

## **Kostensenkungspotenziale von Systemoptimierungen**

Michael Krause, Klaus Vajen

Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik

Kurt-Wolter-Str. 3, D-34125 Kassel

Tel.: (0049-561) 804-3891 , Fax: (0049-561) 804-3993

E-Mail: solar@uni-kassel.de

Internet: <http://www.uni-kassel.de/~solar>

Andreas Knoch

Fa. Wagner&Co Solartechnik

Ringstr. 14, D-35019 Cölbe

Tel.: (0049-6421) 8007-0 , Fax: (0049-6421) 8007-322

E-Mail: andreas.knoch@wagner-solartechnik.de

Internet: <http://www.wagner-solartechnik.de>

### **Abstract**

The paper is dealing with numerical optimisations in combination with dynamic system simulations of large solar thermal systems, which are installed at hospitals and student houses. The optimisations took place in different stages: During the planning process, once after one year operation experience and daily under consideration of weather and hot water consumption forecasts. For each stage optimisation potentials as well as reliable optimisation algorithms have been identified. It has been found out that with the proposed optimisation concept, a distinct reduction of the solar heat cost of about 15 % could be achieved. This reduction is mainly based on an increase of the UA-value of the solar heat exchanger and a decrease of the flow rates in the solar circuit.

### **1. Motivation und Fragestellungen**

Große solarintegrierte Wärmeversorgungsanlagen mit über 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche, vgl. Abb. 1, sind aufgrund der Vielzahl installierter Komponenten, zeitvariabler Wetter- und Verbrauchsrandbedingungen, der daraus resultierenden Betriebsdynamik und notwendiger Speicherprozesse in ihrem Verhalten

hochkomplex. Um einen optimalen Betrieb solcher Systeme zu gewährleisten müssen daher viele miteinander korrelierte Parameter optimal an die jeweiligen Betriebsrandbedingungen angepasst werden. Diese Anpassung kann in drei Stufen zu jeweils unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen:

In der Planungsphase sollte das System und alle Komponenten auf die örtlichen Gegebenheiten optimiert werden. Nach ca. einem Jahr Betriebserfahrungen kann eine Anpassung der in diesem Stadium noch veränderlichen Anlagenparameter an von den Planungsannahmen abweichende Einstrahlungs- und Verbrauchsbedingungen erfolgen. Bei hohen Sensitivitäten des Systemverhaltens auf die Einstrahlungs- und Verbrauchsbedingungen könnte zusätzlich mit Hilfe von Wetter- und Verbrauchsvorhersagen z.B. täglich eine dynamische Optimierung von automatisch einstellbaren Regelparametern durchgeführt werden.

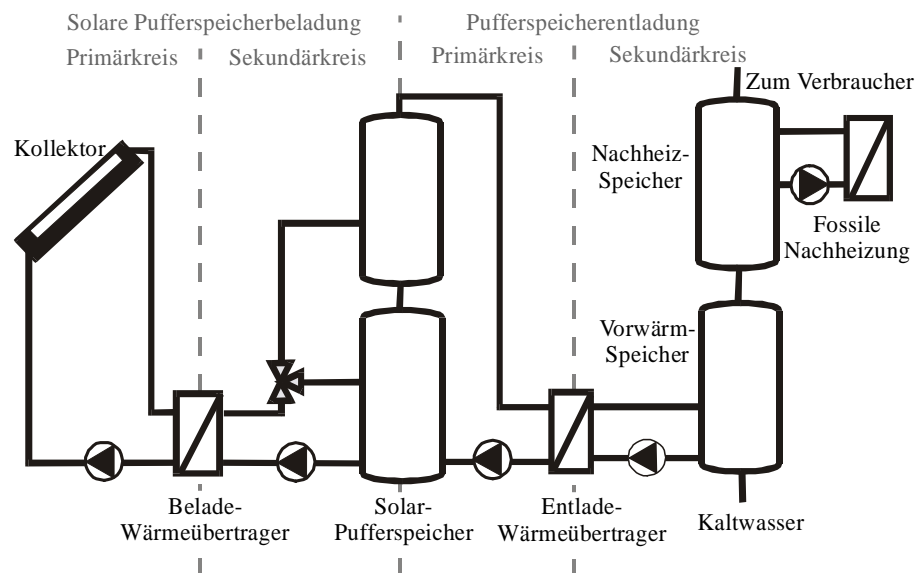


Abb. 1: Vereinfachtes Prinzipschaltbild einer großen solarintegrierten Wärmeversorgungsanlage, hier am Beispiel eines Systems mit Vorwärm-Speicher. Die vom Flachkollektorfeld gewonnene thermische Energie wird dem Pufferspeicher über einen externen Wärmeübertrager wahlweise in verschiedenen Schichten zugeführt.

Bei bisherigen Untersuchungen wurden lediglich exemplarisch die Einflüsse einiger Parameter mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen untersucht, wobei gegenseitige Korrelationen unberücksichtigt blieben, vgl. z.B. [1]. Wie groß die Optimierungspotenziale zu den einzelnen Zeitpunkten bezüglich z.B. einer Senkung des solaren Wärmepreises oder einer Erhöhung des solaren Nutzertrags tatsächlichen sind und

ob bisherige Planungsrichtlinien auch wirklich zu optimalen Parameterwerten führen, kann allein mit solchen Sensitivitätsanalysen nicht ermittelt werden. Hierfür bietet sich die Verwendung von mathematischen Optimierungsalgorithmen an, die z.B. entsprechend Abb. 2 mit dynamischen Systemsimulationen gekoppelt werden können. Hierfür wurde in der Programmiersprache Visual C++ ein Optimierungstool entwickelt, in dem sieben verschiedene Algorithmen implementiert sind. Hierbei handelt es sich um zwei Gradientenverfahren, das Powell-Verfahren, den Simplex-Algorithmus, den Algorithmus der Simulierten Abkühlung, die alle [2] entnommen sind, und zwei evolutionäre Algorithmen (Evolutionsstrategie, Genetischer Algorithmus) [3]. Untersucht wurde u.a., welche dieser Algorithmen sich bei der Anwendung auf die verschiedenen Stufen besonders eignen und zu welchen Zeitpunkten eine Optimierung sinnvoll ist.

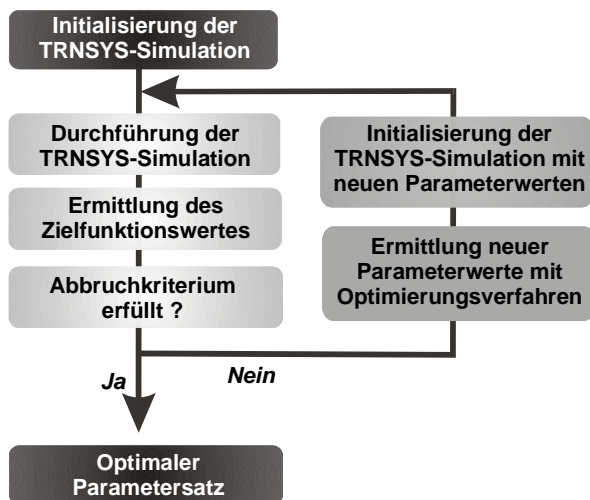


Abb. 2: Ablauf einer simulationsgestützten Optimierung mit TRNSYS und einem beliebigen Optimierungsverfahren. Unter der Zielfunktion versteht man die Funktion, deren Ergebnis optimiert werden soll. Dies kann je nach Problem z.B. der Solarertrag, die fossile Nachheizenergie oder der solare Wärmepreis sein.

### 3. Durchgeführte Untersuchungen

Zur Klärung obiger Fragestellungen wurden drei unterschiedliche Systeme betrachtet. Hierbei handelt es sich um ein an einem Krankenhaus in Frankfurt/Main installiertes Vorwärmpeichersystem und um zwei Direktdurchlaufsysteme, welche sich an einem weiteren Krankenhaus in Frankfurt/Main und an einem Studierendenwohnheim in Zwickau befinden. Diese Systeme wurden in der Simulationsumgebung TRNSYS derart abgebildet, dass je nach Systemverschaltung Jahressimulationen mit Zeitschrittweiten von 6 bzw. 7.5 Minuten werden konnten. Bei den Betriebsoptimierungen wurde auf die an den jeweiligen Anlagen gemessenen

Verbrauchsprofile zurückgegriffen, für das Planungsstadium wurden entsprechend den ursprünglichen Planungsannahmen aus gemessenen Tagesverteilungen Verbrauchsprofile für Krankenhäuser generiert. Während des Betriebes wurde der elektrische Hilfsenergieaufwand aufgrund der hydraulischen Verschaltung und verwendeten Volumenströme primärenergetisch, im Planungsstadium bei der Berechnung der laufenden Betriebskosten berücksichtigt.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag nun auf der Ermittlung der Optimierungspotenziale für die drei o.g. Optimierungsstufen sowie auf dem Vergleich der sieben im Optimierungstool implementierten Algorithmen. Je nach Optimierungsstufe wurden zwischen 7 und 17 Parameter, wie z.B. Volumenströme, Pufferspeichervolumen und UA-Werte der Wärmeübertrager, variiert. Die Kollektorfläche wurde jedoch festgehalten.

#### **4. Ergebnisse**

Abb. 3 verdeutlicht die Entwicklung der solaren Wärmekosten bei der Anwendung von fünf verschiedenen Optimierungsalgorithmen auf das Solarsystem der Maingau Klinik in Frankfurt/Main. Zu erkennen ist, dass evolutionäre Algorithmen im Planungsstadium, in dem eine große Anzahl von Parametern festgelegt werden müssen, deutlich zuverlässiger arbeiten als nicht-stochastische Verfahren. Letztere konvergieren zwar schnell, erreichen dann oftmals aber nur lokale Minima der Zielfunktion, in diesem Fall die solaren Wärmekosten.

Verglichen mit den geschätzten Wärmekosten der beiden an Krankenhäusern real installierten Systeme führten die mit Optimierungsrechnungen ermittelten Systemauslegungen mit 14 und 16 % zu überraschend großen Kostensenkungspotenzialen im Planungsstadium. Im Vergleich zu den bisher üblichen Auslegungsrichtwerten ergab sich, dass bei großen Solarsystemen die Volumenströme deutlich kleiner und die Wärmeübertrager deutlich größer dimensioniert werden sollten, vgl. Tab. 1 und [4].

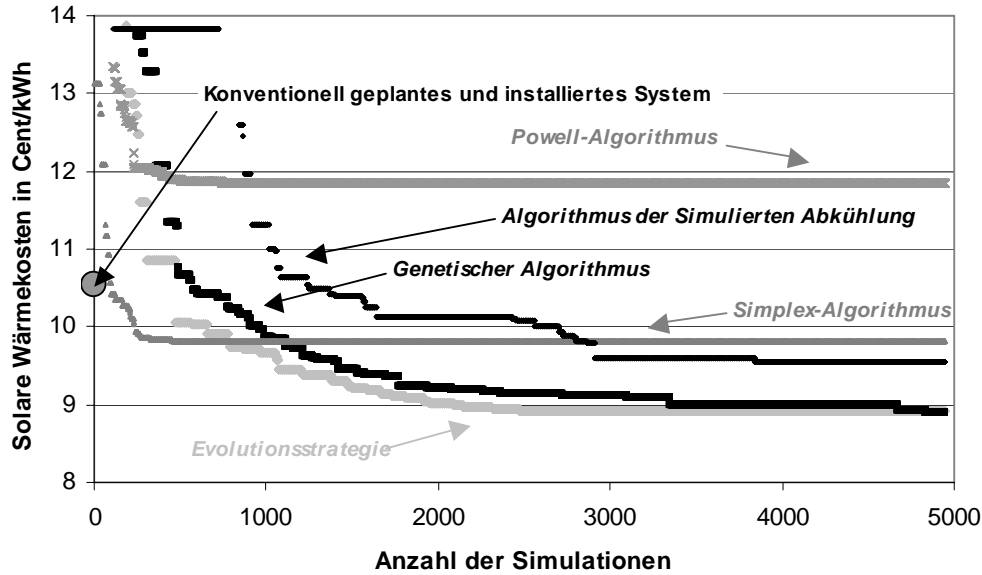


Abb. 3: Entwicklung der solaren Wärmekosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Simulationen für verschiedene Optimierungsalgorithmen während einer nachträglich durchgeführten Planungsoptimierung der solaren Wärmeversorgungsanlage der Maingau-Klinik in Frankfurt. Dargestellt sind aus Gründen der Übersichtlichkeit für jeden Algorithmus nicht die Zielfunktionswerte aller getesteter Parametervektoren im Optimierungsverlauf, sondern nur diejenigen, die nach der entsprechenden Anzahl von Simulationen die jeweils besten Zielfunktionswerte aller bis dahin getesteten Parametervektoren aufwiesen. Der graue Wert auf der Ordinatenachse repräsentiert die geschätzten solaren Wärmekosten für das auf konventionelle Art und Weise geplante und so auch installierte System. Anhand dieses Wertes wurde ein Optimierungspotenzial von 16 % identifiziert.

	Direktdurchlauf (150 m <sup>2</sup> )		Vorwärm Speicher (240 m <sup>2</sup> )	
	Installiert	Optimiert	Installiert	Optimiert
Solarer Wärmepreis in Cent/kWh	10.5	8.8	9.1	7.8
Solarvolumenstrom im Primärkreis in Liter/m <sup>2</sup> h	13	8	12	10
UA-Wert des Solarkreiswärmeübertragers in W/m <sup>2</sup> K	74.2	140	70.8	140
Rohrdurchmesser der primären Solarkreisleitung in mm	40	25	32	32
Pufferspeichervolumen in m <sup>3</sup>	4	4	9	6

Tab. 1: Vergleich ausgewählter Parameter vor und nach der Optimierung von zwei der untersuchten Systeme, wobei die Kollektorflächen auf die jeweils installierten Werte gesetzt und nicht mit optimiert wurden. Für die Berechnungen wurde ein Genetischer Optimierungsalgorithmus eingesetzt.

Bei der Interpretation der Potenziale muss allerdings beachtet werden, dass nicht vollständig sichergestellt werden konnte, dass für alle Komponenten bei der ursprünglichen Anlagenplanung und bei der Optimierung identische Kostenfunktionen verwendet wurden. Darüber hinaus waren die Simulationsschritt-

weite und die Auflösung speziell der Verbrauchsdaten relativ ungenau, so dass die Bestimmung z.B. von Regelungsparametern mit Unsicherheiten behaftet sind.

Während des Betriebs ergaben sich dagegen völlig andere Tendenzen. Hier zeigten nicht-stochastische Verfahren aufgrund einer reduzierten Anzahl freier Parameter ein deutlich besseres Verhalten, die Optimierungspotenziale waren aber insbesondere bei einer z.B. täglichen Anpassung der Reglerparameter selbst bei sehr genauen Wetter- und Verbrauchsvorhersagen nur vernachlässigbar gering.

#### **4. Ausblick**

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen ergaben sich für große solarintegrierte Wärmeversorgungsanlagen überraschend große Kostensenkungspotentiale, so dass für besonders einflussreiche Parameter neue Dimensionierungsempfehlungen ermittelt werden konnten. Speziell für Direktdurchlaufsysteme sollten die Ergebnisse aber mit einer höheren Simulationsgenauigkeit nochmals untersucht werden. Die im Rahmen des Solarthermie-2000-Programms gesammelten Daten bieten darüber hinaus eine hervorragende Grundlage, um mit Hilfe von Optimierungsrechnungen für verschiedene Systemvarianten, Standorte und Verbrauchsprofile überarbeitete Planungsrichtlinien erstellen zu können.

Aufgrund der Universalität der Optimierungsmethode sollte diese aber auch bei anderen Solarsystemtypen eingesetzt werden, um auch für diese weitere Kostensenkungspotenziale identifizieren und erschließen zu können. Weitere sinnvolle Einsatzbereiche wären die Komponentenentwicklung, insbesondere aber auch Systemuntersuchungen unter Einbeziehung der fossilen Nachheizung, der übrigen Haustechnik sowie auch des Gebäudes.

- [1] Bine Informationsdienst: *Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung*, Themen Info III/02, Karlsruhe, 2002.
- [2] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P.: *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [3] Bäck, T.: *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, 1996.
- [4] Krause, M.: *Optimierungskonzept für große solarintegrierte Wärmeversorgungsanlagen*, Dissertation Fachbereich Maschinenbau, Universität Kassel, 2003.

Die Autoren bedanken sich bei der Rudolf-Otto-Meier Umweltstiftung, deren finanzielle Unterstützung die Durchführung der Arbeiten ermöglichte, sowie bei Thomas Freitag und Jens Göring von der TU-Chemnitz für die Überlassung von an der Solaranlage des Studierendenwohnheims in Zwickau gemessenen Daten.