

SIMULATIONSVERGLEICH VON PELLETSKESSELMODELLEN

Heike Huber-Fauland, Dietrich Wertz, Karl Ponweiser, Markus Haider
 Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien
 Getreidemarkt 9/302, 1060 Wien
 +43 1 58801 30217
heike.huber-fauland@tuwien.ac.at

KURZFASSUNG

Diese Arbeit befasst sich mit der Gegenüberstellung von Simulationsmodellen eines Pelletskessels in Trnsys, Dymola und Excel. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Simulationen mit den Messwerten eines realen Kessels verglichen. Untersucht werden zwei verschiedene Lastfälle, nämlich das Auskühlverhalten und das Aufheizverhalten des Kessels. Es wird dazu der zeitliche Verlauf des Anforderungssignals an den realen Kessel aus den gemessenen Werten in die Simulationsprogramme eingelesen und die Kesselwassertemperatur sowie die benötigte elektrische Leistung aus den Messdaten mit den Ergebnissen der Simulation verglichen.

ABSTRACT

This paper deals with the comparison of simulation models of a pellets boiler in Trnsys, Dymola and Excel, in addition to comparing the simulation results with measurement results of a boiler. Two different load cases are analyzed, one shows the cool-down behaviour, the other the heating-up respectively reheating behaviour. The boiler water temperature and the electric power consumption are compared.

EINLEITUNG

Am IET (Institut für Energietechnik und Thermodynamik) wird mit den Programmen Dymola¹ und Trnsys² gearbeitet. Zwischen den Anwendungsgebieten dieser Simulationsprogramme gibt es Überschneidungen. Dabei stellt sich immer die Frage, welches Programm die Realität in welchem Anwendungsfall besser abbildet. Ein wichtiger Aspekt für die Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes Simulationsprogramm ist die Diskrepanz zwischen verfügbaren und benötigten Daten um den Kessel abzubilden. In der Praxis sind die Parameter, die in der Simulationsumgebung eingegeben werden müssen, in Prüfprotokollen oder in Herstellerangaben nicht immer enthalten. Der Trend geht in Richtung umfassende Gebäudesimulation; alle dafür notwendigen Aspekte

soll dieses Modell abbilden können; vorausgesetzt wird eine richtige Installation auf handwerklich/ingenieurmäßiger Ebene.

Die Simulationsmöglichkeiten von Pelletskesseln sind mit Trnsys schon sehr vielfältig (Klein, 2000):

- Type 370 (Koschak et al., 1998),
- Type 210 (Persson et al., 2009), (Nordlander S. 2003)
- Type 869 (Haller, 2009).

Das zuletzt genannte Modell wird in dem Projekt TecNet zum Vergleich verschiedener Hausanlagen-Standards verwendet.

In Dymola gibt es einige Kesselmodelle wie z.B. in der AT plus library für Modelica (BoilerFF, 2005). Dieses Modell ist aber nicht spezifisch für Pellets ausgelegt.

Für die Abbildung eines Pelletskessels im Forschungsprojekt ADRES³, an dem das IET beteiligt ist, wurde ein neues einfaches Modell eines Blockheizkraftwerks entwickelt (Penthor, 2009). In abgewandelter Form kann dieses Modell für die Darstellung eines Pelletskessels herangezogen werden. Im Rahmen einer Bachelorarbeit (Salcher, 2010) ist weiters ein Exceltool geschaffen worden, das das Betriebsverhalten eines Pelletskessels abbildet.

Die Modelle der einzelnen Simulationsprogramme sind untereinander jedoch bis jetzt noch nicht verglichen worden.

Einen Vergleich zwischen den Programmen gibt es bei der Gebäudesimulation zwischen Modelica und Trnsys (Wetter et al., 2006). Andere Vergleiche sind nicht bekannt.

BESCHREIBUNG DER MODELLE

Bei den herangezogenen Modellen werden die Betriebsführung und das thermische Verhalten des Kessels betrachtet. Auf Strömungs- und Verbrennungsvorgänge im Kessel (wie z.B. in (Musil, 2003) behandelt) wird nicht eingegangen.

¹ Dynamic Modeling Laboratory

² TRaNsient SYstems Simulation

³ Autonome Regenerative Dezentrale Erneuerbare Energiesysteme

Auch die Rauchgasseite und der Pelletsverbrauch werden nicht berücksichtigt.

Für den Vergleich werden folgende Modelle herangezogen:

- BHKW, (Penthor, 2009) für Dymola,
- Typ 869, (Haller, 2009) für Trnsys,
- Pelletskessel, (Salcher, 2010) für Excel.

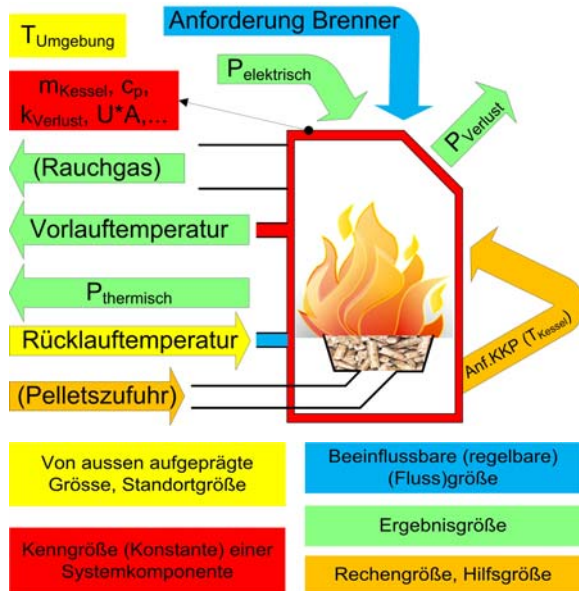


Abbildung 1: Prinzipdarstellung des Pelletskesselmodells mit Input- und Outputgrößen und kesselspezifischen Kennwerten; darunter: Farbklassen für die verschiedene Größen [Anf.KKP – Anforderung Kesselkreispumpe in Abhängigkeit von der Kesseltemperatur].

Kesselmodell in Dymola

Es handelt sich hierbei um ein am IET entwickeltes Modell eines pelletsbetriebenen Blockheizkraftwerks. Wird die Stromproduktion bei dem Blockheizkraftwerk ausgeschaltet, ist das Modell im Wesentlichen einem Pelletskessel gleichzusetzen. Die aus dem Netz bezogene elektrische Leistung wird derzeit nicht berücksichtigt, da in diesem Modell der Eigenverbrauch gegenüber der Produktion des Stroms vernachlässigt wird. Das Modell ist so ausgelegt, dass sich der Kessel wie eine einfache Masse verhält, die aufgewärmt wird. Der Pelletsbrenner liefert die thermische Leistung $P_{th.nenn}$ an das Kesselwasser. Die Wärmeverluste an die Umgebung (Aufstellraum) werden mit Hilfe des Newton'schen Abkühlungsgesetzes berechnet.

$$Cp_{kessel} \dot{T}_{kessel} = P_{th.nenn} - \dot{Q}_{ver} + \dot{m}_{WTfluid} (T_{RL} - T_{VL}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{ver} = k (T_{VL} - T_u) Cp_{kessel} \quad (2)$$

Cp_{kessel}	Wärmekapazität des Kessels	[J/K]
T_{kessel}	Temperatur des Kessels	[K]
$P_{th.nenn}$	thermische Nennleistung	[W]
\dot{Q}_{ver}	thermische Verluste	[W]
T_{vl}	Vorlauftemperatur	[°C]
T_{rl}	Rücklauftemperatur	[°C]
T_u	Umgebungstemperatur	[°C]
k	Abkühlfaktor	[1/s]
$\dot{m}_{wtfluid}$	Massenstrom des Wärmetauscherfluids	[kg/s]

Der zeitabhängige Brennstoffmassenstrom sowie der Füllstand im Pellettspeicher wird abgebildet. Die An- bzw. Abfahrvorgänge sind mit Hilfe eines exponentiellen Ansatzes beschrieben. Auf diese Aspekte wird in diesem Bericht aber nicht eingegangen.

Kesselmodell in Trnsys

Type 869 Version 5.02 ist ein physikalisches Kesselmodell, das Gas-, Öl- und Biomasse simulieren kann. Weiters kann man damit Brennwert- und modulierende Kessel abbilden. Dieses Modell ist von Haller an der TU Graz entwickelt und validiert (Haller, 2009) worden.

Die Brennkammer und die Wärmeübertragung vom Abgas ans Wasser werden stationär -, die thermische Masse des Kessels instationär gerechnet. Die genaue Modell - Beschreibung ist in der Dokumentation nachzulesen (Haller, 2009).

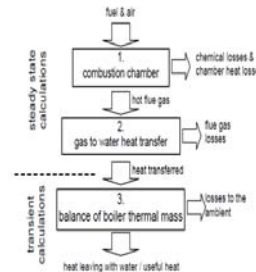


Abbildung 2: Modell – Konzept (Halle et al., 2009)

Kesselmodell in Excel

Die Abbildung des Pelletskessels in Excel beruht auf einfachen physikalischen Zusammenhängen. Die Berechnung erfolgt mit der Finite-Differenzen-Methode. Der Kessel ist als nicht modulierend abgebildet, berücksichtigt jedoch die Gluterhaltung. Die Modellgleichungen entsprechen dem Dymola Modell.

VERGLEICH DER MODELLE

Teillast- und Start/Stopp Verhalten

Lange Laufzeiten sind gefordert, um die Emissionen zu reduzieren, die während des Zündvorgangs maximal sind (Streicher, 2006). Mit der Anzahl der Zündungen steigt außerdem der elektrische

Energiebedarf des Kessels. Eine Mindestlaufzeit und eine daran anschließende Sperrzeit (Kessel startet nicht, auch wenn der übergelagerte Regler den Kessel anfordert) ist bei Type 869 einstellbar. Durch modulierenden Betrieb ergeben sich längere Laufzeiten des Kessels, dies kann man aber einfacher durch Schichtladung in den Pufferspeicher erreichen.

Das Dymola Modell BHKW und die Excel-Berechnung sind nicht auf die Abbildung des Teillastverhaltens ausgelegt. Trnsys Type 869 kann zwar auch einen modulierenden Betrieb simulieren, da Pelletskessel in Österreich aber üblicherweise ohnedies in Verbindung mit Pufferspeichern installiert werden, wird der Teillastbetrieb des Kessels nicht näher betrachtet.

Gluterhaltung

Im Gluterhaltungsbetrieb werden die Pellets nach Beendigung des Anforderungssignals langsam weiter verbrannt. Dies bewirkt eine weitere Energiezufuhr zum Kesselwasser.

Falls im Gluterhaltungsbetrieb eine erneute Anforderung kommt, läuft der Zündvorgang dadurch schneller ab. Die Gluterhaltung funktioniert, indem der Luftstrom aufrechterhalten, allerdings reduziert wird. Pellets werden keine mehr auf den Brennteller gefördert.

Die Restwärme aus der Gluterhaltung wird in der Excel Berechnung berücksichtigt, in Dymola und Trnsys hingegen nicht.

VALIDIERUNG

Für die Validierung stehen Messdaten des Anforderungssignals, die Kesselaustrittstemperatur und die elektrische Leistung des Pelletskessels Ökofen PE08 zur Verfügung.

Die Messung erfolgt im Rahmen des laufenden Betriebs an dem oben genannten Kesseltyp. Aufstellungsort ist ein Einfamilienhaus im Südburgenland. Der Pelletskessel ist in ein Heizsystem mit einer Solaranlage eingebunden (Abbildung 3).

Das Anforderungssignal kommt aufgrund der Speichertemperatur zu Stande: Wenn die Speichertemperatur im Bereich des oberen Pelletskesselanschlusses (Kesselvorlaufleitung) unter 55°C fällt, wird so lange geheizt, bis die Temperatur auf Höhe des Kesselrücklaufs 65°C erreicht hat. Durch diese Regelung werden im praktischen Betrieb durchschnittliche Laufzeiten von ca. einer Stunde erreicht.

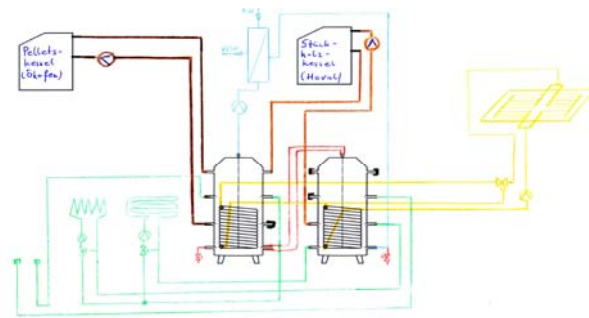


Abbildung 3: Vereinfachtes hydraulisches Schaltschema, Anlage Wertz

SIMULATION

Für die Simulation werden die Parameter des Prüfberichtes (Schrottmaier, 2004) und das Anforderungssignal der Messung übernommen.

Tabelle 1

Eckdaten der Simulation

P_{thnen}	8 kW
T_{Raum}	22°C
T_{RL}	22°C
T_{VL}	60°C
m_{kesselw}	40 l
C_{Kessel}	257 kJ/K
\dot{m}_{Pumpe}	0,15 kg/s

Es werden zwei Lastfälle simuliert:

1. Anfahren aus dem Stillstand, 2stündiger Betrieb und 1.pwhhAuskühlen
 Simulationsdauer 48 Stunden
 - Vergleich der Kesselwassertemperaturen
2. Anfahren aus dem Stillstand, 1stündiger Betrieb, 2stündige Pause und wieder 1stündiger Betrieb.
 Simulationsdauer 5h.
 - Vergleich der Kesselwassertemperaturen
 - Vergleich der elektrischen Leistung

Die elektrische Leistung kann bei dem Dymola Modell nicht mit betrachtet werden.

Dymola

Die zeitliche Diskreditierung der Simulation wird vom Programm selbst bestimmt, die Ausgabeschrittweite kann aber vom Benutzer festgelegt werden.

Trnsys

Type 869 hat viele verschiedene Parameter und Input Möglichkeiten, die bei diesem Vergleich nicht notwendig sind. Der Kessel wird als nicht modulierend und ohne Brennwertbetrieb eingestellt. Das Modell wird mit dem Anforderungssignal gesteuert. Die benötigte Kesselkreislaufpumpe wird mit Type 3b und einem Hystereseregler – Type 2d dargestellt. Die Pumpe liefert dem Kessel die

Kesselwassereintrittstemperatur und den Massenstrom. Es wird in Zeitschrittweiten von einer Minute simuliert.

Excel

Es wird nur das Anforderungssignal als einziger Input benötigt, alle anderen Parameter sind aus dem Prüfbericht als Fixwerte übernommen. Es wird in Ein-Minuten Zeitschrittweiten simuliert

VERGLEICH SIMULATION

Lastfall 1

In Abbildung 4 sind die Kesselwassertemperaturen für den ersten Lastfall dargestellt (linke Skala). Weiters findet man in der Darstellung noch das Anforderungssignal (blau gepunktet, rechts skaliert).

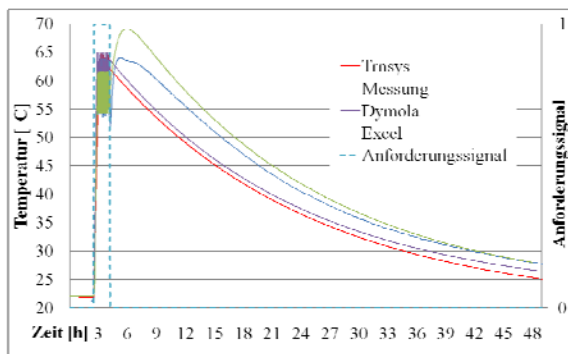


Abbildung 4: Temperaturverlauf für Lastfall 1

Dabei fällt auf, dass die Messung (blau) und die in Excel (grün) berechneten Kurven beide nach dem Abfallen des Anforderungssignals eine Restwärme aus dem Gluterhaltungsbetrieb aufweisen.

Durch diese Restwärme kommt es auch nach Beendigung der Anforderung zu einer weiteren Erwärmung des Kesselwassers. Bei dem gemessenen Kessel läuft die Kesselkreispumpe so lange, bis 65°C überschritten werden. Der Peak der Excel Berechnung ergibt sich dadurch, dass die Kesselkreislumpumpe nur dann läuft, wenn der Kessel angefordert wird. Somit erfolgt kein Wärmeabtransport, wenn keine Anforderung anliegt.

Die Restwärme wird in Trnsys (rot) und in Dymola (violett) nicht abgebildet. Dadurch ergibt sich, dass die Abkühlung schon früher einsetzt. In Abbildung 4 ist im Detail ersichtlich, wie sich der Restwärme auswirkt.

Die Abkühlungsdauer liegt bei allen 3 Simulationsarten in der gleichen Größenordnung. Nach 48 Stunden liegt die Kesselwassertemperatur nur noch knapp über der Raumtemperatur von 22°C .

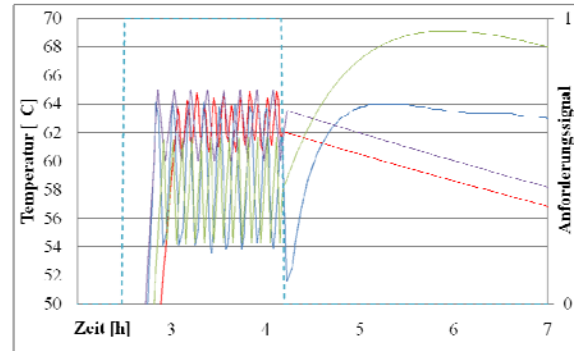


Abbildung 5: Lastfall 1 Aufheizen

Die Temperaturschwankungen, die sich ergeben, während das Anforderungssignal anliegt, stammen aus dem Regelverhalten der Kreislaufkesselpumpe. Sie sind aus Abbildung 5 einfach abzulesen. Da in jedem Simulationsprogramm die Kesselkreislumpumpe anders abgebildet wird, ergeben sich hier unterschiedlichen Schwankungsbreiten. Qualitativ bleiben sie aber alle im gleichen Bereich.

Weiters ist in Abbildung 4 zu erkennen, dass es bei allen drei Simulationen, wie in der Realität, keinen sprunghaftigen Temperaturanstieg gibt. Es braucht auch in den Simulationen eine gewisse Zeit, bis die Pellets tatsächlich brennen und thermische Energie an das Kesselwasser abgeben.

Lastfall 2

In Abbildung 5 ist die elektrische Leistung während eines Wiederaufheizvorgangs abgebildet. Bei der ersten Anforderung hat das Trnsys Modell und die Excel Berechnung eine erhöhte elektrische Aufnahme gegenüber der Messung. Dies ist durch den Zündvorgang zu erklären. Die Zünddauer ist bei Trnsys Modell fix eingestellt. In der Realität hingegen ergibt sich eine von der Rauchgastemperatur abhängige Zünddauer. In Excel wird anstelle der Rauchgastemperatur zur Vereinfachung die Kesseltemperatur als Kriterium herangezogen, woraus folgt, dass bei der zweiten Anforderung der Kessel in der Excel-Berechnung nicht mehr zündet, da die Kesselwassertemperatur noch über der Zündtemperatur von 60°C liegt. Die hohe Temperatur ergibt sich, wie im ersten Lastfall beschrieben, durch das Nicht-Einschalten der Kesselkreispumpe.

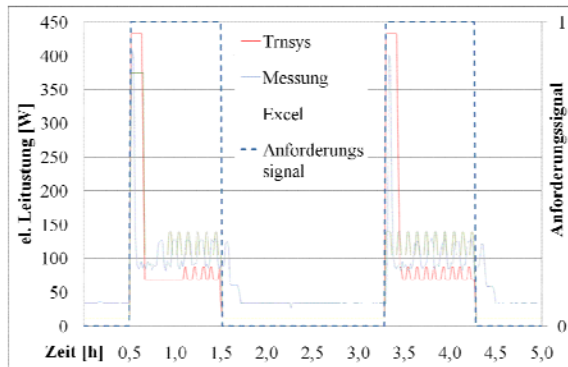


Abbildung 6: Lastfall 2: elektrischer Leistungsverlauf

Während das Anforderungssignal null ist, geht die elektrische Leistung auf den Standby Betrieb zurück. Hier wird jedoch offensichtlich, dass die Excel Berechnung und die Trnsys Simulation auf den Wert des Prüfberichts fallen. Bei der Messung ist noch ein Heizkreisregler samt Heizkreispumpe mit erfasst, der diesen Wert erhöht.

Bei allen Kurven sind nach dem Zündvorgang Schwankungen zu beobachten, die sich durch die Kesselkreispumpe ergeben. Dass diese Pumpe während der Messung auch nach dem Anforderungssignal noch kurz nachläuft, wird in Abbildung 6 ersichtlich.

Die elektrische Arbeit für den Zeitraum findet man in Tabelle 2.

Tabelle 2: elektrische Arbeit Lastfall 2

0-5 Stunden	Arbeit	Relativer Fehler
Messung	351,05Wh	-
Trnsys	283,65Wh	-19,20%
Excel	303,65Wh	-13,50%

Dieser Fehler lässt sich durch die oben schon erwähnten Punkte erklären:

- Zünddauer
- Standbybetrieb
- Regelung der Pumpe

In Abbildung 7 sind die Temperaturen für den zweiten Lastfall dargestellt.

Hier ist wieder die Restwärme des Kessels in der Realität und in der Berechnung mit Excel zu erkennen.

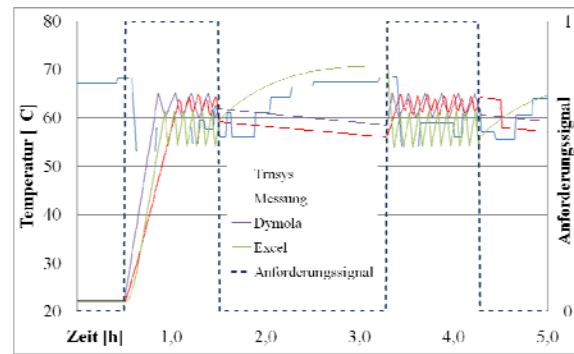


Abbildung 7: Lastfall 2: Temperaturverlauf

Die Temperaturschwankungen ergeben sich wieder aufgrund der Regelung der Kesselkreislaufpumpe. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Periode von Messungen aus einer Gesamtmessreihe entnommen ist. Somit ist die Anfangstemperatur höher als bei den Simulationsprogrammen.

Während des Heizvorganges schwankt je Reglereinstellungen die Temperatur um die 60 °C.

ZUSAMMENFASSUNG

Die drei verglichenen Simulationsmodelle bilden das globale Verhalten, wie man an Hand der Messdaten sieht, eines realen Pelletskessel gut ab. Aufpassen muss man jedoch bei der Regelung der Kesselkreispumpe. Hier sind die größten Unterschiede zu erkennen. Jedoch ist es von der Problemstellung abhängig, wie sehr diese Abweichungen des Regelverhaltens in die Betrachtungen mit einbezogen werden müssen. Es ist bei allen drei Modellen möglich, aus dem Prüfbericht den Kessel im Rahmen unserer Vorgaben nachzubilden.

DANKSAGUNG

Unser Dank gilt Herrn Haller, dass er uns das Modell für die Arbeit am Projekt TecNet und für den Vergleich zur Verfügung gestellt hat.

LITERATUR

BoilerFF, 2005, ATplus.Hvac.Heating.Advanced. Uni Karlsruhe: (http://www.eit.uni-kl.de/litz/forschung/BuildingSimulation/Modelica-html/help/ATplus_Hvac_Heating_Advanced.html. 4.6.2010)

Haller M., Haberl, R., Dröscher, A., Konersmann, L., Frank, E., 2009, Vergleich verschiedener Ansätze zur Simulation von Öl-, Gas- und Pellets-Kessel. Bad Staffelstein: 19. OTTI Symposium Thermische Solarenergie.

- Haller, M., 2009, Type 869 Boiler Model. IWT TU Graz, Graz .
- Klein, et al. 2000. Trnsys 16, a transient system simulation program. Madison USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- Nordlander S. 2003 TRNSYS model for Type 210, Pellet stove with liquid heatexchanger., Solar Energy Research Center, Höskolan Dalarna, Borlänge, Sweden.
- Koscha, A., Friedler,T., Knirsch, A., Breuer, C. 1998. TRNSYS-TYPE 370 Erweiterung des. Bisherigen Gaskesselmoduls um eine Holzfeuerung mit der Möglichkeit der Brennwertnutzung – Ergänzung um einen Simulationsmodus zur realitätsnahen Simulation des Betriebsverhalten von Gaskesseln mit Takten.
- Penthor, S., 2009. Modellierung eines Mikro-Blockheizkraftwerks mit Dymola. TU Wien.
- Persson, T., Frieder, F., Nordlander, S., Bales, C., Paavilainen J., 2009. Validation of a dynamic model for wood pellet boilers and stoves. Applied Energy , 86 (5), pp. 654-656.
- Salcher A., 2010, Abbildung eines Pelletsessel in Excel. Bachelorarbeit, TU Wien, Wien.
- Schrottmaier, J., et. al. 2005. Prüfbericht Pellematic PE08. F. J. Wieselburg, Wieselburg.
- Streicher, W. et al., 2006. „Fortschrittliche Wärmespeicher - Erhöhung von solarem Deckungsgrad und Kesselnutzungsgrad und Emissionsverringierung durch verringertes Takten“, Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft, Graz
- Wetter, M., Haugstetter C., 2006: Modelica versus Trnsys – a comparison between an equation-based and procedural modeling language for building energy simulation, United Technologie Research Center, USA. (<http://simulationresearch.lbl.gov/WETTER/download/WetterHaugstetter-2006.pdf>, 04.06.2010)