlage

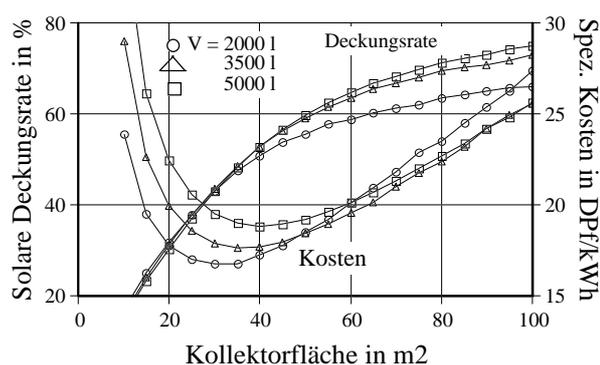


Bild 137: Auslegung einer Großanlage

Stets ist es sinnvoll, einen Speicher, der etwas weniger als einen Tagesverbrauch aufnehmen kann, vorzusehen. Unter der Voraussetzung eines Verbrauchs von 35 l/d*Pers. (siehe Kap. 2.5) sind bei Großanlagen 0,4 m²/Person ein Empfehlungswert. In Ein- und Zweifamilienhäusern ist der Warmwasserverbrauch wahrscheinlich höher, da deren Bewohner allgemein höheren Komfort gewohnt sind. Empfehlenswert sind daher etwa 0,7 m² je Person.

Bei Kleinanlagen ist das Optimum eher flach ausgebildet, so daß sich Fläche und damit solare Deckungsrate vergrößern lassen, ohne die spezifischen Kosten deutlich zu erhöhen. Großanlagen reagieren jedoch sehr empfindlich auf eine zu große Auslegung. Da der eingesetzte Wetterdatensatz aufgrund hoher Wintereinstrahlungen zu relativ hohen Deckungsraten führt, kann die Kollektorfläche etwas höher als angegeben angesetzt werden, um die optimalen Deckungsraten zu realisieren. Die Kosten sind immer höher als bei fossilen Energieträgern.

4.3.2 Einfluß der Kollektorausrichtung

Nur selten ist die Ausrichtung des Kollektorfeldes als Auslegungsgröße zu ermitteln. Wird der Kollektor auf einem Schrägdach montiert, ist das Problem trivial. Die Montage erfolgt auf der Seite mit der geringsten Abweichung von Süden. Lediglich bei der Aufständigung auf Flachdächern, Garagen, Freiflächen, Schrägdächern geringer Neigung, Anhängung an Giebelseiten, drehbaren Vakuumröhren und bei der ökologischen Siedlungs- und Gebäudeplanung ist die Ausrichtung ein Freiheitsgrad. Aufgrund des hohen Anteils von Gebäuden mit Flachdächern liegt dies in den neuen Bundesländern recht häufig vor.

Bei bestehenden Objekten mit Schrägdächern liegt nur selten eine optimale Ausrichtung vor. Hier ist zumeist über den Sinn einer Solaranlage und/oder über zusätzliche Kollektorflächen zu entscheiden bzw. Einbußen an Solarwärme vorherzusagen.

In Bild 138 ist ein sogenanntes Isopartendiagramm abgebildet. In einem Polarkoordinatendiagramm der Kollektorausrichtung sind Isolinien der solaren Deckungsrate eingetragen. Die Grundaussagen sind allgemeingültig, die speziellen Zahlen gelten für eine Standardanlage Phönix 3 /97/ mit folgenden Eigenschaften und Randbedingungen:

Kollektor: $A = 6 \text{ m}^2$ $k = \text{const} = 3,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\eta_{\text{opt}} = 0,78$ $b = 0$
 Speicher $V_{\text{Sp}} = 400 \text{ l}$ Verbrauch: 300 l/d bei 45 °C, Gang wie in Oederan
 Wetterdaten: Standard (Wahnsdorf 1954), anisotropes Modell, Albedo 0,2

Als optimale Ausrichtung wurde eine Neigung von 48,5 %, eine Ausrichtung 2,5 ° West bei einer Deckungsrate von 61 % bestimmt. In Entfernung von diesem Punkt nimmt die Deckungsrate ab, zunächst jedoch sehr langsam. Bei guter Südnähe sind Neigungen zwischen 15° und 75 ° zulässig, bei üblicher Neigung zwischen 30° und 60° Abweichungen der Ausrichtung zwischen 45° Ost und 60° West, also ein recht breiter Bereich.

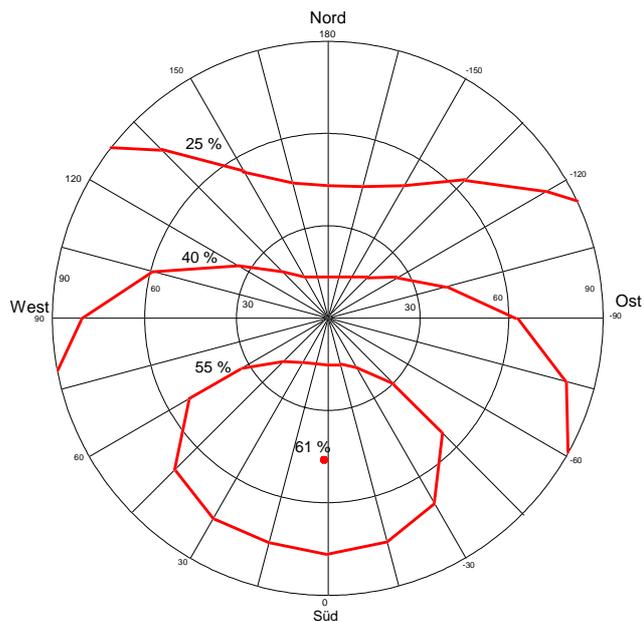


Bild 138: Isopartendiagramm für Phönix 3

Die Westrichtungen sind leicht bevorzugt, da der Warmwasserbedarf vorrangig in den Abendstunden vorliegt. Bei Häusern mit Ost-West-Ausrichtung sollten die Kollektoren auf der Westseite installiert werden, allerdings ist mit einer Verringerung der Ausbeute um mehr als 20 % rechnen. Eventuell ist ein zusätzlicher Kollektor einzubauen.

Die optimale Neigung ist keine konstante Größe, sondern von den Nutzungs- und Randbedingungen abhängig, während die optimale Richtung stets in Südnähe liegt. In Bild 139 ist die Lage und Höhe des Optimums für unterschiedlichen Bedarf dargestellt. Mit sinkendem Bedarf verschiebt sich das Optimum hin zu steileren Neigungen.

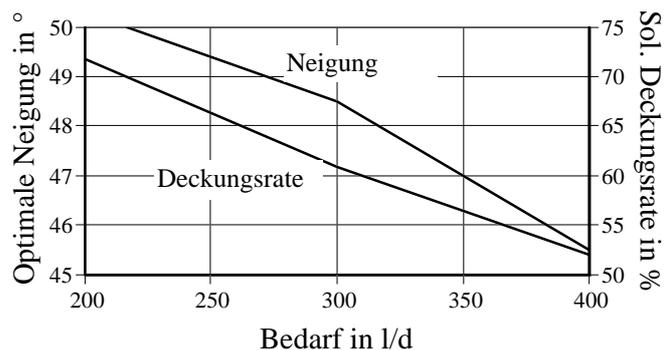


Bild 139: Einfluß des Bedarfs

Dies ergibt sich aus dem steigenden Einfluß der Wintermonate. Versucht man also durch bedarfsbezogen sehr hohe Kollektorflächen eine hohe Deckungsrate auch im Winter zu erreichen oder eine Zusatzheizung zu etablieren, sollte die Kollektorneigung höher gewählt werden.

In Bild 140 ist die optimale Neigung als Funktion des Rückstrahlungsvermögens der Umgebung dargestellt. Mit steigendem Albedo erhöht sich die optimale Neigung. Bei ganzjährig hohen Werten um 0,7 sollten die Kollektoren etwa 10° steiler gestellt werden. Denkbar ist dies bei ständiger Schneedecke, was sehr selten ist, zum Beispiel Bauden in Sommerskgebieten oder auch Hanglagen an großen Seen.

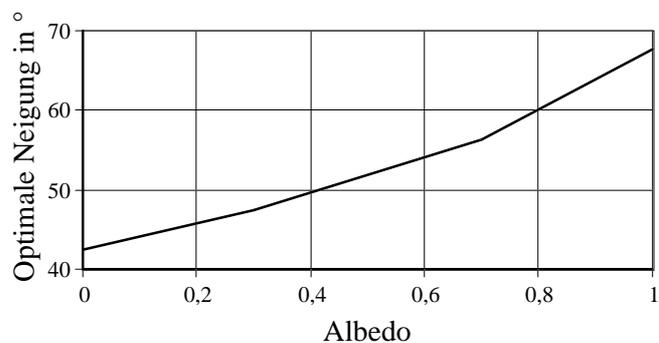


Bild 140: Einfluß des Albedos

In Bild 141 ist der Einfluß des Einstrahlungswinkelkoeffizienten dargestellt, diesmal als Funktion der Neigung. Bei dem doch sehr hohen Koeffizienten von 0,2 verschlechtert sich die Deckungsrate merklich. Das Optimum verschiebt sich jedoch nur wenig.

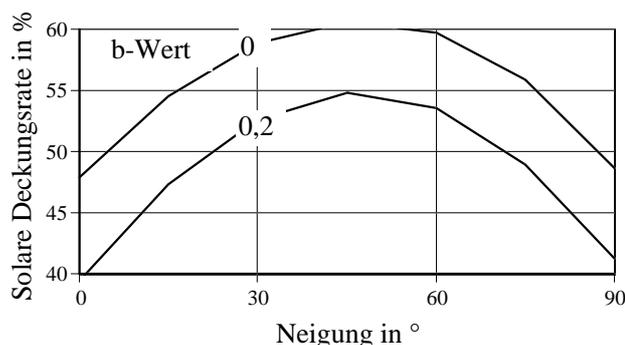


Bild 141: Einfluß des b-Wertes

4.3.3 Parametervariation

Im folgenden werden weitere Auslegungsgrößen und Randbedingungen für die Kleinanlage variiert. Da nicht alle Größen mit TRNSYS variiert werden konnten, wurde das Simulationsprogramm T°SOL verwendet. Da dieses Programm auch andere Wetterdaten verwendet, ergeben sich zum Teil andere Deckungsraten. Die Eigenschaften der Referenzanlage sind jeweils durch Graunterlegung gekennzeichnet.

Tab. 44: Var. der WÜ-Leistung

$K_{WÜ}$ in W/K	sol. DR in %
75	50,27
150	54,94
300	57,11
600	58,14

Tab. 45: Var. der Bedarfstemperatur

t_{bedarf} in °C	sol. DR in %
45	58,14
50	57,15
55	56,15
60	55,03

Tab. 46: Var. der max. Sp.- temp.

$t_{\text{sp,max}}$ in °C	sol. DR in %
60	57,35
70	58,14
80	58,27

Tab. 47: Variation der Kollektorart

Kollektorart	sol. DR in %
FK	58,14
VFK	63,21
VRK	71,01

Tab. 48: Variation der Leitungslänge

Leitungslänge	sol. DR in %
üblich	58,14
doppelt	56,62

Tab. 49: Variation des Wetters

Standort	sol. DR in %
Chemnitz	58,14
Dresden	60,82
Freiburg	70,5

Eine Halbierung der **Wärmeübertragerleistung** auf 300 W/K führt noch nicht zu einem deutlichen Ertragsverlust, bei weiteren Verringerungen sinkt die solare Deckungsrate jedoch um mehrere Prozent.

Entgegen den Erwartungen hatte die **Bedarfstemperatur** nur einen relativ geringen Einfluß auf die solare Deckungsrate. Es ist zu beachten, daß der Tabelle gleiche Bedarfswärmemengen, damit unterschiedliche Volumina zugrundeliegen.

Mit steigender **zulässiger Speichertemperatur** steigt die solare Deckungsrate an, da sich die Speicherkapazität erhöht. Aufgrund des im höheren Temperaturbereichs sehr schlechten Kollektorwirkungsgrads ist die Erhöhung nur gering. Bei überdimensionierten Solaranlagen, bei denen es zu temperaturbedingten Notabschaltungen kommt, ist der Einfluß bedeutender. Die zulässige Speichertemperatur ist vor allem von der Wasserhärte abhängig. Bei sehr hartem Wasser sind 60°C erlaubt, bei sehr weichem Wasser bis zu 80 °C.

Die **Kollektorart** ist eine sehr wichtige Einflußgröße. Sowohl mit Vakuumflachkollektoren als auch mit Vakuumröhrenkollektoren sind deutliche Steigerungen möglich. Es wird jedoch erkennbar, daß diese Verbesserungen nicht den um den Faktor 1,5 bis 3 höheren Preis rechtfertigen.

Die **Leitungslänge** erwies sich nicht als bedeutende Einflußgröße. Unter üblicher Leitungslänge wurde hierbei eine Verrohrung von 2x2 m über Dach und 2x6 m im Gebäude verstanden.

Eine Solaranlage wird wesentlich vom **Wetter** beeinflusst. Innerhalb Sachsens sind hierbei zwischen Chemnitz und Dresden nur geringe Unterschiede zu beobachten, in Freiburg kann man jedoch mit 12 % höheren Solarerträgen rechnen.

4.3.4 Der Einfluß des Volumenstroms im Kollektor

Die Höhe des Volumenstroms im Kollektorkreis hat einen großen Einfluß auf den Ertrag der Solaranlage. In der Vergangenheit wurden grundsätzlich 60 .. 120 l/hm² empfohlen. Seit 1990 ist sehr viel vom "LOW-FLOW"-Konzept die Rede, das nur noch einen Volumenstrom von 10 .. 20 l/hm² vorsieht. Die Werte scheinen sich zu widersprechen. Welcher Wert ist richtig ?

Der Volumenstrom beeinflusst den Solarertrag über zwei Effekte. Je höher der Volumenstrom, desto geringer ist die Temperaturspreizung. Das heißt die mittlere Kollektor-temperatur wird geringer und folglich der Kollektorwirkungsgrad höher. Andererseits kann nur bei niedrigen Volumenströmen eine gute Schichtung bei der Speicherbeladung erzielt werden, was sich auf den Systemwirkungsgrad positiv auswirkt. Je nach Anlagenaufbau sind beide Effekte von sehr unterschiedlicher Bedeutung, was auch zu verschiedenen optimalen Volumenströmen führt.

Der Speicher einer Solaranlage kann zum einen mit einem innenliegenden (internen) oder außenliegenden (externen) Wärmeübertrager ausgestattet sein. Weiterhin kann der Speicher konventioneller Natur sein oder ein Schichtbeladerohr aufweisen. Dabei handelt es sich um ein Rohr mit Membranklappen, welche dafür sorgen, daß das von der Wärmequelle kommende Fluid stets in die richtige Speicherschicht eingespeist wird.

In Tabelle 50 sind die solaren Deckungsraten für die Kleinanlage bei unterschiedlichem Anlagenaufbau und Volumenströmen aufgeführt.

Tabelle 50: Solare Deckungsrate in Abhängigkeit von Speicher- und Wärmeübertragerart

V _{Koll} in l/hm ²	konventioneller Speicher		Schichtenspeicher	
	interner WÜ	externer WÜ	interner WÜ	externer WÜ
10	45,69	60,55	50,94	60,44
15	51,3	60,55	57,53	61,5
20	54,11	60,44	59,99	62,14
40	58,14	59,5	60,93	61,38
80	59,45	58,52	60,57	59

In Bild 142 ist die Abhängigkeit der solaren Deckungsrate graphisch dargestellt. Beim konventionellen Speicher mit internem Wärmeübertrager ist der Wärmeübertrager vollständig von Wasser umgeben, das eine Temperatur unterhalb der Kollektoreintrittstemperatur hat.

Die Kollektorausstrittstemperatur sollte nicht wesentlich größer sein, da dann nur die Kollektorverluste höher, nicht aber die Beladung des Speichers besser wird. Aus diesem Grund steigt die solare Deckungsrate mit dem Volumenstrom kontinuierlich an. Der Erhöhung des Volumenstroms sind jedoch Grenzen in der Rohrdimensionierung und dem Pumpstromverbrauch gesetzt. Praktisch eingesetzt werden Volumenströme von 30 .. 120 l/hm².

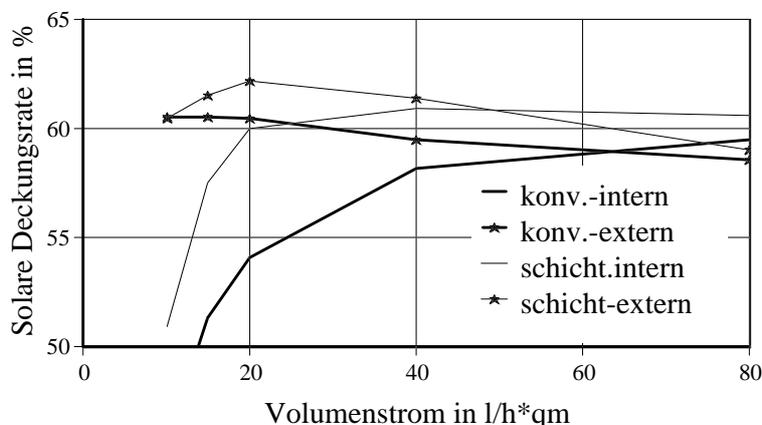


Bild 142: Variation von Speicher- und Wärmeübertragerart

Bei Einsatz eines externen Wärmeübertragers erhöht sich bei steigender Kollektorausstrittstemperatur auch die Speicherzulaufstemperatur. Das heißt, es ergibt sich sofort nach Anlaufen der Solaranlage eine bedarfsgerechte Schichtung. Somit sinkt die solare Deckungsrate mit steigendem Durchfluß leicht ab. Übliche Volumenströme liegen zwischen 10 und 30 l/hm².

Ein konventioneller Speicher hat den Nachteil, daß durch die bei Strahlungsschwankungen wechselnde Kollektorausstrittstemperatur die Speicherschichtung gestört wird. Hingegen erfolgt bei einem Speicher mit Schichtbeladerrohr die Einspeisung in die richtige Speicherschicht ohne Störung der Schichtung. Im Ergebnis kann die solare Deckungsrate um weitere 2 % erhöht werden. Das Optimum des Durchflusses ist gut ausgeprägt und liegt bei 20 l/hm².

Aus Kostengründen sollten außenliegende Wärmeübertrager nur bei größeren Anlagen eingesetzt werden. Um die Speicherbeladung bei Kleinanlagen zu verbessern, werden auch Speicher mit innenliegendem Wärmeübertrager mit Schichtbeladerrohr angeboten. Durch den Wassertransport über freie Konvektion sind nicht so gute Temperaturverhältnisse wie beim außenliegenden Wärmeübertrager möglich, die Deckungsraten sind aber deutlich höher als beim innenliegenden Wärmeübertrager ohne Schichtbeladerrohr. Der Volumenstrom sollte bei 20 .. 40 l/hm² liegen.

Eine weitere Erhöhung der Deckungsrate kann durch eine Variation des Volumenstroms erzielt werden. Hierbei sind mehrere Konzepte denkbar. Der Volumenstrom kann bei steigender Einstrahlung erhöht werden oder bei steigender Temperatur im Speicher. Ebenso kann er auch von beiden Größen abhängig sein.

Die Berechnung solcher Systeme ist nur mit TRNSYS möglich, so daß nur eine Variante mit konventionellem Speicher betrachtet wurde. Eine Drehzahlregelung der Pumpe scheint nur bei Großanlagen wirtschaftlich zu sein. Aus diesen Gründen erfolgte die Untersuchung für eine Großanlage, wie sie in Oederan realisiert wurde. Die Ergebnisse sind in Bild 143 abgebildet.

Die einfachste Variante ist eine Regelung nach der Einstrahlung. Dies ist ohne Regelorgane möglich. Als Pumpen in Kollektor- und Pufferspeicherbeladekreis werden 12-V-Systeme eingesetzt, die von Photovoltaikmodulen versorgt werden, welche in Kollektorebene angeordnet sind. Die notwendige Fläche ist gering, zumal der Wirkungsgrad von Gleichstrommotoren höher als bei den sonst eingesetzten Spaltpol- oder Kondensatorhilfsmotoren zu erwarten ist. Es kommt also nur zu geringen Zusatzkosten.

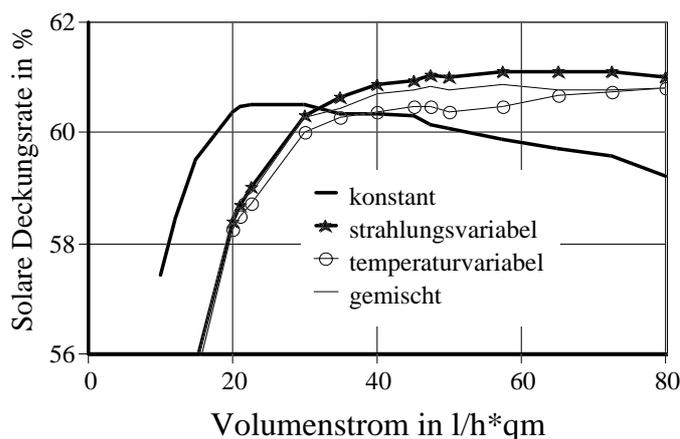


Bild 143: Variabler Volumenstrom

Ein weiterer Vorteil ist, daß die Vorregelung mit einem Halbleiterstrahlungsgeber entfallen kann. Unbedingt notwendig ist bei diesem System die Angleichung der Strom-Spannungskennlinien von Pumpe und Photovoltaik mittels eines Anpassungswandlers.

In erster Näherung wird vorausgesetzt, daß der Volumenstrom direkt proportional zur Einstrahlung ist. In Bild 143 ist erkennbar, daß sich auch hier ein Optimum herausbildet, bei dem eine 0,5 % höhere Solarwärme als im Optimum der Konstantregelung erreicht wird. Das Optimum liegt deutlich höher, bei etwa 55 l/hm². Dieser Wert ist jedoch auf eine Einstrahlung von 1000 W/m² bezogen, liegt also nur sehr selten vor. Die Erhöhung des Ertrags ist relativ gering. Es darf aber nicht nur die thermische Seite betrachtet werden, sondern es muß auch an den Strombedarf gedacht werden. Der Strombedarf der momentan eingesetzten Wechselstrompumpen ist unbefriedigend hoch (siehe Kap. 4.2).

Ein anderes Konzept ist die Abhängigkeit des Volumenstroms von der Temperatur in der obersten Speicherschicht. Bei niedrigen Temperaturen sollen geringe Volumenströme realisiert werden, um die Temperatur in dieser Schicht schnell auf die Bedarfstemperatur zu heben. Bei hohen Temperaturen soll der Volumenstrom hoch sein, um eine vollständige Durchmischung zu erreichen. Wie im Bild 143 erkennbar, sind damit nur geringe Verbesserungen möglich. Auch die Kombination von Strahlungs- und Temperaturführung ist nicht sinnvoll. Die Solarwärme ist geringer als bei reiner Temperaturführung. Da die Realisierung der temperaturgeführten Regelung zudem aufwendig ist, sollte sie nicht eingesetzt werden.