

# Simulation von Öl-, Gas- und Pellet-Kessel in Kombination mit Solaranlagen

Michel Haller, Lars Konersmann\*, Angela Dröscher  
Institut für Wärmetechnik IWT, Technische Universität Graz  
Inffeldgasse 25/B, A-8010 Graz, Österreich  
+43 (316) 873 7318, fax +43 (316) 873 7305  
michel.haller@tugraz.at  
www.iwt.tugraz.at

\*SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil HSR  
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil, Schweiz

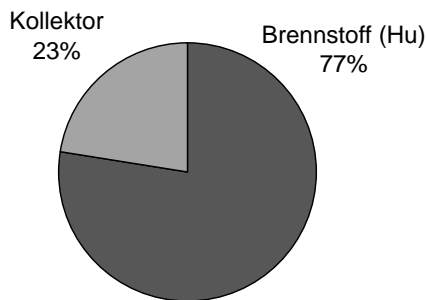
## Einleitung

Simulationen von Solarsystemen werden vielfach eingesetzt zur Voraussage der solaren Einsparung durch neue Konzepte, für Parameterstudien sowie als Planungswerkzeuge. Sowohl im akademischen Bereich wie auch im planerischen Bereich wird dabei der adäquaten Abbildung der Zusatzheizung im Modell vergleichsweise wenig Beachtung geschenkt. Dies wohl deshalb, weil das Interesse meistens primär der Leistungsfähigkeit der Solaranlage gilt. In einem Solarsystem für Raumheizung und Warmwasser (RH+WW) deckt die Zusatzheizung üblicherweise 70-80% des Wärmebedarfs ab (vgl. *Abbildung 1*). Dies bedeutet jedoch, dass ein um 5% verbesserter Jahresnutzungsgrad der Zusatzheizung zur gleichen Energie-Einsparung führt wie eine Verbesserung der Solaranlage um 12-20%. Vor diesem Hintergrund wird die Bedeutung eines adäquaten Kesselmodells ersichtlich.

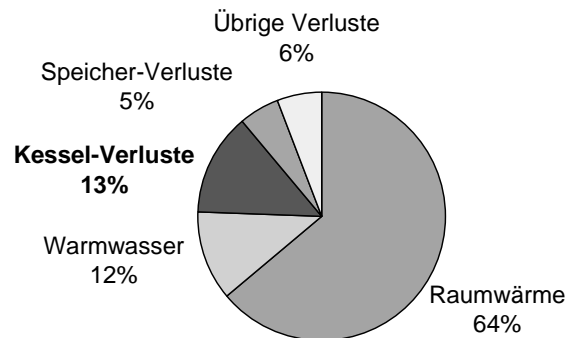
## Ausgangslage

Der Jahresnutzungsgrad eines Heizkessels ist von der Heizlast, von Vor- und Rücklauftemperaturen sowie von der hydraulischen Einbindung und Regelung abhängig. Insbesondere bei Brennwertgeräten spielen die Rücklauftemperatur und die dadurch ermöglichten Kondensationswärmegewinne eine entscheidende Rolle. Einige dieser Abhängigkeiten werden in heute gebräuchlichen Simulationswerkzeugen ansatzweise abgebildet, andere jedoch nicht oder nur rudimentär. Wird die Abhängigkeit der Kesseleffizienz von diesen Parametern ungenügend berücksichtigt, so besteht die Gefahr, dass es zum Beispiel bei Parameterstudien zu Fehlschlüssen kommt. Aus diesem Grund wurde mit der Entwicklung eines verbesserten Modells begonnen, welches die Abhängigkeiten der Kesseleffizienz von den Rahmenbedingungen korrekt abbilden kann.

Energie-Input des Systems:  
Total 24'300 kWh



Energie-Output des Systems:  
Total 24'300 kWh



**Abbildung 1:** Input und Output von Energie in eine Solaranlage für RH+WW. Die Zahlen basieren auf einer Jahressimulation mit der Simulations-Software TRNSYS [1], in welcher ein im Prüfstand des Institut für Solartechnik SPF Rapperswil ausgemessenes Pellet-Solar-System abgebildet wurde. Die Energie "Kollektor" entspricht der Wärmeabgabe des Kollektors an das System. Die "übrigen Verluste" enthalten Verluste der Kollektorleitungen der Verbindungsleitung von Kessel zu Speicher, sowie die Verluste einer Warmwasserleitung.

Basierend auf dem heutigen Wissenstand bezüglich Wirkungsgraden und Jahresnutzungsgraden von Heizkesseln [2][3][4][5] sollte ein realitätsnahes Kesselmodell die Abhängigkeit des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von den folgenden Parametern berücksichtigen können:

- Brennstoff-Eigenschaften (beinhaltet Feuchte im Falle der Biomasse)
- Rücklauftemperatur
- Modulationsstufe (Heizlast)
- Luftüberschuss (Lambda) der Verbrennung
- Kondensationswärme im Falle eines Brennwertkessels
- Volumenstrom des wasserseitigen Durchflusses

Zudem sollten insbesondere für den dynamischen Bereich die Kesselverluste durch Wärmeabgabe an die Umgebung realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu ist es erforderlich, die thermische Masse des Kessels in die Simulation mit einzubeziehen. Damit können sowohl die zeitlichen Entwicklungen der Vorlauf-Temperatur im dynamischen Betrieb, als auch die Auskühl-Verluste im Stillstand ermittelt werden.

## Mess-Ergebnisse und Modell-Bildung

Am Institut für Solartechnik SPF (Schweiz) sowie am Institut für Wärmetechnik and der TU Graz (Österreich) wurden ein Öl-, ein Gas- und ein Holz-Pellet-Kessel detailliert ausgemessen. Exemplarisch werden im Folgenden die Resultate der Messungen an der Brennwert Gastherme und am Pellet-Kessel diskutiert.

Aus den Messungen an der Gastherme ist ersichtlich, dass der feuerungstechnische Wirkungsgrad abhängig ist von der Rücklauftemperatur, der Brennerleistung und dem Volumenstrom des Heizmediums (*Abbildung 2*). Mit Abstand den grössten Einfluss hat die Rücklauftemperatur, insbesondere unterhalb des Abgas-Taupunktes

von ca. 57 °C. Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Brennerleistung und vom Volumenstrom des Wassers ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Insgesamt ist bei allen Abhängigkeiten festzustellen, dass diese im kondensierenden Bereich signifikanter ausfallen als in Bereichen ohne Kondensation. Detaillierte Messresultate des Pelletkessels werden in einem anderen Beitrag an diesem Symposium präsentiert [7].

### **Feuerungstechnischer Wirkungsgrad im Stationärzustand**

Empfehlungen zur Simulation des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Gas-Kesseln ohne Kondensationswärmenutzung finden sich bei Lebrun [5][8]. Demzufolge wird die Wärmeübertragung vom heißen Verbrennungsgas auf das Wasser durch die Annahme eines Gegenstrom-Wärmetauschers mit der Effectiveness-NTU Methode stationär gerechnet. Dabei wird angenommen, dass der Wärmetransferkoeffizient UA (J/sK) des Wärmetauschers mit zunehmender Geschwindigkeit des vorbeiströmenden Rauchgases ebenfalls zunimmt. Ausgehend von diesem Modell, welches auf Grund von Messungen an Ölkesseln ohne Nutzung der Kondensationswärme entwickelt wurde, mussten für Simulation der vermessenen Brennwert Gastherme die folgenden Anpassungen gemacht werden:

- Der Wärmetransferkoeffizient „UA“ ist nicht nur abhängig von der Geschwindigkeit des Rauchgases, sondern auch vom Volumenstrom des Wassers (vgl. *Abbildung 2*, rechts unten).
- Der Wärmetauscher wird für die Berechnung in einen „trockenen“ Teil und in einen „feuchten“ Teil unterteilt. Im trockenen Teil kann die Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und Wasser als treibende Kraft des Wärmetransfers angenommen werden. Im feuchten Teil wird die treibende Kraft mit der Differenz zwischen der Feuchtkugeltemperatur des Rauchgases und der Wassertemperatur mit ausreichender Genauigkeit abgebildet.

Beide Annahmen wurden für die Berechnung von Gasthermen mit Kondensationswärmenutzung bereits von Lebrun verwendet [9], und finden sich in ähnlicher Weise in Berechnungsmethoden für Raumluft-Kühlgeräte [10], respektive der lange bekannten Merkel-Theorie der Verdunstungskühlung [11].

Im erstellten Modell wird der Wärmetauscher auf einfache Weise mit 3 Parametern charakterisiert, welche die Wärmeübergangs-Widerstände auf beiden Seiten sowohl im trockenen als auch im feuchten Zustand (gasseitig) bestimmen. Die 3 Parameter werden durch Messungen am Kessel erhoben. Mit diesem relativ einfachen Modell wird die Abhängigkeit des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von verschiedenen Randbedingungen sehr gut wiedergegeben (*Abbildung 2*, rechts unten).

Pellet-Kessel sind prinzipiell anders aufgebaut als Brennwert Gasthermen. Deshalb führt die Annahme eines Gegenstrom-Wärmetauschers hier nicht zu einem befriedigenden Ergebnis. Auf Grund der bekannten Konstruktionsweise des Pellet-Kessels kann ein Rohrbündel-Wärmetauscher mit 2 Rohrdurchgängen angenommen werden. Unter dieser Annahme liefert die Berechnung mit der Effectiveness-NTU Methode sehr gute Resultate (vgl. *Abbildung 3*, rechts).

### ***Transientes Verhalten***

Betriebsrelevante Grössen sind auch das Kesseltakten und die Wärmeabgabe an die Umgebung in Betrieb und Stillstand [13][7]. Diese werden vor allem bestimmt durch das Trägheitsverhalten der thermischen Masse, respektive die Auskühlung der thermischen Masse an die Umgebung. Vereinfachend wurde angenommen, dass bei einer Veränderung der Inputgrössen wie zum Beispiel Rücklauf­temperatur oder Leistungsmodulation der feuerungstechnische Wirkungsgrad sprunghaft antwortet. Deshalb kann dieser immer stationär gerechnet werden. Sodann wurde bewusst auf die Unterteilung der thermischen Masse in mehrere Zonen/Knoten für die Berechnung verzichtet. Dies aus Rücksicht auf die benötigte Simulationszeit, welche mit der Einführung eines iterativ zu rechnenden Mehrknoten-Modells sprunghaft ansteigt. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich die Entwicklung der Austrittstemperatur aus dem Kessel als Funktion der Zeit relativ einfach ermitteln. Die Abweichung der simulierten von der gemessenen thermischen Effizienz ist mit diesen Annahmen selbst unter instationären Bedingungen verhältnismässig gering.

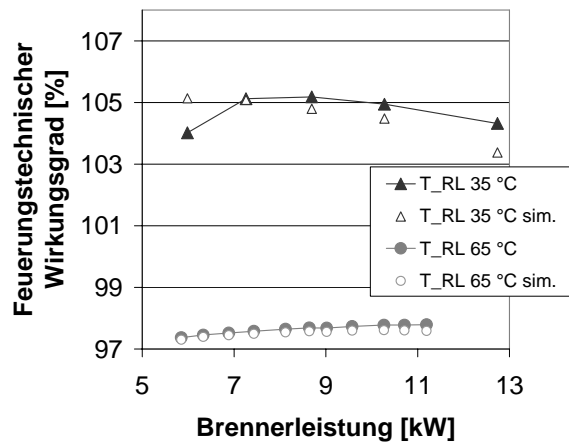
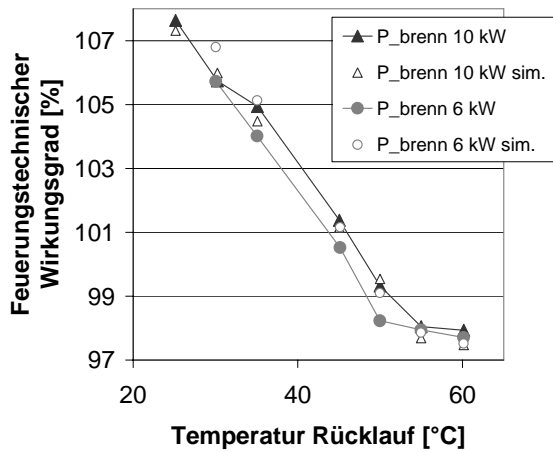
### **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Das neu erstellte Kessel-Modell, ausprogrammiert in FORTRAN und eingebunden in die Simulations-Software TRNSYS [1], wurde im Projekt PelletSolar bereits erfolgreich für die Simulation von Pelletkessel in Kombination mit Solaranlagen verwendet [7]. Das Modell wird im Rahmen einer Dissertation weiter eingesetzt werden für die Optimierung von Pellet-Solarkombinierten Systemen zur Raumheizung und Warmwasser-Aufbereitung. Es wird im Rahmen von internationalen Kooperationen verbreitet, und eine vereinfachte Version findet Eingang in die Planungs-Software Polysun 4. Weiter soll geprüft werden, auf welche Weise das Modell, in Kombination mit einem geeigneten Speichermodell, auch verwendet werden kann um geschichtete Solarspeicher mit integrierten Brennern zu simulieren.

### **Danksagung**

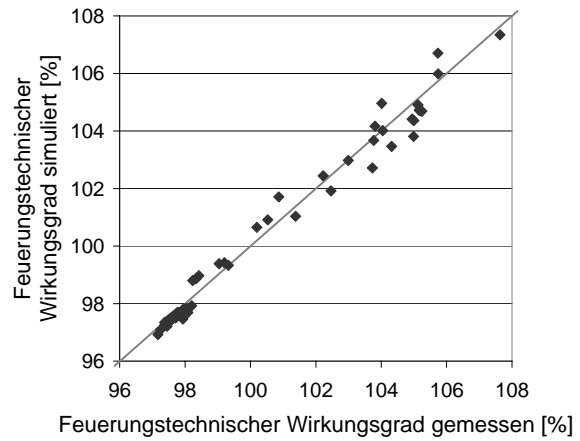
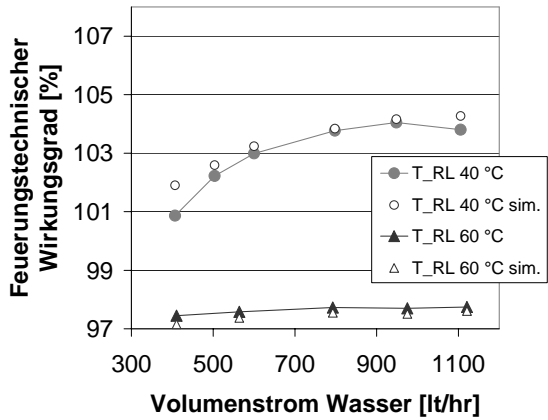
Die Arbeit des Autors ist gefördert durch das 6. EU Forschungsrahmenprogramm Marie Curie early stage research training network Advanced solar heating and cooling for buildings – SolNet.

Die Messdaten des Pelletkessels stammen aus dem Projekt PelletSolar, welches durch das Schweizerische Bundesamt für Energie BFE – Forschungsprogramm Biomasse gefördert wurde.



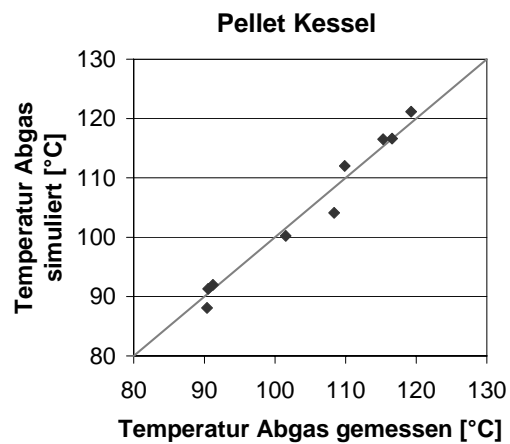
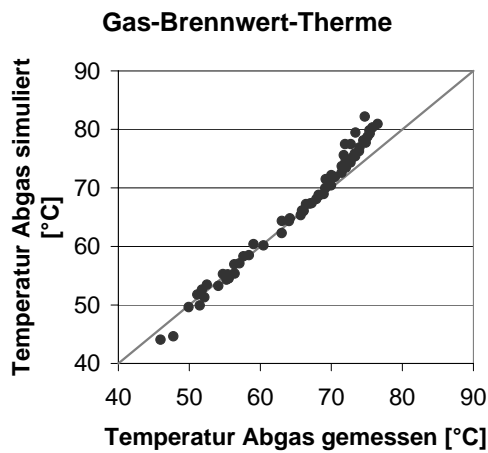
P\_brenn = Brennerleistung; sim. = simuliert

T\_RL = Temperatur Rücklauf; sim. = simuliert



T\_RL = Temperatur Rücklauf; sim. = simuliert

**Abbildung 2:** Abhängigkeit des feuerungstechnischen Wirkungsgrades einer Gas-Therme von der Rücklauf-temperatur (links oben) von der Brennerleistung (rechts oben) und vom Volumenstrom des Wassers (links unten). Berechnungen/Simulation (sim.) mit gemessenen Werten für Lambda (Luftüberschuss) der Verbrennung. Rechts unten ist die Abweichung von Simulation und Messung dargestellt für alle erhobenen Messpunkte, unter Verwendung einer Fitfunktion für Lambda in Abhängigkeit der Brennerleistung. Basierend auf Messdaten von [6].



**Abbildung 3:** Gemessene und simulierte Abgas-Temperaturen einer Gas-Brennwert-Therme (links) und eines Pellet-Kessels (rechts). Mess-Daten Gas-Brennwert-Therme aus [6], Pellet-Kessel aus [12].

## Referenzen

- [1] S.A. Klein et al. (2007). TRNSYS 16.01.0003 – A TRansient SYstem Simulation program
- [2] D. Wolff, P. Teuber, J. Budde, K. Jagnow (2004) Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln (Abschlussbericht). Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel
- [3] S. Furbo, L. J. Shah, C. H. Christiansen, K. V. Frederiksen (2004) Kedeleffektiviteter for oliefyr og naturgaskedler i enfamiliehuse. Rapport BYG-DTU R-072. Danmarks Tekniske Universitet
- [4] C. Felmann (2006) Validation of Tools used for HVAC Simulation. EPIC 2006, pp. 809 – 814
- [5] J. Lebrun, C. Saavedra, F. Hore, M.M. Grodent, P. Nusgens (1993) Testing and modeling of fuel oil space-heating boilers – synthesis of available results, ASHRAE Transactions 99(2), pp. 455 – 464
- [6] A. Dröscher (2008, in preparation) Flue gas to water heat transfer in residential gas boilers with modulation and vapour condensation, Master Thesis at the Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology, Austria
- [7] L. Konersmann, M. Haller, E. Frank (2008). PelletSolar - Leistungsanalyse und Optimierung eines Pellet-Solarkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser. 18. Symposium Thermische Solarenergie, 23.-25. April 2008, Kloster Banz, Bad Staffelstein, OTTI
- [8] ASHRAE (2005) Handbook of Fundamentals, F32: Energy Estimating and Modelling Methods
- [9] J. Lebrun (2007), Beilage „Condensation\_Boiler\_JL050204\_070620.EES“ von persönlicher Mitteilung per e-mail vom 26.06.2007
- [10] VDI-Wärmeatlas (2006) Mk – Be- und Entfeuchten von Luft, elektronische Ausgabe, Springer Verlag Berlin-Heidelberg
- [11] F. Merkel (1926) Verdunstungskühlung. VDI Band 70, Nr. 4, pp. 123 – 128
- [12] L. Konersmann, M. Haller, P. Vogelsanger (2007). PelletSolar – Leistungsanalyse und Optimierung eines Pellet-Solarkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser. BFE-Projektnummer: 101792/152207. Im Auftrag des Bundesamt Für Energie, Schweiz
- [13] A. Heinz (2007). Application of Thermal Energy Storage with Phase Change Materials in Heating Systems. Ph.D. Thesis at the Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology, Austria