Ganzheitliche Kostenoptimierung solarthermischer Systeme für Hersteller und Entwickler mittels Simulation

J. Koke, M. Kuhr, M. Althoff; U. Clement*), M. Köhler**), H. Bödeker***)
Hochschule Osnabrück, Campus Lingen
Kaiserstr. 10c
49809 Lingen (Ems)
Tel.: 0591-800 98-730
Email: j.koke@hs-osnabrueck.de
*) Bosch Solarthermie GmbH;**) Bosch Thermotechnik GmbH;***) Bosch Sensortec GmbH

Einleitung

Die Kostenreduzierung solarthermischer Systeme bleibt eine der großen Herausforderungen, um die Solarthermie wirtschaftlich attraktiv zu machen. In der vorliegenden Arbeit wurde eine vollständige Simulationsumgebung geschaffen, mit der bereits in der Entwicklungsphase automatisierte Optimierungen in Bezug auf Ertrag und Wirtschaftlichkeit von Kollektoren und Systemen zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung möglich sind. Die Anwendung dieses Simulationstools ist sowohl für den Komponentenhersteller als auch für den Systemplaner relevant:

Nutzen für Hersteller:

- Entwicklung wirtschaftlich attraktiver Kollektoren: „Kostenreduktion bei gleichem Ertrag“
- Temperaturhistogramm als Tool für eine robusten Konstruktion/Auslegung.

Nutzen für Planer:

- Automatisierte Festlegung des passenden Systems zum kostenoptimierten Kollektor (Speicher, Massenstrom, Feldgröße).

Methodik

Im Zentrum der Entwicklung steht ein Kollektortool auf Matlab®-Basis, das mit einem numerischen Optimierer sowie einem Jahressimulationstool, hier Polysun®, gekoppelt wird (Abb. 1). Der Kollektor wird als ein thermisches Netzwerk modelliert, in dem alle wesentlichen Komponenten, Randbedingungen und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Dadurch können Kollektorkennlinien und -kosten in Abhängigkeit einer Vielzahl von Konstruktionsparametern in sekundenschelle berechnet werden. Das Modell wurde mit realen Kollektorkennlinien validiert.

Die Übergabe der ermittelten Kennlinienparameter an Polysun® ermöglicht direkt im Anschluss die Berechnung des zu erwartenden solaren Jahresertrages sowie der spezifischen solaren Gestehungskosten. Schließlich kann dieses Simulationssystem über einen Optimierer gesteuert werden, sodass automatisch optimale Parameterkonfigurationen für die Kollektorkonstruktion sowie für das Gesamtsystem unter der Maßgabe

minimaler solarer Gestehungskosten ermittelt werden können. Dabei werden bis zu 140 Kollektorparameter inklusive Material- und Bauteilkosten sowie die einschlägigen Systemparameter wie Kollektorfläche und Speichervolumen berücksichtigt.

Knotenmodell eines Solarkollektors

Zunächst wurde für einen typischen Solarkollektor ein thermisches Knotenmodell (Abb. 2) erarbeitet. Dabei wurde jedes relevante Bauteil als thermischer Massenpunkt bzw. Knoten modelliert. Alle Knoten sind untereinander über die Wärmeübertragungsgleichungen für Leitung, Konvektion und Strahlung vernetzt. Die Wärmeübertragungsmechanismen wurden für jede Verbindung analysiert und formell beschrieben. Die thermischen Parameter wurden individuell bestimmt und in der Regel der einschlägigen Fachliteratur entnommen. Speziell für die Wärmeübertragung zwischen Absorber und transparenter Abdeckung wurde mit Hilfe von Strömungssimulationen (CFD) ein spezifischer formelmäßiger Zusammenhang entwickelt.

Das resultierende Gleichungssystem wird mit Matlab® für vorgegebene Randbedingungen (Einstrahlung, Umgebungstemperatur, Rücklauftemperatur) gelöst, sodass für jeden Knoten numerische Lösungen für die Weiterverarbeitung generiert werden. Abschließend werden die Parameter der Kollektorkennlinie durch einen Kurvenfit ermittelt. Im vorliegenden Fall konnte die Kennlinie für einen Referenzkollektor in sehr guter Übereinstimmung mit gemessenen Werten wiedergegeben werden (Abb. 3).

Das vorliegende Kollektormodell berücksichtigt zehn Knoten, ist aber grundsätzlich beliebig erweiterbar.

Abb.1: Simulationssystem: Kopplung zwischen den Modulen Kollektorsimulation, Systemsimulation, Kostenberechnung und Optimierung

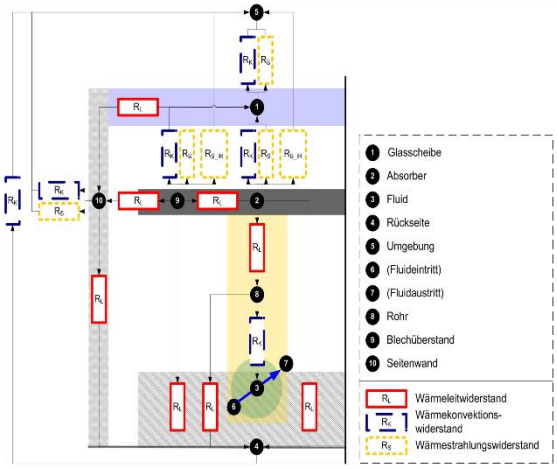

Abb.2: Thermisches Knotenmodell mit zehn Berechnungspunkten und eingetragenen thermischen Widerständen

Systemsimulation mit dem Planungstool Polysun®

Für die Systemsimulation wurde die Software Polysun® als etabliertes Planungstool gewählt. Es wurde eine Schnittstelle geschaffen, über die die mit dem Matlab-Tool ermittelten Kollektor-Parameter automatisiert an Polysun übergeben werden können. Mit Polysun® können beliebige Parameter- oder Sensitivitätstudien durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden an Matlab®-Tool für die weitere Auswertung zurückübergeben.

Im vorliegenden Fall wird ein Wohnhaus für eine sechsköpfige Familie mit Heizungsunterstützung betrachtet (Abb. 4). Das System besteht aus einem Pufferspeicher mit Frischwasserstation. Der Wärmeverbrauch des Gebäudes wurde an Anforderungen der Energieeinsparverordnung EnEV2016 /1/ angepasst. Das Zapfprofil orientiert sich an dem Referenzprofil der VDI 6002 /2/.

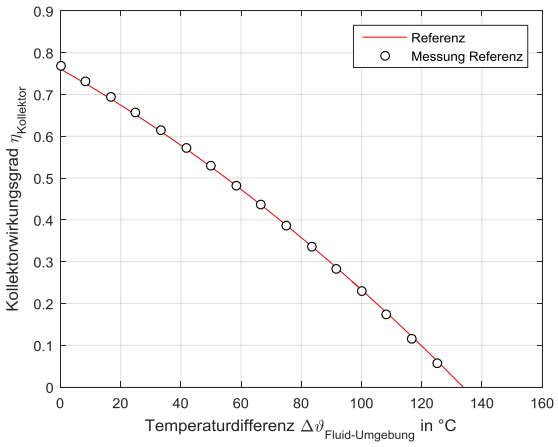

Abb.3: Kollektorkennlinie des Referenzkollektors im Vergleich mit der simulierten Kennlinie.

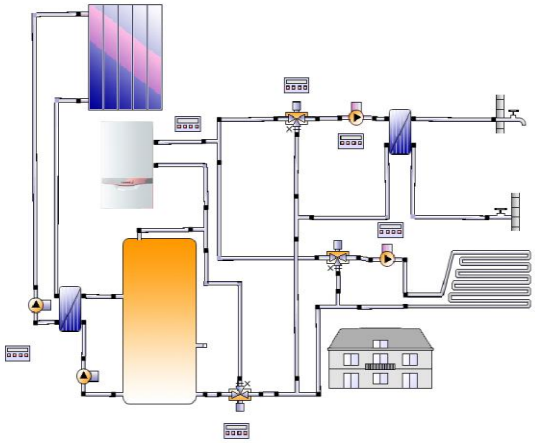

Abb.4: Systemmodell in Polysun: Pufferspeicher mit Frischwasserstation, Gastherme und Gebäude nach EnEV2016

Simulationsablauf

Der gesamte Simulationsablauf wird durch eine Matlab-Routine gesteuert. Im Wesentlichen laufen die folgenden Schritte bei einer typischen Simulation mit Optimierung ab:

1. Vorgabe von Rand- und Anfangsbedingungen
2. Berechnung der Kollektorparameter
3. Einlesen der Polysun®-Standard-Eingangsparameter in den Workspace
4. Modifikation der im Workspace befindlichen Polysun®-Parameter
5. Übertragen der im Workspace befindlichen Eingangsparameter in XML-Dateien

6. Starten der Polysun-Systemsimulation durch Aufruf einer systemspezifischen Batch-Datei und warten auf das Simulationsende
7. Einlesen der Simulationserbnisse in den Matlab-Workspace
8. Übergabe von Parametern an den Optimierer und damit Festlegung neuer Simulationsparameter

Im Falle einer Systemoptimierung werden die Simulationsschritte zyklisch durchlaufen, wobei Matlab stets die Polysun Standard-Eingangsparameter variiert.

Sensitivitätsstudie der Kollektorparameter

Mit der geschaffenen Infrastruktur wurde im ersten Schritt eine Sensitivitätsanalyse für alle Konstruktionsparameter durchgeführt, bei der der Einfluss von Konstruktionsparametern auf den Kollektorwirkungsgrad untersucht wurde. Im Sinne einer Ertragsorientierung wurde speziell der Wirkungsgrad η_{40} für eine Temperaturdifferenz von ΔT = 40 K betrachtet, was einem typischen Arbeitspunkt eines Kollektors im Systemverbund darstellt. Ziel war die Erarbeitung eines reduzierten Parametersatzes. In der Abbildung ist prozentuale Änderung der relevantesten Konstruktionsparameter in Bezug auf den Referenzkollektor dargestellt (Abb. 5). Es wird hiermit das Potenzial zu leistungstechnischen Kollektorverbesserung aufgezeigt, wobei allerdings wirtschaftliche Aspekte noch unberücksichtigt sind.

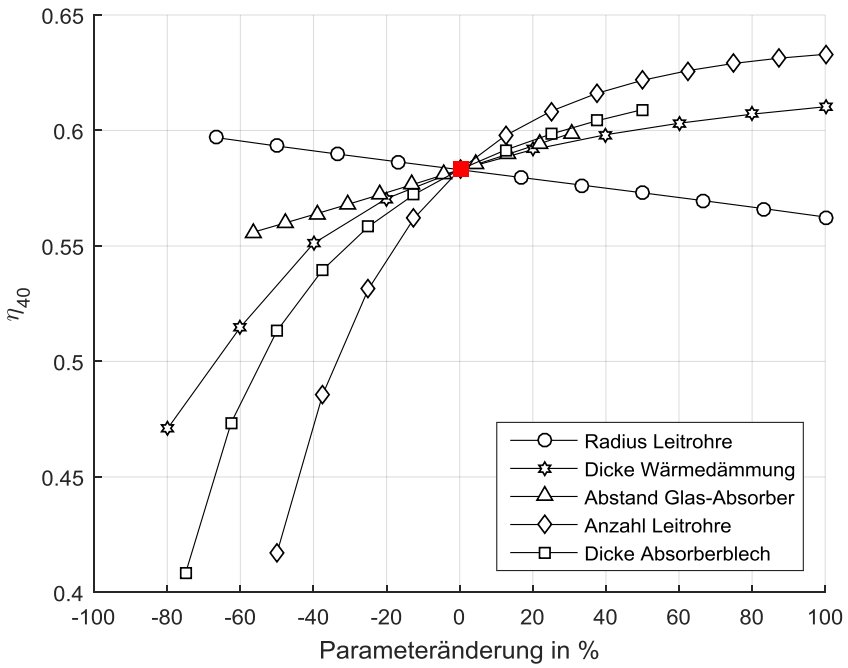

Abb. 5: Sensitivitätsstudie für die relevantesten Kollektorparameter (Radius der Leitrohre, Dicke der Wärmedämmschicht, Abstand zwischen Absorber und Glasabdeckung, Anzahl der Leitrohre und Dicke Absorberbleches)

Variantenstudie zur Ermittlung neuer Kollektoren

Nach Auswertung der Sensitivitätsanalyse wurde mit einem reduzierten Parametersatz eine Variantenstudie mit über 1000 Kollektorvariationen für den Jahresertrag eines festgelegten Systems gemäß EnEV2016 durchgeführt. Der jährliche Mehr-/Minderertrag und die Kollektorkosten wurden mit einem Referenzkollektor verglichen (Abb. 6). Aus der Grafik lassen sich aus Sicht des Herstellers nun Optimierungspotenziale ableiten:

a) eine reine Kostensenkung um 4%, ohne den Systemertrag zu reduzieren (Variante A).
b) eine primäre Verbesserung der Kollektorleistung um ca. 9% und gleichzeitiger leichter Kostensenkung um 1% (Variante B). Hier wird der Kundennutzen besonders berücksichtigt, indem die Amortisationszeit durch den höheren Systemertrag reduziert wird,

Der Vergleich der resultierenden Kollektorkennlinien zeigt, dass der leistungstechnisch optimierte Kollektor A über den gesamten Temperaturbereich verbessert wurde. Der kostentechnisch optimierte Kollektor B schneidet hingegen die Kennlinie des Referenzkollektors, d.h. bei kleinen Temperaturdifferenzen ist der Wirkungsgrad von Kollektor B geringer (Abb. 7).

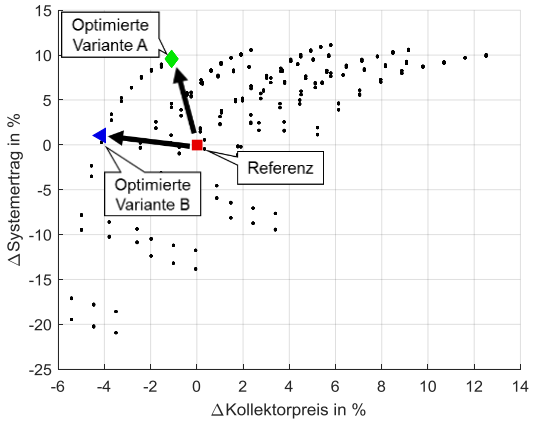

Abb.6: Variantenstudie mit 1000 Kollektorvariation für ein festgelegtes System

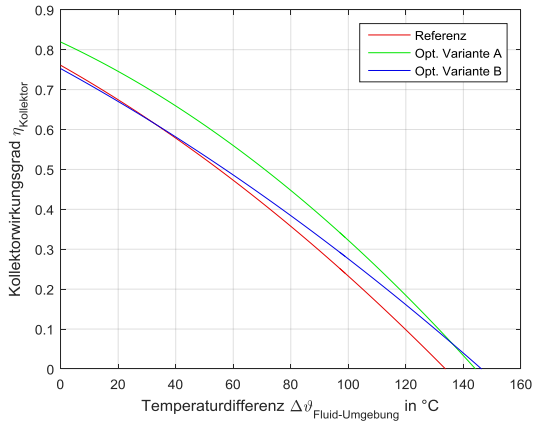

Abb.7: Kollektorkennlinien des Referenzkollektors und der optimierten Varianten A und B

Systemoptimierung

Für den Referenzkollektor sowie die beiden optimierten Varianten kann schließlich noch das kostenoptimale System durch systematische Variation von Kollektoranzahl und Speichvolumen ermittelt werden (Abb. 8). Größere Systeme führen zu etwas höheren Gestehungskosten, liefern allerdings einen größeren Jahresertrag. Es können relative Optima (verschiedene Kollektoranzahlen oder -typen.), aber auch ein absolutes Optimum ermittelt werden.

Die Systemstudie wurde sowohl für den Referenzkollektor, als auch für die beiden optimierten Kollektortypen A und B durchgeführt. Das optimale System mit den minimalen solaren Wärmegestehungskosten ergibt sich für ein Solarsystem mit zwei Kollektoren von Typ A. Der kostenoptimierte Kollektor Typ führt hingegen zu leicht höheren spezifischen solaren Gestehungskosten. Diese Tendenz lässt sich erst durch einer komplette Systemsimulation erkennen.

Histogramme

Durch die Kopplung des Kollektor- und Systemsimulation ist es möglich, für jeden Berechnungsknoten Histogramme darzustellen. Im Histogramm ist kumuliert dargestellt, wie lange eine bestimmte Temperatur im Jahresverlauf auf eine Komponente wirkt (Abb.9).

Die Ermittlung von thermischen Belastungskollektiven dient dem Entwickler als Basis für eine robuste Komponentenauslegung. Mit dieser Information können Werkstoffe ausgewählt und qualifiziert werden. Auch ist es möglich mithilfe dieser Informationen zeitgeraffte Lebensdauertests zu planen.

Für den Fall, dass der Detaillierungsgrad des Knotenmodells nicht ausreicht, ist die Erweiterung um zusätzliche thermische Knoten möglich. Eine Kopplung mit weiteren Simulationstools zur 3D Berechnung von Temperaturfeldern ist allerdings auch denkbar.

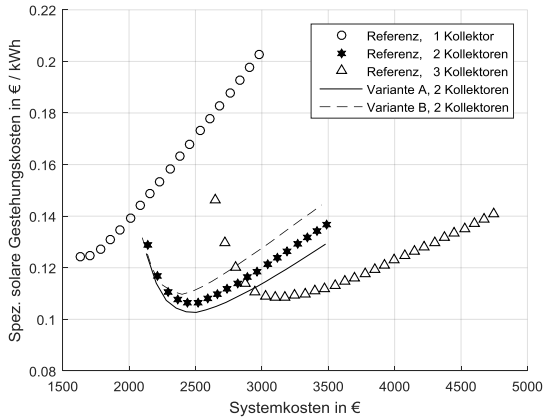

Abb. 8: Systemstudie; Variation von Kollektoranzahl, Speichervolumen und Kollektortyp

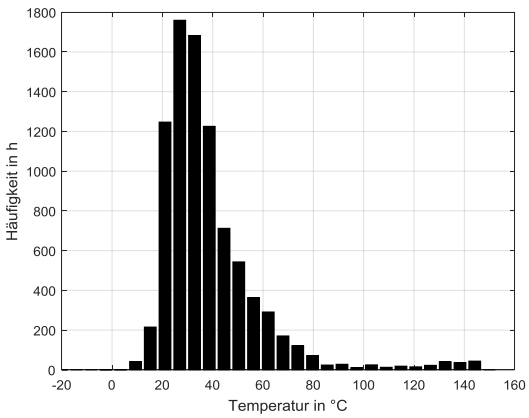

Abb. 9: Histogramm: Häufigkeitsverteilung der Absorbertemperatur

Systemvarianten

Eine typische Fragestellung des Planers ist die Auswahl des optimalen Systems für ein spezifisches Objekt mit individuellen Randbedingungen (zeitlicher Wärmebedarf, Klima, Systemeinbindung). In den Abbildungen wird dargestellt, wie mit den Simulationstools automatisch die optimale Konfiguration für unterschiedliche Verbraucher ermittelt werden kann. Hier wird ein System für einen Neubau gemäß EnEV2016 und ein System für einen Altbau mit einem vielfachen Heizwärmebedarf verglichen (Abb. 10 und 11)

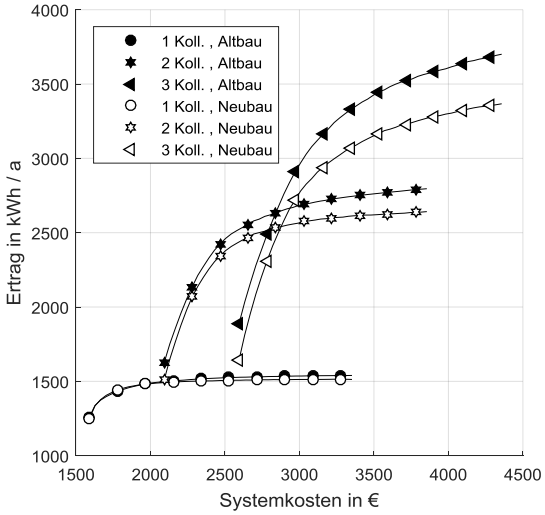

Abb. 10: Systemstudie: Jahresertrag über Systemkosten; Variation von Kollektoranzahl, Speichervolumen und Wärmesenke.

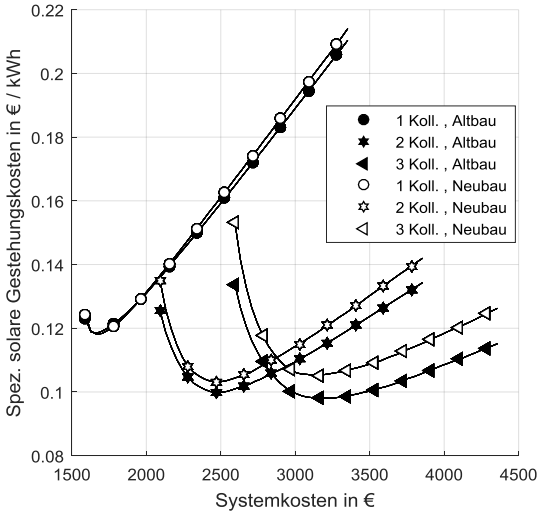

Abb. 11: Systemstudie: spezifische solare Gestehungskosten über Systemkosten; Variation von Kollektoranzahl, Speichervolumen und Wärmesenke.

Als kosteneffizientestes System ergibt sich für den Neubau ein System mit zwei Kollektoren. Beim Altbau sind die spezifischen solaren Gestehungskosten aufgrund des höheren Verbrauches geringer. Man findet ein sehr schwaches Kostenoptimum bei drei Kollektoren. Für größere Systeme steigen die spezifischen Kosten minimal.

Variation der Volumenströme

Der Einfluss des flächenbezogenen Feldvolumenstroms auf die System-Performance lässt sich einfach untersuchen, hier am Beispiel von 1-3 Kollektoren für Neu- und Altbau (Abb. 12). Niedrige Volumenströme führen zu einer hohen Temperaturspreizung und ggf. frühzeitiger Stagnation, allerdings auch geringeren Energiekosten für den Pumpenbetrieb. Hohe Volumenströme (25-40 l/h/m²) führen zu einer geringen Temperaturspreizung im Kollektor, was zu guten Kollektorwirkungsgraden und damit erhöhten Systemerträgen führt. Der optimale Volumenstrom liegt in Übereinstimmung mit gängigen Auslegungsregeln bei ca. 25 l/h/m². Eine andere Abhängigkeit vom Volumenstrom ist beim Einsatz von Schichtspeichern zu erwarten. Hier können niedrige Volumenströme vorteilhaft sein, da die Bereitschaftstemperatur früher erreicht wird /3/.

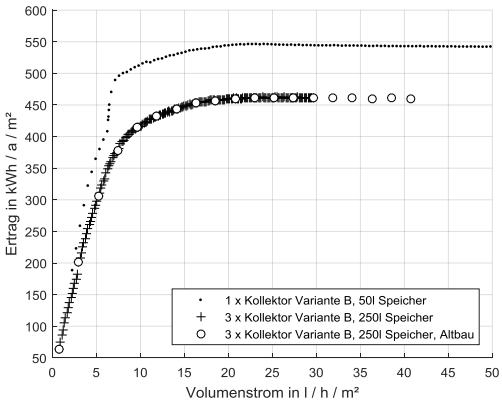

Abb. 12: Jahresertrag als Funktion des spezifischen Kollektorvolumenstroms

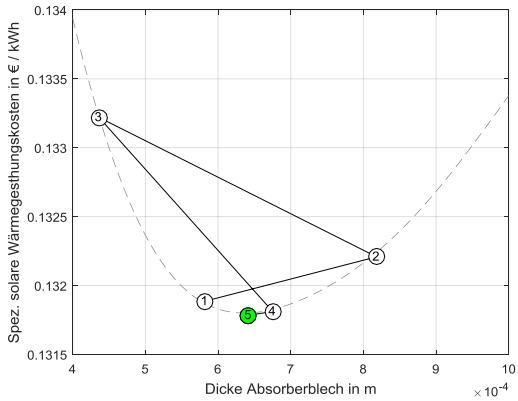

Abb. 13: Darstellung der Optimierungsschritte am Beispiel der optimalen Auslegung eines Absorberbleches: Spezifische solare Gestehungskosten als Funktion der Bechdicke.

Optimierung einzelner Konstruktionsparameter

Ein Beispiel für eine automatische Optimierung ist in Abb. 13 dargestellt. Hier wird die wirtschaftlich optimale Dicke eines Absorberbleches gesucht. Dazu werden die ertragsspezifischen Kollektorkosten als Zielgröße minimiert. In der Grafik ist erkennbar, wie der Optimierer von einem beliebigen Startwert aus ein Kostenminimum findet. Das Minimum wird bereits nach 5 Iterationen gefunden. Die gestrichelte Linie im Hintergrund stellt zur Orientierung den tatsächlichen Zusammenhang dar.

Dem Konstrukteur kann also mit Hilfe der Simulation eine eindeutige Antwort auf die häufig gestellte Frage nach der optimalen Größe gegeben werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine vollständige Simulationsumgebung geschaffen, mit der bereits in der Entwicklungsphase automatisierte Optimierungen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und Ertrag des Gesamtsystems durchgeführt werden können.

Das vollständige Potenzial des Simulationssystems erschließt sich durch die Einbindung eines automatischen Optimierers, der Konstruktions- und Systemparameter für beliebige Anwendungsfälle wie z.B. Prozesswärme oder Thermosiphonsysteme optimieren kann. Anstatt der solaren Gestehungskosten kann die Optimierung auch für andere Größen wie z.B. Amortisationszeit durchgeführt werden.

Selbstverständlich ist die Betrachtung in dem vorgestellten Modell rein thermodynamisch. Sonstige konstruktive Einflüsse z.B. der Statik und mechanischen Robustheit bleiben hier noch unberücksichtigt und bedürfen einer separaten Analyse.

Literatur

/1/ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV), Stand: 24.10.2015

/2/ VDI 6002 Blatt , Solare Trinkwassererwärmung - Allgemeine Grundlagen - Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau; 2014

/3/ John A. Duffie, William A. Beckman; Solar Engineering of Thermal Processes; Wiley, 1991

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

In Zusammenarbeit mit BOSCH

Förderkennzeichen: 0325552A und 0325552B

Notizen