

Erweiterte Systembewertung mit dem Concise Cycle Test am Beispiel von PelletSolar

Robert Haberl, Lars Konersmann, Elimar Frank
SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik HSR
Oberseestr. 10, CH - 8640 Rapperswil
Tel.: +41 (0)55 222 48 32, Fax: +41 (0)55 222 48 44
E-Mail: robert.haberl@solarenergy.ch
Internet: www.solarenergy.ch

Einleitung

Die Kombination aus einem Pelletheizgerät mit einer solarthermischen Anlage ermöglicht es, den Energiedarf für Heizwärme und Trinkwasser ohne die Nutzung fossiler Energieträger zu decken. Solche Systeme wurden am SPF im Rahmen des Forschungsprojektes „PelletSolar I“ detailliert untersucht. Als Vorteil der Kombination wurde u.a. eine Verbesserung des Jahresnutzungsgrades (JNG) des Kessels und die Reduktion des Strombedarfs im Vergleich zu einem Referenzsystem ohne Solaranlage nachgewiesen [1]. Zudem konnte in einer optimierten Variante die Anzahl der Brennerstarts signifikant gesenkt werden. Dies ist eine zentrale Grösse zur Beurteilung von Pellet-Solarkombinierten Systemen, da neben einem Zusammenhang mit dem Brennstoff- und Strombedarf auch ein Einfluss hinsichtlich der Emissionen (insbesondere des Feinstaubes) vermutet wird. Mit dem Ziel, die bisherigen Erkenntnisse auszuweiten und die Vermutungen bzgl. der Emissionsfrachten messtechnisch und im dynamischen Betrieb zu validieren, wurde das Forschungsprojekt „PelletSolar II“ gestartet. Dabei wurde die dynamische Messmethode des Concise Cycle Test erweitert, und zwei weitere Pellet-Solarkombinierte Systeme verschiedener Hersteller ausführlich getestet. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse eines der beiden gemessenen Systeme vorgestellt mit einem Schwerpunkt auf den neu in die Bewertung aufgenommenen Emissionsfrachten. Die detaillierten Ergebnisse beider Systeme sind im Projekt-Abschlussbericht dokumentiert [2].

Vorgehensweise

Die Messungen wurden wie bereits im Projekt „PelletSolar I“ mit Hilfe des am SPF entwickelten Concise Cycle Test (CCT) durchgeführt [3][4]. Um das getestete System auch hinsichtlich seiner Emissionen bewerten zu können wurde diese Methode noch erweitert. Der Ablauf der Prüfung lässt sich neu in vier Schritte unterteilen:

1. Komponententests

Die wichtigsten Komponenten des Systems, der Pelletkessel und der Speicher, werden vorab einzeln getestet um deren Parameter (wie zum Beispiel die Auskühlverluste) zu ermitteln.

2. Systemtest

Das gesamte System wird inklusive der Nachheizung, der Hydraulik und der Regelung auf dem Indoor-Prüfstand des SPF installiert. Das Testgebäude und die Kollektoren im Solarkreis werden über steuerbare Wärmequellen und -senken in Echtzeit emuliert. Die Anlage muss dabei realitätsgetreu ohne Eingriffe funktionieren, um die

Last aus Heizung und Warmwasserbereitung während der 12-Tägigen Prüfdauer zu decken.

3. Emissionsfaktoren

Die Betriebsphasen des Heizgerätes, die während des dynamischen Betriebs im 12-Tagestest sowie den instationären Komponententests ermittelt werden konnten, wurden einzeln hinsichtlich des Emissionsausstoßes gemessen und bilanziert. Diese Messungen wurden, abgestimmt auf die Inhalte und Ziele von „PelletSolar II“, an der Hochschule Luzern (HSLU) durchgeführt [5]. Folgende Emissionen wurden gemessen:

- Kohlenmonoxid (CO)
- Kohlenwasserstoffe (VOC)
- Methan (CH₄)
- Nichtmethan-VOC (NMVOC)
- Stickoxide (NO_x)
- Feststoff gravimetrisch (Staub)
- Feinpartikel (PM₁₀)

4. Jahressimulationen

Die vorgängigen Tests dienen dazu, ein detailliertes Modell des Systems zu parametrisieren. Dazu wurde die Simulationssoftware TRNSYS verwendet. Die Simulation des Pelletkessels erfolgte mittels einem neu entwickelten Modell das die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Wirkungs-/Nutzungsgrad wie die Abgasverluste und die thermische Masse annähernd physikalisch abdeckt [6]. Das simulierte Gebäude entspricht einem Einfamilienhaus mit einem Raumwärmebedarf von 15'500 kWh/a bei 150 m² beheizter Wohnfläche. Der Energiebedarf für Warmwasser beträgt 2'800 kWh/a. Mit Hilfe dieses Modells können dann in Jahressimulationen die verschiedenen Kennzahlen des Systems (Pelletverbrauch, Systemnutzungsgrad, solarer Deckungsgrad etc.) ermittelt werden. Durch die Integration der Emissionsfaktoren zählen neu auch die jährlichen Emissionsfrachten zu diesen Kennzahlen. Zusätzlich bietet das Simulationsmodell die Möglichkeit, Kennwerte von Systemvarianten ohne weitere aufwändige Tests im Prüfstand zu berechnen und so das Verbesserungspotential zu identifizieren. Dazu wurden verschiedene Systemvarianten erstellt:

- Referenzsystem (analog zum Standardsystem, aber ohne Solarteil und Speicher)
- Standardsystem (entspr. dem getesteten System: 10 kW Pelletkessel, 950 l Speicher, 12 m² Kollektorfläche)
- optimiertes System (wie Standardsystem, aber mit veränderter Kesselregelung zur besseren Ausnutzung der Modulation)

Ergebnis der Labormessungen

Komponententests

Die Messungen am Pelletkessel bestätigten die Ergebnisse aus dem Projekt „PelletSolar I“: Der Einfluss von Abstrahlungs- und Konvektionsverlusten ist generell hoch und steigt mit abnehmender Leistung. Ebenfalls auffällig ist der deutlich erhöhte Luftüberschuss (λ) bei kleinen Leistungen im Vergleich zur Nennlast (vgl. [7]).

Systemtest

Im dynamischen Systemtest konnte gezeigt werden, dass das Pellet-Solarkombinierte System die gestellten Anforderungen an den Komfort zu jedem Zeitpunkt erfüllte. Das dabei gezeigt Betriebsverhalten war allerdings nicht optimal. Wie bereits in „PelletSolar I“ zeigte der Pelletkessel ein stark taktendes Betriebsverhalten. Eine mögliche Anpassung der Leistung an die jeweilige Last konnte nicht erreicht werden. In Abbildung 1 wird der Verlauf der der Messungen am Prüfstand am zweiten Tag

des Tests gezeigt. Die Ursache des taktenden Betriebes konnte auf die Einbindung und Regelung des Pelletkessels zurückgeführt werden: Die Leistungsanpassung wird nach Vorlauftemperatur geregelt. Wenn der eingestellte Vorlauftemperaturwert erreicht wird, beginnt der Kessel die Leistung zu reduzieren. Im dynamischen Test zeigte sich allerdings, dass es unter den auftretenden Rücklauftemperaturen und dem fix eingestellten Volumenstrom der Kesselkreispumpe kaum zu einer Leistungsmodulation kommen konnte.

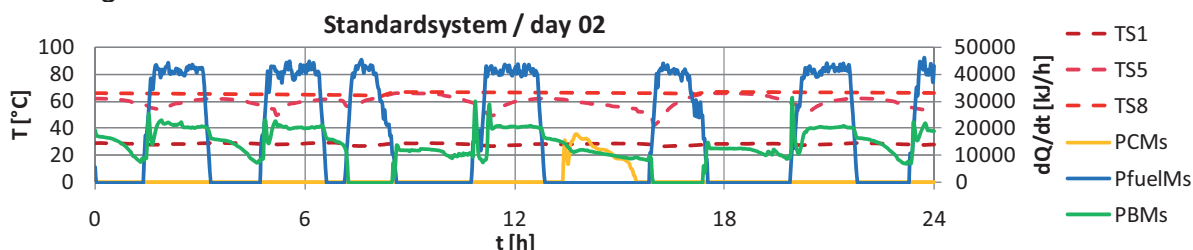


Abbildung 1: Betriebsverhalten während des zweiten Tages im Systemtest. TS1-TS8 = Speichertemperaturen in verschiedenen Höhen; PCMs = Leistung Kollektorkreis; PfuelMs = Brennstoffleistung; PBMs = Leistung der Raumheizung.

Emissionsfaktoren

In Abbildung 2 sind die Emissionsfaktoren der getesteten Betriebszustände von CO und gravimetrisch gemessenem Staub enthalten. Die Angaben zur jeweiligen Dauer und der zugeführten Energie der Betriebsphasen sowie die Daten zu weiteren Emissionen sind im Schlussbericht des Projektes der HSLU [5] enthalten.

Aus der Abbildung 2 wird deutlich, dass die spezifischen CO-Emissionen, analog zum zuvor gemessenen Luftüberschuss der Verbrennung, mit abnehmender Last steigen. Bei den Staub-Emissionen kann dieser Effekt nicht beobachtet werden. Bei beiden Emissionsarten wurden höhere Werte während der Start- und Stoppphase gemessen.

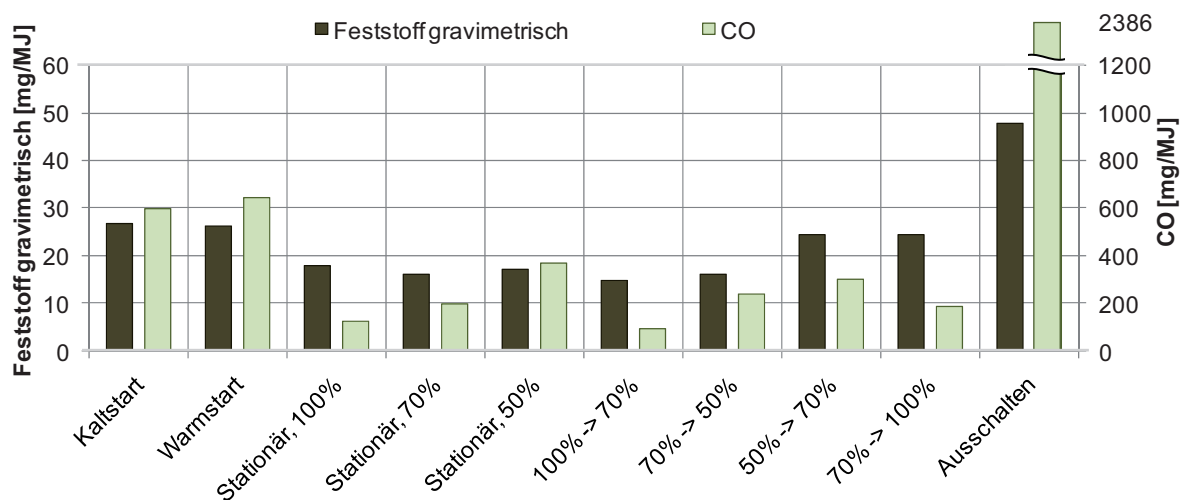


Abbildung 2: Emissionsfaktoren in Abhängigkeit des Betriebszustandes. Angabe in [mg/MJ]. Als Basis für die Energie in [MJ] dient die zugeführte Energie in Form des Heizwertes.

Ergebnis der Jahressimulationen: Energetische Bewertung

In den verschiedenen Simulationsmodellen zeigte der Pelletkessel, trotz der identischen Parametrisierung, ein unterschiedliches Betriebsverhalten. Während im Pellet-Solarkombinierten Standardsystem entsprechend dem dynamischen Systemtest lediglich ein Ein/Aus Betrieb möglich war konnte der Kessel in den beiden anderen Modellen durch die jeweilige Einbindung seine Modulationsbreite

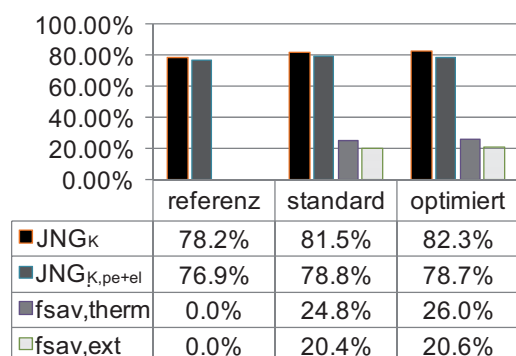


Abbildung 3: Ergebnisse der Jahres-simulationen. JNG_K = Kesses-Jahres-nutzungsgrad; JNG_{K,pe+el} = Kessel-Jahres-nutzungsgrad unter miteinbezug der elektrischen Leistung; f_{sav} = fractional energy savings.

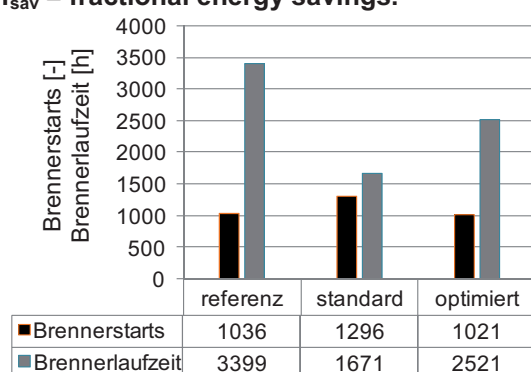


Abbildung 4: Brennerstarts und –laufzeit der einzelnen Simulationsvarianten.

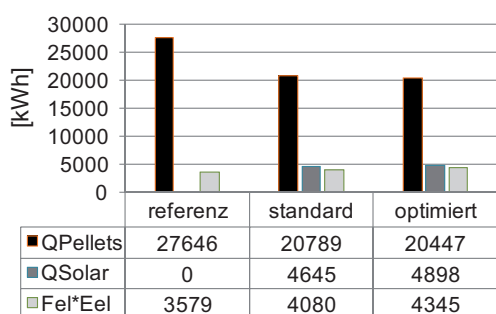


Abbildung 5: Q_{pellets} = Pelletverbrauch; Q_{solar} = Solareintrag; F_{el}*E_{el} = gewichteter elektrischer Eintrag (F_{el} = 3).

weitestgehend ausnutzen.

Zur Auswertung der Jahressimulationen wurden verschiedene Nutzungsgrade bestimmt. Der Kessel-Jahresnutzungsgrad mit und ohne die Berücksichtigung elektrischer Energie (JNG_K und JNG_{K,pe+el}) sowie die Energieeinsparung gegenüber dem Referenzsystem (f_{sav,therm} und f_{sav,ext}), ebenfalls mit und ohne den Einbezug des Stromverbrauchs. Der Strombedarf wurde dazu mit dem Faktor F_{el} = 3 gewichtet:

$$JNG_K = 1 - \frac{Q_{wat}}{Q_{pellet}}$$

$$JNG_{K,pe+el} = \frac{Q_{wat}}{Q_{pellet} + F_{el} * E_{el}}$$

$$f_{sav,therm} = 1 - \frac{Q_{pellet}}{Q_{pellet,ref}}$$

$$f_{sav,extended} = 1 - \frac{Q_{pellet} + F_{el} * E_{el}}{Q_{pellet,ref.} + F_{el} * E_{el,ref}}$$

Die Simulationen zeigen, dass in den Pellet-Solarkombinierten Systemen ein höherer Jahresnutzungsgrad des Kessels erreicht wird als im nichtsolaren Referenzsystem. Somit wird der Brennstoff effizienter in Nutzwärme umgewandelt. Insgesamt reduziert sich der Brennstoffbedarf des getesteten Pellet-Solarkombinierten Systems um fast ein Viertel (24,8%) gegenüber einer Pellet-Heizung ohne Solaranlage. Im optimierten Fall konnte diese Einsparung auf 26% gesteigert werden. Die Anzahl der Brennerstarts erhöhte sich allerdings im Standardsystem gegenüber dem Referenzsystem, trotz des deutlich niedrigeren Brennstoffverbrauchs, durch die taktende Betriebsweise. In Abbildung 3 bis Abbildung 5 sind die Simulationsergebnisse für die drei Varianten dargestellt.

Ergebnis der Jahressimulationen: Emissionstechnische Bewertung

In Abbildung 6 sind die CO-Emissionen und der Brennstoffbedarf für die 3 betrachteten Systemvarianten monatlich wiedergegeben. Die genauere Betrachtung zeigt, dass die spezifischen CO-Emissionen (bezogen auf den Brennstoff, mg/MJ) für das Standardsystem am niedrigsten ausfielen. Die in der Grafik mit „1“ markierten Balken zeigen das Verhältnis des Brennstoffverbrauchs zu den CO-Emissionen des Referenzsystems im Januar. Beim Vergleich mit den Daten des Standardsystems (vgl. „2“ in Abbildung 6) werden die verschiedenen spezifischen CO-Emissionen deutlich.

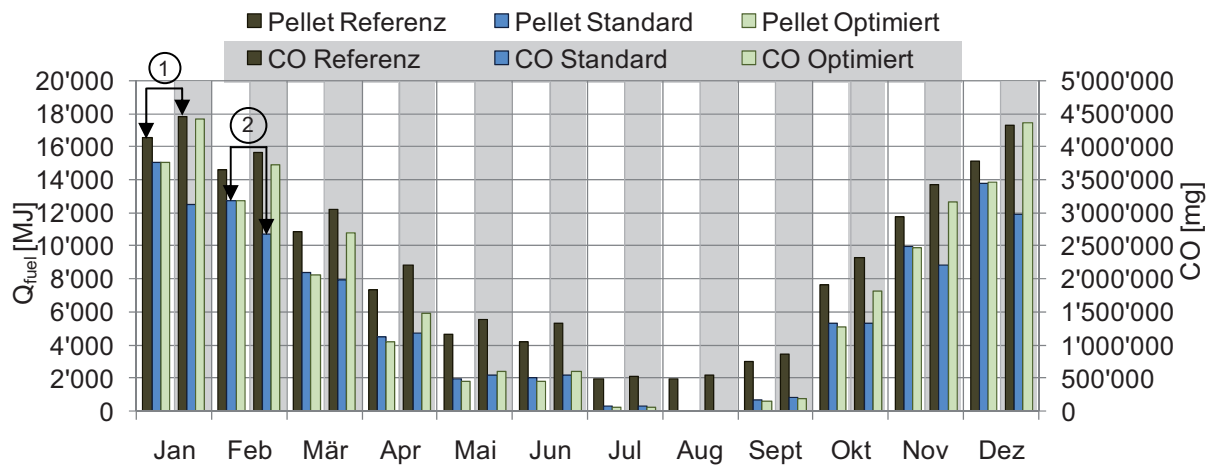


Abbildung 6: CO Emissionen berechnet aus den Jahressimulationen. In der Graphik sind sowohl die Emissionen als auch der Brennstoffverbrauch der drei betrachteten Systeme enthalten. Die spezifischen Emissionen des Referenzsystems (vgl. 1) sind deutlich höher als die spezifischen Emissionen des Standardsystems (vgl. 2).

Die jährlichen Emissionsfrachten sowie die auf den gesamten Brennstoffverbrauch bezogenen spezifischen Emissionsfaktoren für CO und Feststoff sind in Abbildung 7

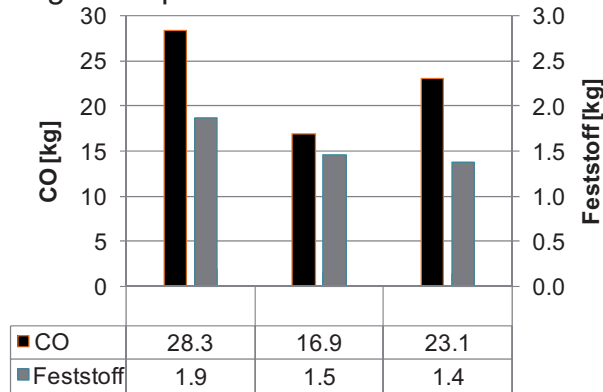


Abbildung 7: Jährliche Emissionsfrachten von CO und Staub (Feststoff).

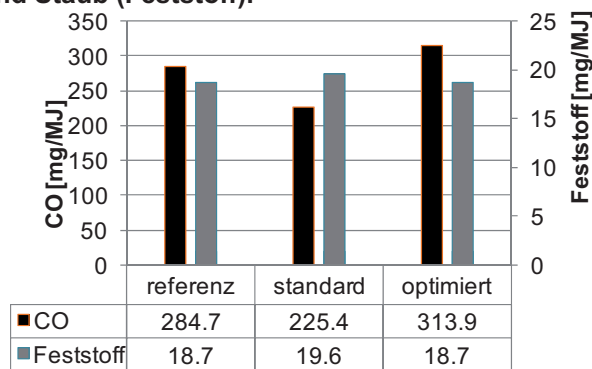


Abbildung 8: Spezifische Emissionen der verschiedenen Systeme über alle Betriebsphasen.

reduzieren sich durch das Pellet-Solarkombinierte Standardsystem um mehr als 40% gegenüber dem Referenzsystem. Im optimierten System beträgt die Reduktion lediglich 18% gegenüber dem Referenzsystem. Die Staub-Emissionen des getesteten Gerätes sind lediglich in Start- und Stoppphasen erhöht, nicht aber im Teillastbereich. Mit der Reduktion der Brennerstarts des optimierten Systems im Vergleich zum Standardsystem um über 20% verringern sich deshalb die jährlichen Staub-Emissionen um ca. 400 g bzw. um 5% spezifisch.

und Abbildung 8 aufgeführt. Die Ursache der hohen CO-Emissionen von sowohl dem Referenz- als auch dem optimierten Pellet-Solarkombinierten System sind in der jeweiligen Betriebsweise des Pelletkessels zu finden. Wie bereits in Abbildung 4 zu sehen, sind die Laufzeiten in dieser Systeme deutlich länger als diejenigen im Standardsystem da der Kessel modulierend betrieben wurde, währenddessen der Kessel im Standardsystem ausschließlich im Ein/Aus Betrieb gefahren wurde. Bereits in Abbildung 2 wird gezeigt, dass die spezifischen CO-Emissionsfaktoren des gemessenen Pelletkessels im Teillastbereich deutlich höher sind als bei Nennlast. Diese erhöhten Emissionen bei Teillast führen dann zu deutlich höheren CO-Emissionsfrachten. Die jährlichen CO-Emissionsfrachten

Schlussfolgerungen

Die Erkenntnisse zur Betriebsweise von Pelletheizungssystemen aus dem vorausgegangenen Projekt „PelletSolar I“ konnten im Rahmen des hier vorgestellten Projektes bestätigt werden, dazu gehören u.a. Synergie-Effekte wie die Erhöhung des Kesselnutzungsgrades durch die Kombination mit einer Solaranlage. Allerdings wurden wiederum die Probleme bei der Integration der verschiedenen Wärmequellen in ein Gesamtsystem deutlich. Diese manifestierten sich u.a. darin, dass die Heizgeräte selten deren Möglichkeit zur Modulation nutzen. Dies führte jeweils zu einem übermäßigen Takten.

Für die erweiterte Bewertung von Heizungssystemen konnte im vorliegenden Forschungsprojekt „PelletSolar II“ die angewandte CCT-Methode um ein Verfahren erweitert werden, das es erlaubt die im dynamischen Betrieb auftretenden Emissionen zu quantifizieren. Dieses Verfahren ist zwar aufwendiger, aber deutlich aussagekräftiger als die verbreitete Betrachtung des Stationärbetriebes. Analog zum energetischen Jahresnutzungsgrads des Kessels sind auch die spezifischen Emissionen des Heizgerätes von dessen Einbindung in ein Gesamtsystem abhängig. Zur Ermittlung dieser Emissionen muss...

- ...das dynamische Verhalten des Kessels im Realbetrieb bekannt sein.
- ...das emissionstechnische Verhalten in jedem Betriebszustand bekannt sein (Bestimmung Emissionsfaktoren).
- ...ein Simulationsmodell erstellt werden, das den realen Betrieb inklusive des Emissionsverhalten abbildet.

Unter diesen Voraussetzungen können dann, wie im vorliegenden Beitrag gezeigt, die Emissionsfrachten eines Systems über einen bestimmten Zeitraum realistisch ermittelt werden.

Die Methode erlaubt die Optimierung von Systemen unter einem neuen Kriterium. Zudem lässt sie sich auch auf andere Brennstofftypen wie Gas oder Öl anwenden.

Danksagung

Das SPF dankt dem Schweizerischen Bundesamt für Energie für die Unterstützung der dargestellten Forschungsaktivitäten im Rahmen des Projektes „PelletSolar II“.

Literatur

- [1] Konersmann, L.: PelletSolar – Leistungsanalyse und Optimierung Pellet-Solkombinierter Systeme für Heizung und Warmwasser, BFE Schlussbericht, 2007
- [2] Haberl, R., Konersmann, L., Frank, E.: PelletSolar-2 – Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand, BFE Schlussbericht, 2010
- [3] Haberl, R., Frank, E., Vogelsanger, P.: Holistic System Testing – 10 Years of Concise Cycle Testing, Proceedings of ISES Solar World Congress, Johannesburg, 2009
- [4] Vogelsanger, P.: Jahresleistungsermittlung von Solarsystemen mit der Concise Cycle Test (CCT) Methode, <http://www.spf.ch/publ/systeme/KombiPruefmethodeCCT.pdf>, 2004
- [5] Good, J., Nussbaumer, T.: Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter typischen Heizbedingungen, Schlussbericht, 2009
- [6] Haller, M. et. al.: A Unified Model for the Simulation of Oil, Gas, and Biomass Space Heating Boilers for Energy Estimating Purposes - Part I: Model Development. Accepted for publication in the IBPSA Journal of Building Performance Simulation, February 2010.
- [7] Konersmann, L., Haller, M., Frank, E.: PelletSolar – Leistungsanalyse und Optimierung eines Pellet-Solkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser, Tagungsband des 18. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008