

# ConCheck - Der simulationsgestützte Regelungsentwurf von Solarthermie2000 Anlagen

*Dr.-Ing. Christof Wittwer, Dipl.-Phys. Matthias Rommel, Dipl.-Ing. Konrad Lustig  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg  
christof.wittwer@ise.fhg.de*

*Seit Mai 2001 wird am Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme das im Rahmen des Forschungsprogramms "SolarThermie 2000" vom BMWi geförderte Forschungsprojekt Con-Check bearbeitet, das die Entwicklung von Regelungssystemen für die Be- und Entladeseite von großen solarthermischen Anlagen zum Ziel hat. Zielsetzung des Projekts ist der simulationsbasierte Entwurf eines optimierten Regelungssystems, das in einer speziell konfektionierten Be- bzw. Entladeeinheit das Zusammenspiel von Pumpen und Wärmetauscher mittels Regelungssystem optimieren soll. In dem Beitrag wird ein Teil der Simulationsstudien zur solaren Beladeregulation vorgestellt, die für Anlagen dieser Größenordnung derzeit eingesetzt bzw. diskutiert werden [croy00].*

**ConCheck:** Das Projekt wird in Kooperation mit dem ZfS-Hilden (Rationelle Energietechnik GmbH) durchgeführt, das für Planung und Monitoring der bereits realisierten SolarThermie-2000-Anlagen zuständig ist. Industriepartner ist neben dem Pumpenhersteller WILO GmbH auch der Regelungshersteller RESOL GmbH.

Für den simulationsbasierten Entwurf eines Regelungssystems ist zunächst die realitätsnahe Abbildung des Solarsystems als Simulationsmodell erforderlich, die durch Verifikation mit den Meßdaten herbeigeführt werden kann. Grundlage bildet der Datensatz des SolarThermie2000-Monitoringsystems [Peuss00], der ca. 50 bundesweit realisierte Solaranlagen umfaßt. Für die detaillierte Meßdatenanalyse wurde die solare Brauchwassererwärmungsanlage der Baumgartnerstrasse in München herangezogen, die über eine Kollektorfläche von ca. 110m<sup>2</sup> verfügt. Ein Pufferspeicher mit einem Volumen von 6m<sup>3</sup> wird durch den solaren Beladewärmetauscher geladen und durch den Entladewärmetauscher an ein Bereitschaftsspeichersystem mit Vorwärmespeicher gekoppelt.

**Meßdatenanalyse:** Mit Hilfe eines am Fraunhofer-ISE neu entwickelten Softwarevisualisierungstools (siehe Abb.1 Dview [otti01]) kann die komplexe Systemdynamik der Anlage mittels eines "Players" visualisiert werden, um die eingesetzten Regelungssysteme zu analysieren bzw. zu optimieren. Die Software erlaubt den Import einer Systemgraphik, die mit farblich veränderlichen Flächen die Visualisierung von Temperaturen (allg. Systemgrößen) gestattet, sowie die Darstellung von Zustandsgrößen in Diagrammen und Zahlenwerten ermöglicht. Dieses Werkzeug hat sich gerade bei der Analyse von Meß- und Simulationsdaten hervorragend bewährt, da die komplexen Schaltvorgänge und deren Reaktion auf das System hierdurch nachvollziehbar werden.

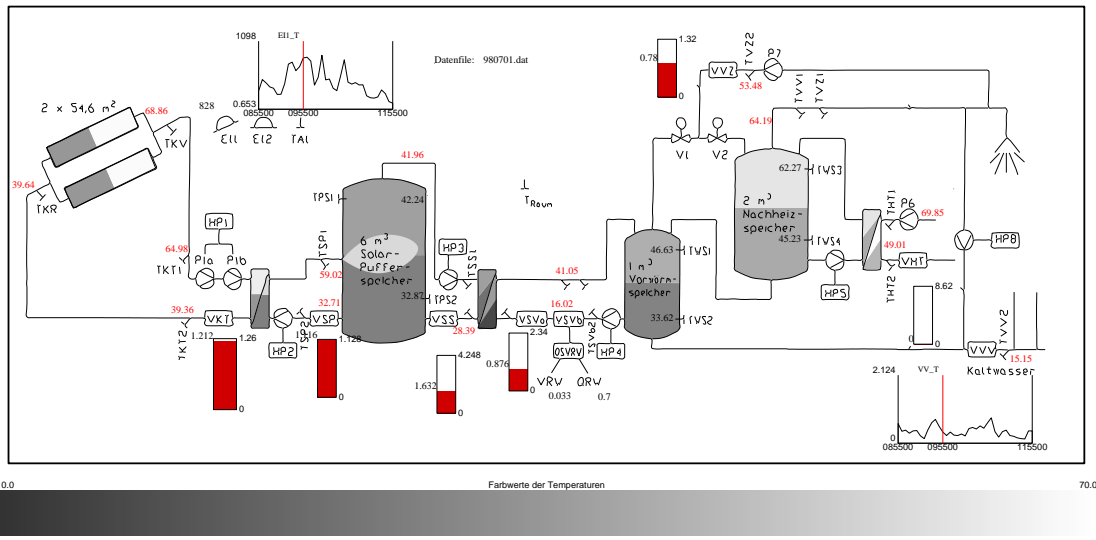


Abb. 1: "München Baumgartnerstrasse": Die Graphik zeigt einen Screenshot aus dem neu entwickelten Messwertvisualisierungstool Dview. Die Zeitreihen aus Messung und Simulation lassen sich mittels eines "Players" mit einer Trickfilmsequenz visualisieren.

**Parameteridentifikation:** Die Anlage wurde in der Simulationsumgebung *Co/Sim* mit ca. 500 Parametern abgebildet, wobei auch der Entladekreis detailliert modelliert wurde. Dem System wurden als Randbedingung Meßdaten ("Solarstrahlung, Volumenstrom KW/WW/Zirkulation, sowie die Temperaturen Außen/WW/KW/Zirk") aufgeprägt.

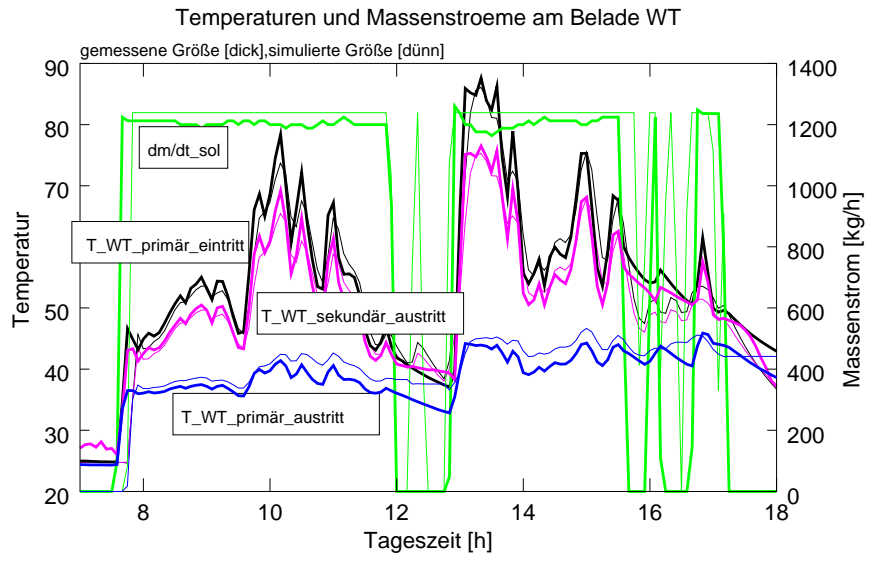


Abb.2: Vergleich eines Tagesgangs am Beladewärmetauscher aus Simulation (dünn) und Messung (dick)

Die Parameteranpassung wurde zunächst für einen sonnigen und einen wechselhaften Tag (Abb.2) durchgeführt, wobei die realen Schalthysteresen aus den Meßwerten ermittelt wurden. Ein Feinabgleich der Parameter erfolgte im Anschluß durch die Jah-

resauswertung der Energieströme. Beim Übergang auf große Verifikationszeitintervalle ist der Abgleich von Systemzustandsgrößen (z.B. Temperatur) problematisch, da bei derartigen Systemen gekoppelte dynamische Kreise auftreten, die sehr leicht "gestört" werden können. Meist wird bei ähnlichen Untersuchungen eine Verifikation eines Teilmodells durch das Aufprägen einer Führungsgröße herbeigeführt. Bei Kollektorkreisen wäre dies eine aufgeprägte Eintrittstemperatur sowie eine Massenstromvorgabe, wobei die Austrittstemperatur aus Messung und Simulation gegenübergestellt wird. Im Anlagenkontext gestaltet sich der Abgleich entsprechend schwieriger, weil die Rückkopplung von Speicher- und Entladekreis auftritt.

**Solare Beladeregulung:** Die solare Beladeregulung stellt neben der Speicherentladeregulung jenes System dar, das für den optimalen Energieeintrag zuständig ist. Unter regelungstechnischen Gesichtspunkten stellt sich die Frage, ob durch Nutzung der heute bereits eingesetzten leistungsfähigen MicroController Hardware eine Optimierung des Wärmeeintrags möglich ist. Dabei gilt es zu beachten, daß die softwaretechnische Funktionskontrolle für die Zuverlässigkeit des Systems von zentraler Bedeutung ist.

Bei großen solaren Anlagen findet heute vorwiegend die Lowflow Technik Verwendung, die mit einem einfachen 2-Punkt Regelungskonzept eingesetzt wird. Die Solarkreispumpe wird bei Überschreitung einer definierten Übertemperatur (Kollektorabsorber/Speicher unten) eingeschaltet (z.B.  $dT=8K$ ) und über ein Hystereseglied bei Unterschreiten einer parametrierbaren unteren Grenze (z.B.  $dT=3K$ ) wieder abgeschaltet.

Bei der Realisierung der SolarThermie2000 Anlagen [croy00] wurden durch die realisierten Meßdatenerfassungssysteme umfangreiche Betriebserfahrungen gesammelt, die in die ConCheck-Regelungsentwicklung einfließen sollen. Die simulationstechnische Evaluierung des realen Systemverhaltens gestattet die Quantifizierung des Ertragseinflusses einer fehlerhaften Funktion. Auch bei der als "problemfrei" geltenden Anlage München Baumgartnerstraße, die den garantierten Solarertrag erbrachte, wurden auf diese Weise folgende Funktionsfehler erkannt:

- ein fehlerhafter hydraulischer Abgleich (möglicherweise durch Verkalkung) führte im Entladekreis zu stark unterschiedlichen Massenströmen (Jahreskollektorkreisertragseinbuße ca. 4%)
- Schalthysteresen zu groß (Jahresertragseinbuße ca. 0.5%)
- ungenutzter Speicherbereich durch fehlerhafte Positionierung des Speicheraustritts
- fehlerhafte Funktionsweise der Zirkulationsumschaltung

Ein wesentliches Ziel des ConCheck Projekts ist es, dass solche Fehler, die in realisierten Anlagen immer vorkommen können, durch geeignete "intelligente" Regelungssysteme abgefangen werden.

**Simulationsvarianten zur Beladeregulung:** Innerhalb des ConCheck Projektes wurden zahlreiche Regelungsvarianten anhand der modifizierten Referenzanlage "München Baumgartnerstraße" durchgeführt. Das Referenzsystem (1) wurde bezüglich der fehlerhaften Funktionen korrigiert, um einen Ertragseinfluß bezüglich verschiedener Regelungskonzepte zu quantifizieren. Im folgenden wird ein Teil der untersuchten Systemvarianten behandelt:

- 1: Referenzanlage "München Baumgartnerstraße"
- 2: Beladung immer in den oberen Speicherbereich
- 3: Beladung immer in Höhe der Speichermitte
- 4: Primär- und Sekundärkreispumpe getrennt geregelt über Temperaturdifferenz
- 5: Primär- und Sekundärpumpe getrennt geregelt über Strahlungssensor
- 6: Pufferspeicher mit idealer Schichtladeelanze
- 7: Umschaltung der Speicherbeladung "Mitte/Oben" über 3-Wege-Ventil

Ausgehend von dem validierten Systemmodell wurden Jahressimulationsstudien dieser Beladekreisregelungen [otti97] durchgeführt, die hinsichtlich der thermischen Effizienz bewertet wurden. Abb. 3 zeigt die relativen Ertragsunterschiede im Bezug zur Referenzanlage, indem die Wärmemenge auf den Solarertrag am Beladewärmetauscher bezogen wird.

Der Kollektorkreisenertrag am Beladewärmetauscher betrug für das gerechnete Referenzsystem ca. 57075 kWh (entspricht ca. 520kWh/m<sup>2</sup>). Wie an Fall 1 in Abb.3 zu erkennen, treten hierbei ca. 5.8% Kollektorkreisleitungsverluste und ca. 2% Speicherverluste (vgl. Entladewärmetauscherertrag) auf. Bei System 2 ist die Höhe des Speichereintritts nicht im oberen Drittel angeordnet, sondern ganz oben. Die Erwärmung des oberen Speicherbereichs erfolgt damit schneller und bewirkt auch eine schnellere Aktivierung des Entladekreises und somit geringere Speicherverluste.

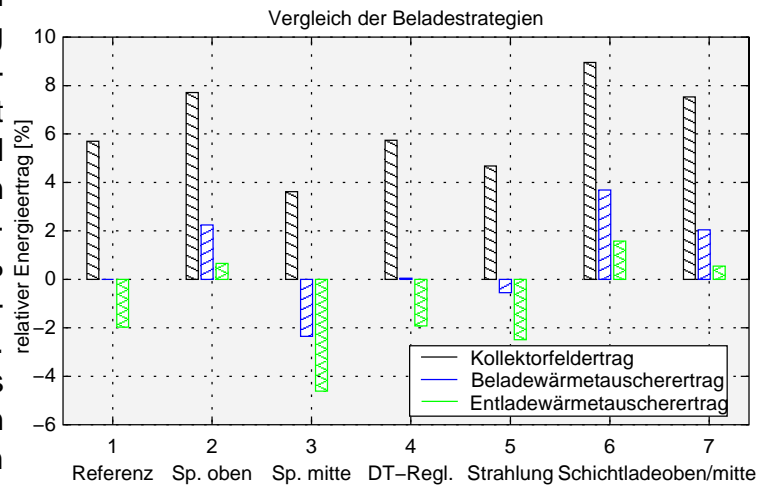


Abb.3: Simulationsergebnisse der Systemvariationen: Die prozentualen Erträge beziehen sich auf den Beladewärmetauscher des Referenzsystems

Fall 3 speist die Solarwärme in der Speichermitte ein und bewirkt damit um ca. 2% größere Speicherverluste im Vergleich zur Referenz. Systemvariante 4 regelt Primär- und Sekundärkreispumpe getrennt: Wie beim Referenzsystem wird die Primärpumpe bei einer Übertemperatur von 8K eingeschaltet, wobei die Sekundärkreispumpe über einen zusätzlichen Temperatursensor am Wärmetauschereintritt bei einer Übertemperatur von 7K hinzugeschaltet wird. Ein sekundärseitiger Wärmeentzug wird somit verhindert. Der Vergleich zur Referenz zeigt nahezu identische Wärmeströme, weil gleiche Schaltschwellen verwendet wurden und der vorzeitige Betrieb der Sekundärpumpe lediglich zu einer geringfügigen Durchmischung des Speichers führen kann. Die durch diese Technik mögliche Reduktion der

Schaltsschwellen hat einen Einfluß auf den Solarertrag von max. 0.5%.

Systemkonzept 5 nutzt einen Strahlungssensor, um die Primärpumpe bei einer Überschreitung der Strahlungsleistung von  $200\text{W/m}^2$  zu aktivieren, während die Sekundärkreispumpe gemäß Variante 4 eingeschaltet wird. Das Ausschalten beider Pumpen erfolgt bei Unterschreitung der Strahlungsleistung von  $150\text{W/m}^2$ . Im Systemvergleich zur Referenz zeigt sich, daß der Kollektorertrag um ca. 1% geringer ist und auch ein etwas geringerer Solarertrag am Beladewärmetauscher auftritt. Die in der Simulation "ideal" funktionierende Schichtladelanze aus Systemvariante 6 verhindert Durchmischungsverluste im Pufferspeicher komplett, wodurch sich auch ein relevanter thermischer Mehrertrag von knapp 4% auf der Beladeseite einstellt. Die hydraulisch geregelte "2-Punkt-Schichtung" aus System 7 schaltet über ein 3-Wegeventil bei Überschreitung der Eintrittstemperatur in Höhe der "Speichermitte" auf den oberen Speichereintritt um. Die Technik verbessert im Vergleich zur Referenz auch den Solareintrag, erreicht aber im Vergleich zum fixen Einspeisepunkt "oben" bei dieser untersuchten Anlage keine Verbesserung.

**Resumee:** Die *ColSim* Simulationsstudien zeigen die Potentiale von Regelungssystemen sowie den Einfluß von fehlerhaftem Systemverhalten bei solaren Vorwärmssystemen auf, und ermöglichen durch Implementierung der Regelungsalgorithmen im ANSI C Code die Generierung von Regelungssoftware für MicroController Regelungen. Der Entwurf eines neuartigen verbesserten Regelungskonzeptes der Beladeseite soll im weiteren Verlauf des Projekts durch ein modifiziertes adaptives 2-Punkt-Regelungskonzept implementiert werden, das über einen modellbasierten Ansatz eine Funktionskontrolle realisiert. Die Optimierung des thermischen Solareintrages ermöglicht Ertragssteigerungen im Prozentbereich. Größeres Einsparungspotential ist Bereich der Fremdenergieeinsparung zu erwarten.

Im Bereich der Entladebaugruppe spielt bei Verwendung von direktdurchströmten Wärmetauschern die Drehzahlregelung der Pumpen eine wichtigere Rolle. Im weiteren Projektverlauf von *ConCheck* wird deshalb ein simulationsbasierter Regelungsentwurf für die solare Entladegruppe durchgeführt, der durch die Vernetzung mit der Beladeregelung eine Energieflußkontrolle realisiert. Im Projekt vorgesehen ist weiterhin die simulationsbasierte Untersuchung von solaren Heizungskonzepten für große Anlagen, für die ein Standardsystem im Rahmen des SolarThermie-Programms erarbeitet werden soll.

#### Literatur:

[otti97] Wittwer C., Horlitz O., Rommel M.: Tagungsband 7. Symp. Thermische Solarenergie OTTI 1997; Untersuchungen

verschiedener Regelungskonzepte für thermische Solaranlagen mit Hilfe des modularen Simulationssystems ColSim

[otti01] Lustig K.: Tagungsband 11. Symp. Thermische Solarenergie OTTI 2001; Simulationstechnische Abbildung der Vorgänge

in einem Solarsystem während des Stillstands

[peuss00] Peuser A.: Tagungsband 10. Symp. Thermische Solarenergie OTTI 2000; Erfahrungen mit Solaranlagen zur Trink-

wassererwärmung aus Solarthermie-2000

[croy00] Croy R.: Tagungsband 10. Symp. Thermische Solarenergie OTTI 2000; Erfahrungen mit Regelungen für thermische

Solaranlagen im Programm Solarthermie-2000, TP2