

Vergleich verschiedener Ansätze zur Simulation von Öl-, Gas- und Pellets-Kesseln

Michel Haller, Robert Haberl*, Angela Dröscher, Lars Konersmann*, Elimar Frank*

IWT TU Graz, Inffeldgasse 25/B, A-8010 Graz

Tel.: +43-316-8737318, Fax: +43-316-8737305

E-Mail: michel.haller@tugraz.at

Internet: www.iwt.tugraz.at

* Institut für Solartechnik SPF, CH-8640 Rapperswil, Schweiz

Ein detailliertes Modell für die Simulation von automatischen Öl-, Gas-, Pellets- oder Hackgut-Kesseln wurde entwickelt und mit Messdaten verglichen. Das neu entwickelte Modell vermag u.a. folgende Kesseleigenschaften abzubilden: Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Leistung und vom Durchfluss, Kondensation (Brennwerttechnik), thermische Masse, Auskühlverluste und elektrische Leistungsaufnahme. Verschiedene Ansätze für die Simulation der stationären Rauchgas-Verluste wurden implementiert und getestet. Die „Effectiveness-NTU“-Methode für Wärmeübertragung konnte zwar die gemessenen Rauchgas-Verluste am genauesten reproduzieren, benötigte jedoch auch mehr Modell-Parameter und einen wesentlich höheren Rechenaufwand als einfachere empirische Modellansätze. Das Modell wurde in einer FORTRAN-dll implementiert, welche zum Beispiel von der Simulationssoftware TRNSYS aufgerufen werden kann.

Einführung

Für die Abschätzung von Jahreswerten für den Energiebedarf und den Schadstoff-Ausstoß von Kessel-Anlagen für die Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser werden geeignete Modelle benötigt. Diese sollten die Abhängigkeit der energetischen Effizienz und der Anzahl Brennerstarts von den Rahmenbedingungen der Heizlast und der Kesselregelung adäquat berücksichtigen. Der Jahreswirkungsgrad eines Heizkessels kann zum Beispiel mit einfachen Tabellenkalkulationen ermittelt werden (Paulsen, 1999; CEN, 2008). Werden jedoch die Anzahl Brennerstarts benötigt, ist die Heizlast komplexer Natur, oder sollen die Auswirkungen von Änderungen von Heizlast, Hydraulik oder Regelung einer Anlage untersucht werden, so sind Simulationsprogramme von entscheidendem Vorteil. Speziell in Zusammenhang mit der Einbindung von solarthermischen Anlagen sind Änderungen des Kessel-Nutzungsgrades oder der Anzahl Brenner-Starts ohne geeignete Simulationsprogramme nicht einfach vorherzusehen (Haller et al. 2008; Haller & Konersmann, 2008; Fiedler & Persson, 2009).

Basierend auf Literatur zu Feldmessungen von Kesselnutzungsgraden und Simulationsstudien mit bereits verfügbaren Kessel-Modellen wurden Kriterien für das Kesselmodell definiert. Demnach sollte dieses in der Lage sein:

- automatische Öl-, Gas- und Biomasse-Kessel zu simulieren,
- zwischen Verlusten an das Abgas und thermischen Verlusten an die Umgebung (Installationsraum) zu unterscheiden,
- Gewinne durch Kondensation von Wasserdampf im Rauchgas zu berechnen,
- den Einfluss der Rücklauftemperatur und der Leistungs-Modulation auf die Rauchgasverluste und Kondensationsgewinne abzubilden,
- das Auskühlen der thermischen Masse im Stillstand zu simulieren,
- die Anzahl Brennerstarts bei Betrieb unterhalb der minimalen Leistungs-Modulation zu berechnen,
- und den Bedarf an elektrischer Hilfsenergie abzuschätzen.

Für die Simulations-Software TRNSYS (Klein et al., 2004) existieren bereits verschiedene Modelle für die Simulation von Heizkesseln. Diese sind zum Beispiel der Standard Type 6 (Klein et al. 2004), TESS Type 751 (Thornton 2004), HVAC 1 Primary Toolkit (Bourdouxhe 1994), das Kessel-Modell von IEA ECBCS Annex 10 (Dachelet 1987), Type 370 (Koschak et al. 1998) und Type 210 (Persson et al. 2009). Die meisten dieser Modelle sind rein stationäre Modelle, d.h. die thermische Masse wird nicht simuliert. Andere wiederum haben nur limitierte Möglichkeiten zur Abbildung der Rauchgasverluste oder sind nur für einen Brennstoff-Typ ausgelegt. Aus diesen Gründen wurde ein neues Modell entwickelt, welches alle genannten Kriterien erfüllen soll.

Für die Entwicklung und Validierung des Modells wurden mehrere Kessel-Einheiten mit Leistungen von 3 kW_{th} (Teillast) bis 150 kW_{th} im Labor installiert und vermessen. Die Messungen beinhalteten sowohl Stationärzustände unter verschiedenen Randbedingungen im Bereich der Leistungs-Modulation, als auch zyklische Ein/Aus-Betriebe unterhalb der minimalen Leistungs-Modulation. Alle vermessenen Kessel-Einheiten wurden nach dem Jahr 2000 für den europäischen Markt produziert. Hersteller-Angaben sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Hersteller-Angaben zu den vermessenen Heizkesseln

Bezeichnung	P_{max} [kW]	V_{wat} [l]	m_{empty} [kg]	mod. [-]	cond. [-]
Pel1	10	59	312	YES	NO
Pel3	40	158	846	YES	NO
Chp1	150	295	1972	YES	NO
Oil1	15	15	58	YES	YES
Oil2	12	35	107	NO	YES
Gas1	14	10	39	YES	YES
Gas2	14	3.7	45	YES	YES

Pel: Pellets; Chp: Hackgut; Oil: Heizöl; Gas: Erdgas; P_{max} : maximale Nutzleistung; V_{wat} : Wasservolumen; m_{empty} : Leergewicht; mod.: Leistungsmodulation; cond.: Brennwert-Technik (Kondensation)

DAS KESSELMODELL

Konzept

Das Modell-Konzept wurde von ASHRAE (2005) übernommen und um die instationäre Berechnung der thermischen Masse des Kessels erweitert (Abbildung 1).

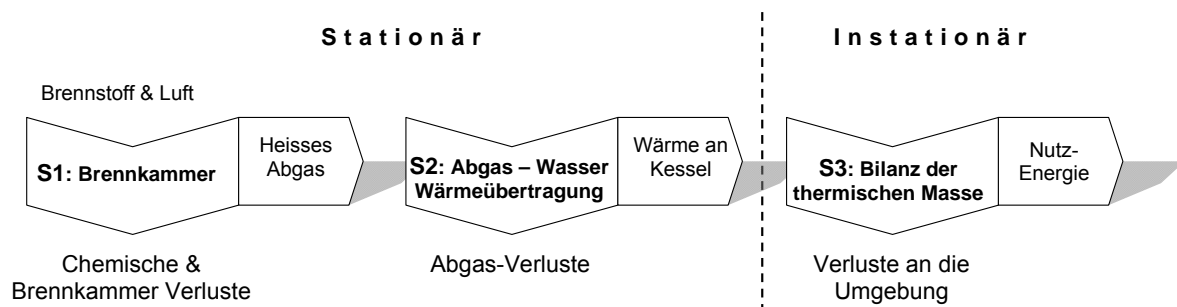


Abbildung 1: Modell-Konzept

In einem ersten Schritt (S1) wird die Bilanz der Brennkammer berechnet. Dies beinhaltet die Simulation des Luftüberschusses und der Kohlenmonoxid-Emissionen (CO) im Stationärzustand. Bei Bedarf wird auch die Temperatur des heißen Rauchgases unter Annahme einer adiabaten Reaktion von Brennstoff und Luft berechnet. In einem zweiten Schritt (S2) werden die Rauchgastemperatur und die relative Feuchte des Rauchgases nach der Wärmeübertragung ans Wasser simuliert. Mit den erhaltenen Resultaten können die Rauchgasverluste und/oder –gewinne berechnet werden. Bis zu dieser Stelle wird für die Berechnungen immer von stationären Bedingungen innerhalb eines Zeitschrittes ausgegangen. Eine zeitabhängige, also instationäre Berechnung wird nur für den dritten Schritt (S3) vorgenommen, in welchem die Energiebilanz der aktiven Wärmekapazität des Kessels simuliert wird. Im Folgenden sind die Grundzüge des Modells knapp dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in der Dokumentation des Modells (Haller, 2008).

Brennkammer (S1)

Für modulierende Kessel werden in diesem Modell sowohl der Luftüberschuss als auch die Kohlenmonoxid-Emissionen als linear abhängig von der Leistungs-Modulation angenommen. Als treibende Ursache für Wärmeverluste von Heizkesseln an die Umgebung wird in Simulationen häufig die Temperaturdifferenz zwischen Kesselwasser und der Umgebung angesetzt. Konersmann u. a. (2007) haben anhand von Messungen am Kessel Pel1 festgestellt, dass die Differenz zwischen den Rauchgasverlusten und den Verlusten insgesamt nicht nur mit dieser Temperaturdifferenz korreliert, sondern auch mit der aktuellen Brennerleistung. Thermographieaufnahmen für den Kessel Pel3 haben gezeigt, dass die Temperaturen der Kesseloberflächen sowohl mit höherer Temperatur des Kesselwassers, als auch mit grösserer Brennerleistung deutlich zunehmen. Beide Effekte wurden deshalb im Simulationsmodell berücksichtigt.

Rauchgas-Verluste im Stationärzustand (S2)

Der grösste Anteil an den Verlusten von modernen Öl-, Gas- und Biomassekesseln geht in der Regel mit dem abströmenden Rauchgas verloren. Deshalb wurden drei verschiedene Ansätze für die Berechnung der Temperatur des Rauchgases beim Austritt aus dem Kessel getestet. Diese Temperatur wird für die Berechnung von sensiblen Verluste und latenten Gewinne benötigt.

Modell 1: empirisches delta-T

Dieses Modell zur Berechnung der Rauchgas-Temperatur am Kesselaustritt ist eine Erweiterung des Ansatzes welcher auch von Koschak u. a. (1998) verwendet wurde. Die Erweiterung beinhaltet eine Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und Kessel-Rücklauf von der Leistungsmodulation und dem Wasser-Massenstrom durch die Kessel-Parameter ddT_{hxfg} und ddT_{hxw} (Gl. 1 und 2), welche durch geeignete Messungen am Kessel bestimmt werden müssen.

$$t_{fg,out} = t_{wat,in} + dT_{fg,out} \quad (1)$$

$$dT_{fg,out} = dT_{nom} + ddT_{hxfg} \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{fuel}^{GHV}}{\dot{Q}_{fuel,nom}^{GHV}}\right) \cdot 100 + ddT_{hxw} \cdot \left(1 - \frac{\dot{m}_{wat}}{\dot{m}_{wat,nom}}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

Modell 2: empirische Effectiveness

Analog dem Ansatz von Modell 1 wird in diesem Ansatz eine empirische Wärmeübertrager-Effectiveness berechnet. Mit dieser Effectiveness kann die Temperatur des abströmenden Rauchgases mit Hilfe der Rücklauftemperatur des Kessels und der Temperatur des heissen Rauchgases vor der Wärmeübertragung

berechnet werden. Die Gleichungen (3 und 4) sind Analog der bereits erwähnten delta-T Berechnung aufgebaut.

$$t_{fg,out} = t_{fg,hot} - \varepsilon_{HX} \cdot (t_{fg,hot} - t_{wat,in}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{HX} = \varepsilon_{nom} + d\varepsilon_{hxPg} \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{fuel}^{GHV}}{\dot{Q}_{fuel,nom}^{GHV}}\right) + d\varepsilon_{hxW} \cdot \left(1 - \frac{\dot{m}_{Wat}}{\dot{m}_{Wat,nom}}\right) \quad (4)$$

Modell 3: detaillierte Effectiveness-NTU Berechnung

Die detaillierte Berechnung mit der Effectiveness-NTU Methode basiert auf einem vereinfachten Ansatz, welcher von Lebrun u. a. (1993) für grössere Ölkessel bis ca. 1 MW_{th} verwendet wurde. Die Methode wurde für die Simulation von Brennwert-Geräten auf Grund von Vorschlägen von Lebrun (2007) sowie Mess-Resultaten des Kessels Gas1 (Dröscher 2008) weiter entwickelt. Dieser Ansatz wurde bereits am 18. OTTI Symposium Thermische Solarenergie präsentiert (Haller et al. 2008). Weitere Dokumentation finden sich in Haller (2008) und Haller et al. (2009). Im Falle von Kessel Oil1 wurde der Ansatz erweitert um einen Faktor für die Vorwärmung der Verbrennungsluft durch das abströmende Rauchgas, da die gemessene Temperatur des Rauchgases am Kessel-Austritt teilweise deutlich unter derjenigen des Kessel-Rücklaufs lagen. Diese Erweiterung ist Beschrieben in Haller (2008).

Latente Gewinne

Latente Gewinne können unter der Annahme, dass das Rauchgas mit Wasserdampf gesättigt ist sobald seine Temperatur unter den Taupunkt fällt (Koschak u. a. 1998; CEN 2008) berechnet werden. Literaturangaben (Baehr 2005, p. 375) und eigenen Messungen zufolge kann jedoch Untersättigung auftreten. Aus diesem Grund wird im Modell ein maximaler Wert $\leq 100\%$ für die relative Feuchte angenommen. Mit diesem Wert und der Temperatur des Rauchgases können auf Grund der Massenbilanzen die anfallenden Kondensatmengen, und damit auch die latenten Gewinne, berechnet werden.

Transiente Berechnungen (S3)

Transiente Berechnungen werden nur für die aktive Wärmekapazität des Kessels durchgeführt (Abbildung 1). Dabei wird von einem vollständig durchmischten Ein-Knoten-Modell ausgegangen. Dieser Ansatz wird ausführlicher beschrieben und mit Messwerten verglichen in Haller u. a. (2009).

VERGLEICH MIT MESSUNGEN

Abbildung 2 zeigt, wie gut die verschiedenen Modelle die gemessenen feuerungstechnischen Wirkungsgrade abzubilden vermögen. Modelle 1-3 basieren auf dem Ansatz des empirischen delta-T (1), der empirischen Effectiveness (2) und der detaillierten Effectiveness-NTU Berechnung (3). Modell 1a und 1b basieren beide auf Vereinfachungen des empirischen delta-T Modells. 1a berücksichtigt keine Beeinflussung des delta-T durch den Wasser-Massenstrom, 1b nimmt überhaupt einen fixen Wert für das delta-T an. Ausser dem Modell 1b sind alle Modelle in der Lage die gemessenen Werte mit einem RMSE (root mean square error) im Bereich von +/-1% absolut wiederzugeben. Diese Abweichungen sind in den meisten Fällen nur wenig grösser als die geschätzten Mess-Unsicherheiten.

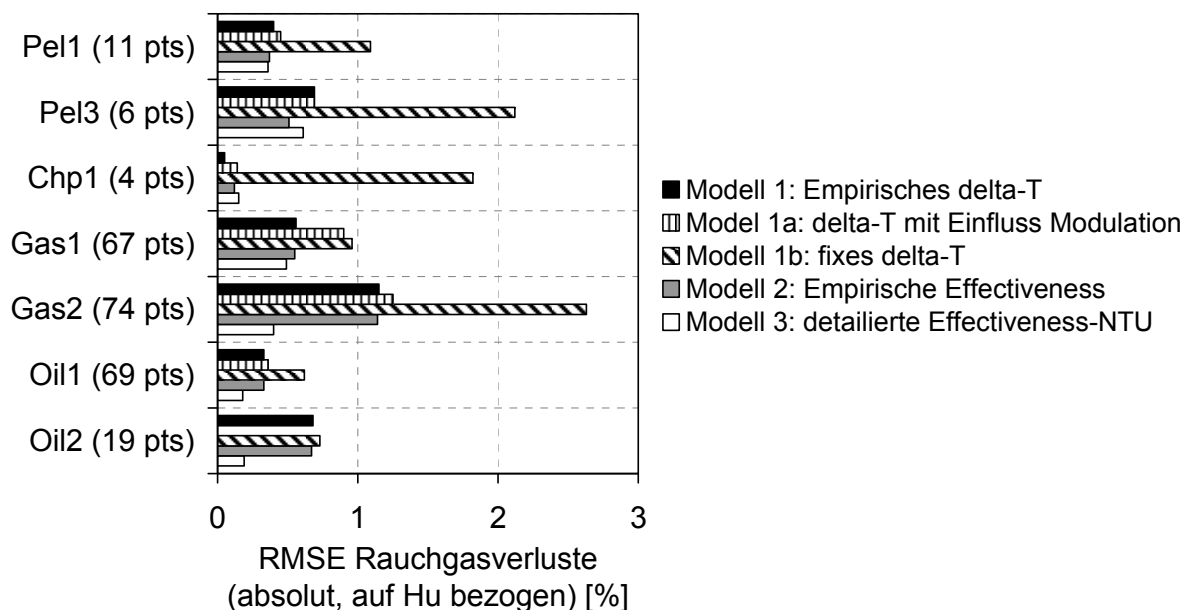


Abbildung 2: Vergleich verschiedener Modelle zur Berechnung der Abgas-Temperatur und des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades. RMSE = root mean square error, pts: Anzahl gemessener Werte

Abbildung 3 zeigt gemessene und simulierte Werte für den Verlauf des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Rücklauf-temperatur für zwei verschiedene Brenner-Leistungen des Kessels Oil1. Der Knick der Wirkungsgradkurve im Bereich 40°C ist ein Resultat der Kondensations-wärmenutzung. Deutlich sichtbar ist die bessere Abbildung dieses Knicks im detaillierten Effectiveness-NTU Modell (links) bei minimaler Leistungsstufe.

Abbildung 4 zeigt, dass das empirische delta-T-Modell den Feuerungstechnischen Wirkungsgrad von Kessel Oil1 bei hohen Wirkungsgraden (tiefen Rücklauf-temperaturen) eher überschätzt, jedoch bei tiefen Wirkungsgraden (hohe Rücklauf-temperaturen) eher unterschätzt.

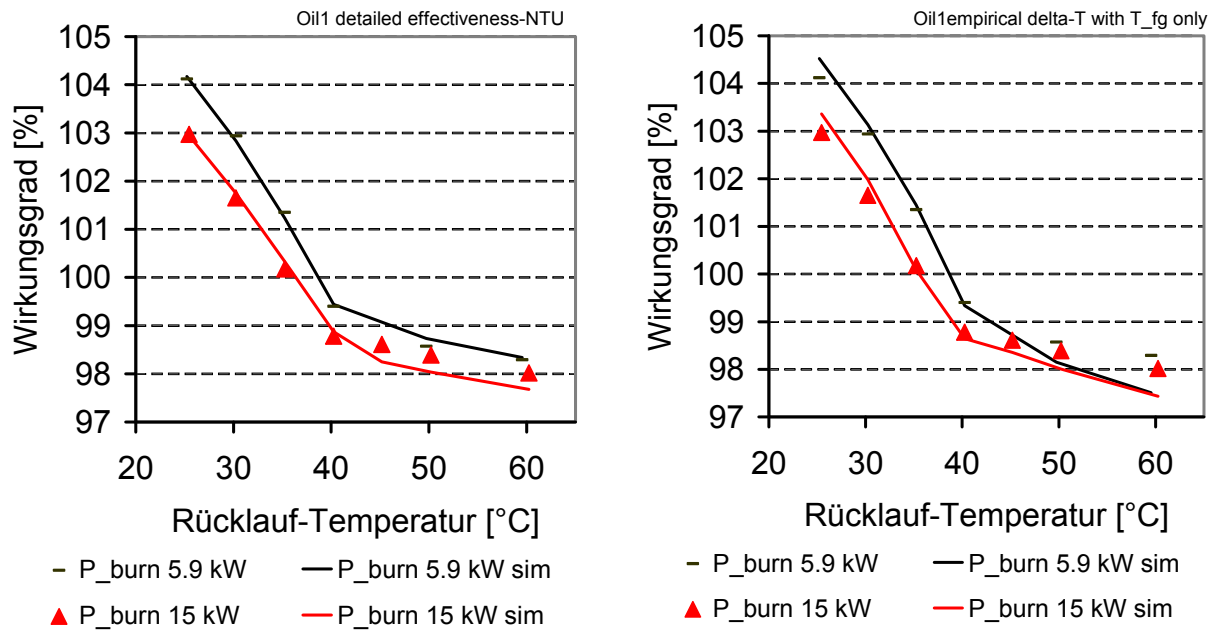


Abbildung 3: Simulation des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades bei verschiedener Rücklauf-Temperatur mit der detaillierten Effectiveness-NTU Methode (links) und mit der Methode der empirischen delta-T (rechts) für den Kessel Oil1. P_burn = Brennerleistung. sim = simulierte Werte.

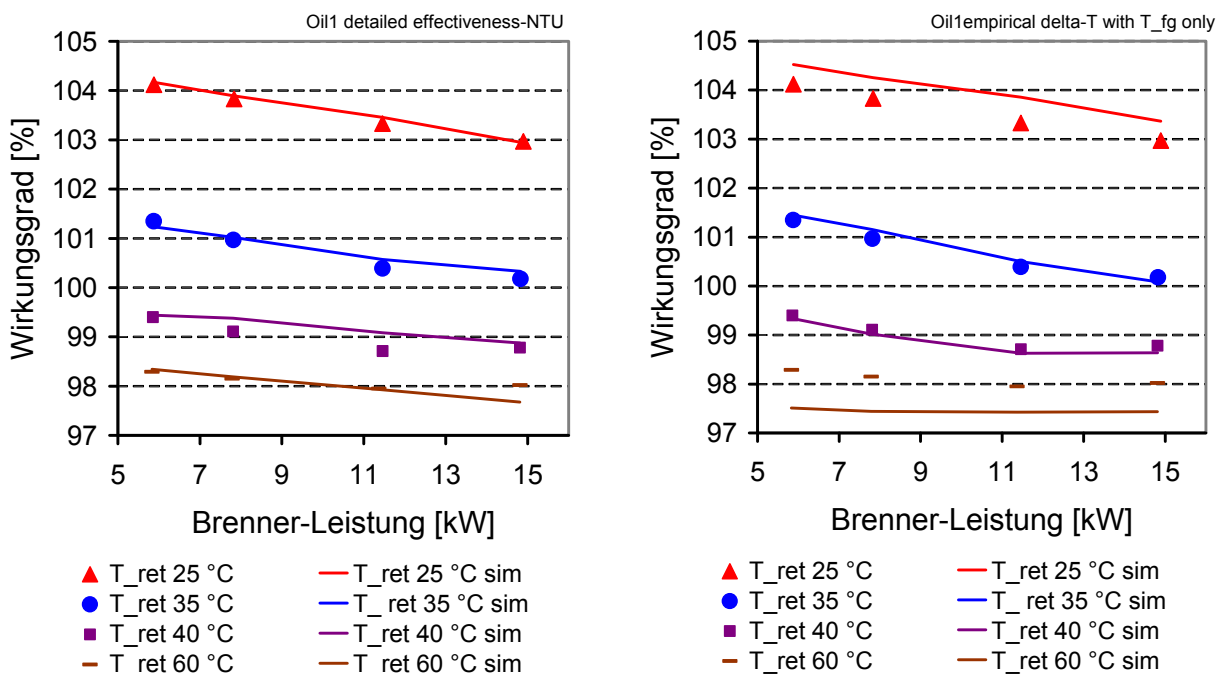


Abbildung 4: Simulation des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades bei verschiedener Brennerleistung mit der detaillierten Effectiveness-NTU Methode (links) und mit der Methode der empirischen delta-T (Modell 1a, rechts) für den Kessel Oil1. T_ret = Rücklauf-Temperatur. sim = simulierte Werte.

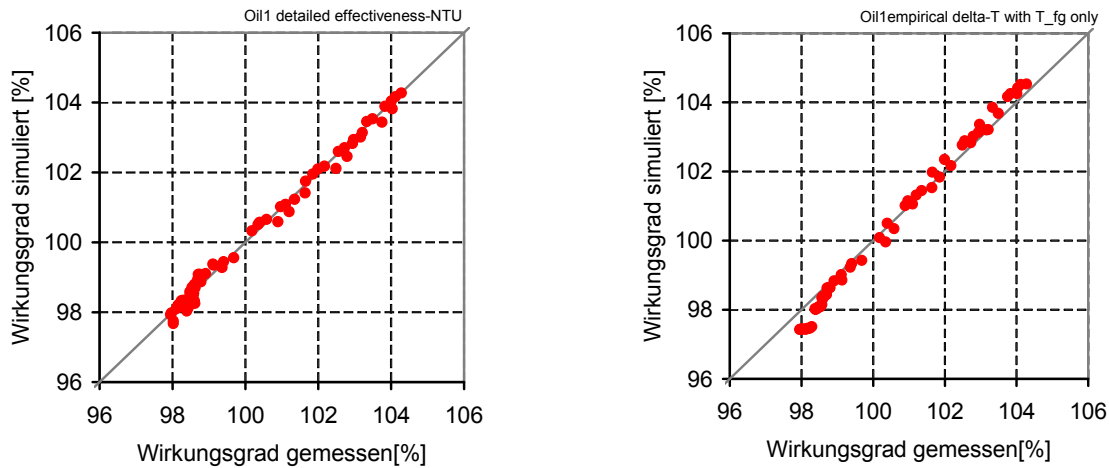


Abbildung 5: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Feuerungstechnischen Wirkungsgraden des Kessels Oil1 mit der detaillierten Effectiveness-NTU Methode (links) und mit der Methode der empirischen delta-T (Modell 1a, rechts).

Insgesamt liegen für diesen Kessel die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den gemessenen Werten sowohl mit der detaillierten Effectiveness-NTU – Berechnung, als auch mit der Methode der empirischen delta-T, in engen Grenzen (Abbildung 5).

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Kessel-Parameter, welche für die Simulation des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades eines Brennwertgerätes bestimmt werden müssen. Es ist ersichtlich, dass die Effectiveness-NTU Methode die genauere Abbildung der gemessenen Rauchgasverluste mit einer deutlich grösseren Anzahl Kessel-Parameter (+3 bis +4) erkaufte. Für nicht kondensierende Kessel ist dies anders. Bei diesen muss der Wärmeübertragungs-Widerstand in der Effectiveness-NTU Methode nicht in den rauchgasseitigen und den wasserseitigen Widerstand unterteilt werden. Dadurch benötigt die Abbildung nicht kondensierender Kessel in beiden Modellen die gleiche Anzahl Kessel-Parameter.

Tabelle 2: Anzahl Kessel-Parameter welche für die Ermittlung des Feuerungstechnischen Wirkungsgrades / der Rauchgasverluste benötigt werden.

beide Methoden (direkt aus Messwerten)

1. ppm Kohlenmonoxid im Rauchgas bei Vollast
2. ppm Kohlenmonoxid im Rauchgas bei Teillast
3. Luftüberschuss (λ) bei Vollast
4. Luftüberschuss (λ) bei Teillast
5. Maximale relative Feuchte des Rauchgases

gefittet:

detaillierte Effectiveness-NTU

6. Gasseitiger Wärmeübergangs-Widerstand bei Nennlast
7. Wasserseitiger Wärmeübergangs-Widerstand bei Nennlast
8. Gasseitiger Exponent für die Abhängigkeit des Wärmeübergangs-Widerstands vom Massenstrom
9. Wasserseitiger Exponent für die Abhängigkeit des Wärmeübergangs-Widerstandes vom Massenstrom
10. Faktor für die Veränderung des Gasseitigen Wärmeübergangs-Widerstandes bei feuchter Oberfläche
- (11. Bei Rauchgastemperaturen unterhalb der Rücklauf-Temperatur zusätzlicher Faktor für die Wärmeübertragung zwischen Verbrennungsluft und Rauchgas)

empirisches delta-T (Modell 1a)

6. delta-T bei Vollast
7. Abhängigkeit des delta-T von der Leistungs-Modulation

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ein physikalisch detailliertes Kesselmodell wurde für die Simulation von Öl-, Gas- und Biomasse-Kesseln entwickelt. Verschiedene Ansätze unterschiedlicher Komplexität wurden für die Simulation der Rauchgas-Verluste im stationären Zustand implementiert und getestet. Der detaillierte „Effectiveness-NTU“-Ansatz mit einer Aufteilung des Wärmetauschers in einen trockenen und einen feuchten Abschnitt konnte zwar am besten an die gemessenen Werte angepasst werden, benötigte jedoch speziell für Geräte mit Brennwert-Nutzung auf Grund der Unterteilung des Wärmetauschers in einen feuchten und einen trockenen Abschnitt eine grössere Anzahl anzupassender Modellparameter. Einfachere Modelle wie der empirische „delta-T“-Ansatz konnten nur dann zufriedenstellend an gemessene Werte angepasst werden, wenn der Einfluss der Leistungsmodulation auf die Temperaturdifferenz zwischen Kessel-Rücklauf und Rauchgas entsprechend berücksichtigt wurde. Für Systemsimulationen, in welchen der Fokus nicht auf dem Kessel selber liegt, scheint dieses Modell gut geeignet zu sein. Die wenigen Parameter, welche für diesen

delta-T Ansatz benötigt werden, können aus den Angaben in Standard-Prüfberichten von Heizkesseln berechnet werden. Zu beachten ist jedoch, dass dieses einfache Modell zum Beispiel keine Voraussagen treffen kann, inwiefern sich die Rauchgastemperatur bei einem Betrieb des Kessels mit konstant höherem Luftüberschuss verändern würde. Für Studien in welchen der Kessel selbst im Mittelpunkt der Untersuchungen steht kann das „Effectiveness-NTU“-Modell entscheidende Vorteile haben. Die Eignung für solche Studien ist jedoch noch entsprechend zu überprüfen.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass sowohl die Quantität und Qualität der verfügbaren Daten aus Leistungsmessungen als auch das Ziel der Simulationen, die Wahl eines geeigneten Kesselmodells entscheidend beeinflusst.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das neu entwickelte Kesselmodell die stationären Betriebsweisen der untersuchten kleinen bis mittleren Öl-, Gas- und Pelletskessel im Leistungsbereich von 3 kW_{th} (Teillast) bis 150 kW_{th} gut abzubilden vermag. Durch die Implementation des Modells in einer DLL (dynamic linked library), welche von der Software TRNSYS verwendet werden kann, ist dieses Modell ein wertvolles Werkzeug für Wissenschaftler und Planer, welche Simulationsprogramme für die Berechnung von Energiekennzahlen für Heizsysteme verwenden.

DANKSAGUNG

Die präsentierten Resultate basieren auf Arbeiten, welche unterstützt wurden durch das 6th EU Forschungs-Rahmenprogramm, Marie-Curie early stage research training network Advanced solar heating and cooling for buildings – SOLNET, sowie durch das Schweizerische Bundesamt für Energie BFE und das Österreichische Klima- und Energie-Fonds Programm "Energie der Zukunft".

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbole

ε Wärmeübertrager - Effectiveness, -

η Effizienz, -

\dot{m} Massenfluss, kg/s

Q Wärmemenge, J

\dot{Q} Wärmefluss, J/s

RMSE Root Mean Square Error

t Temperatur, °C

Tiefgestellt

<i>B</i>	Kessel
<i>hx</i>	Wärmetauscher (heat exchanger)
<i>in</i>	Kessel-Rücklauf (inlet)
<i>ms</i>	gemessen (measured)
<i>nom</i>	unter Standard-Bedingungen (nominal) bezüglich Wasser-Massenfluss und Brenner-Leistung
<i>out</i>	Austritt (outlet) von Kesselwasser oder Rauchgas
<i>sim</i>	simuliert
<i>wat</i>	Wasser (water)

Hochgestellt

<i>GHV</i>	basierend auf dem Brennwert (gross heating value)
<i>Hu</i>	basierend auf dem Heizwert

LITERATUR

- ASHRAE, 2005. Chapter 32 - Energy Estimating and Modeling Methods. In ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers.
- Baehr, H.D. 2005. Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen, Springer.
- Bourdouxhe, J., Grodent, M., Lebrun, J., Saavedra, C. 1994. A Toolkit for Primary HVAC System Energy Calculation - Part 1: Boiler Model. In ASHRAE Trans. 100(2). pp. 759-773.
- CEN, 2008. EN 15316-4-1:2008 (D) Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 4-1: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Verbrennungssysteme (Heizungskessel).
- Dachelet, M. 1987. Subroutine Type 7 – static boiler. Software code in FORTRAN.
- Dröscher, A. 2008. 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.
- Fiedler, F. & Persson, T. 2009. Carbon monoxide emissions of combined pellet and solar heating systems. Applied Energy, 86(2), 135-143.
- Haller, M. 2008. Type 869 Boiler Model, Version 4.02, 17.09.2008.
- Haller, M. & Konersmann, L. 2008. Energy efficiency of combined pellets and solar heating systems for single family houses. In Proceedings of World Bioenergy 2008, Jönköping, Sweden.

Haller, M., Konersmann, L. & Dröscher, A. 2008. Simulation von Öl-, Gas- und Pellet-Kessel in Kombination mit Solaranlagen. In: 18. Symposium Thermische Solarenergie. Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany, pp. 428 – 433.

Haller, M., Dröscher, A., Konersmann, L., Haberl, L., Frank, E. Comparison of different approaches for the simulation of boilers using oil, gas, pellets or wood chips. Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference, Glasgow 2009, accepted for publication.

Klein, S.A. et al. 2004. TRNSYS 16, A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison USA.

Konersmann, L., Haller, M., Vogelsanger, P. 2007. PelletSolar – Leistungsanalyse und Optimierung eines Pellet-Solarkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser. Im Auftrag des Bundesamt Für Energie, Schweiz.

Koschak, A., Fiedler, T., Knirsch, A., Beurer, C. 1998. TRNSYS-TYPE 370 Erweiterung des bisherigen Gaskesselmoduls um eine Holzkesselfeuerung mit der Möglichkeit zur Brennwertnutzung - Ergänzung um einen Simulationsmodus zur realitätsnahen Simulation des Betriebsverhaltens von Gaskesseln mit Takten.

Lebrun, J. Saavedra, C., Hore, F., Grodent, F., Nusgens, P., 1993. Testing and Modeling of Fuel Oil Space-Heating Boilers - Synthesis of Available Results. In ASHRAE Trans. 99(2), pp. 455-464.

Lebrun J. 2007. Personal communication by email, June 26th 2007.

Paulsen, O. 1999. Technical report Work package I: Modelling of part load efficiency - second revised edition - SAVE Project: Annual Efficiency Calculation Method for Domestic Boilers - Contract No. XVII/4.1031/93-008 - Funded by the European Union, SAVE programme - Directorate-General for Energy.

Persson, T., Fiedler, F., Nordlander, S., Bales, C., Paavilainen, J. 2009. Validation of a dynamic model for wood pellet boilers and stoves. Applied Energy, 86(5), pp. 645-656.

Thornton, J.W. 2004. TRNSYS Type 751 – Simple boiler with efficiency from data file. Software from TESS – Thermal Energy Systems Specialists, <http://www.tess-inc.com>.