

TRANSSOLAR Fehler! Unbekanntes Schalterargument.

ENERGIETECHNIK GmbH

Technologien zur rationellen Energienutzung und Solartechnik

Nobelstr. 15

70569 Stuttgart

Telefon: 0049 / (0) 711/67976-0

Fax: 0049 / (0) 711/67976-11

TRNSYS-TYPE 370

Erweiterung des bisherigen Gaskesselmoduls
um eine Holzkesselfeuerung mit der Möglichkeit
zur Brennwertnutzung

TRANSSOLAR

Nobelstraße 15

70 569 Stuttgart

Tobias Fiedler, A. Knirsch

Original-Version 1.0 von C. Beurer

November 1996

Ergänzung um einen Simulationsmodus zur realitätsnahen
Simulation des Betriebsverhaltens von Gaskesseln mit
Takten

Angelika Koschak

HTWS Zittau/Görlitz (FH)

August 1998

1. Einleitung

In Anbetracht der Treibhausproblematik und der daraus folgenden Zielsetzung der CO₂-Emissionsreduktion gibt es Bestrebungen, vermehrt Biomasse - beispielsweise in Form von Holzabfällen (Pellets, Hackschnitzel) - zur Energiegewinnung einzusetzen. Aufgrund niedriger Preise der konventionellen Energieträger werden Biobrennstoffe bisher lediglich eingeschränkt genutzt. Dennoch schneidet Biomasse im Kostenvergleich mit anderen regenerativen Energien gut ab.

Das Energiepotential aus Holz- und Strohreststoffen bezogen auf den Endenergieverbrauch liegt in Deutschland bei rund 3,8 %. Hier entstehen erst allmählich die ersten Heizkraftwerke auf Biomassebasis - meist im Rahmen von Demonstrationsanlagen. In anderen europäischen Ländern ist man schon etwas weiter:

Allein in Österreich und Südtirol waren bis zum Jahresende 1993 über 200 Biomasse-Nahwärmanlagen mit einer Gesamtleistung von mehr als 320 MW in Betrieb. Die meisten dieser Anlagen besitzen eine Nennleistung zwischen 0,5 und 5 MW.

Die alleinige Brauchwasserbereitung im Sommer erfordert nur einen Bruchteil der notwendigen Winter-Kesselleistung. Dabei ist ein Biomassekessel nur bis ca. 20-25 % seiner Nennleistung mit einem vertretbaren Wirkungsgrad und akzeptablen Emissionswerten zu betreiben. Deswegen werden die meisten Biomasse-Nahwärmenetze nur in der Übergangs- und Heizperiode eingesetzt.

So bietet sich eine Kombination mit einer zentralen thermischen Solaranlage an, die die Warmwasserbereitung im Sommer bei stillgelegtem Kessel übernimmt. Voraussetzung ist eine geeignete Netzstruktur mit hinreichend kurzen Entfernungen und niedrigem Temperaturniveau.

Aus diesen Gegebenheiten resultiert die Überlegung, unterschiedliche Anlagenkonfigurationen mit Hilfe der notwendigen TRNSYS-Types detailliert zu modellieren und in Abhängigkeit des Standortes und der Abnehmer dynamisch zu simulieren. Neben der Modellierung des Nahwärmenetzes (Berücksichtigung der Mediumtemperaturen, Erdreichumgebungstemperatur,...) fehlte bisher ein geeigneter Type zur Simulation des Holzfeuerkessels.

Eine entsprechende Anlage ist in Abbildung 2 schematisch skizziert.

Die Modellierung der Holzkesselfeuerung basiert auf dem bisherigen TRNSYS-Type 370, der das Modell eines Gaskessels enthält. Das Takten der Holzfeuerung verläuft nach demselben Prinzip wie das einer Gasfeuerung. Deshalb soll auf diesen Aspekt hier nicht näher eingegangen werden.

Für Fragestellungen, die das Modell bzw. den TRNSYS-Type des Gasbrennwertkessels betreffen, sei auf das Manual des Gaskessels verwiesen.

2. Theorie

Anders als bei Gas und Öl - diese werden großtechnisch aufbereitet und entsprechen daher als Brenn- und Treibstoffe definierten Standards - unterliegt die Dichte, die Zusammensetzung und der auf das Volumen bezogene Heizwert von Holz einer relativ großen Variationsbreite.

Die Holzeigenschaften sind abhängig von

- der Holzart (Rindenanteil, Nadelholz, Laubholz,...)
- und der Holzfeuchtigkeit¹ u [%] .

Der Heizwert von absolut trockenem Holz variiert jedoch wenig zwischen den einzelnen Holzarten. Man ordnet ihm deshalb einen konstanten, mittleren Wert von $h_{u,atr} = 18.5 \text{ MJ/kg} = 5.15 \text{ kWh/kg}$ zu. Damit ist der Heizwert näherungsweise nur noch von der Holzfeuchtigkeit abhängig. Er läßt sich berechnen mit der Gleichung [1]:

$$h_u = \frac{18500 - 2501 \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1)$$

Der Faktor 2501 kJ/kg beschreibt die Verdampfungsenthalpie von Wasser bei Normtemperatur ($\vartheta = 0.01 \text{ °C}$). Der Wassergehalt von Holz kann der Tabelle 1 in Abhängigkeit der Attribute - wasserfrei, getrocknet, lufttrocken, waldtrocken und erntefrisch - entnommen werden. Mit Hilfe der Tabelle 2 kann der Wassergehalt w in die Holzfeuchtigkeit u umgerechnet werden.

Ein weiteres Problem ist die zeitlich nicht konstante Brennstoffzusammensetzung von Holzfeuerungen im Chargenbetrieb. Wie in der Abbildung 3 zu erkennen ist, bleibt die Holzzusammensetzung über weite Strecken des Abbrandes konstant. Erst in der Ausbrandphase wird Holz zu Holzkohle und schließlich in Asche umgewandelt. Geht man von einer automatischen, geregelten Brennstoffzufuhr aus, wie es bei größeren, den hier behandelten Anlagen üblich ist, so kann man in guter Näherung von einer zeitlich konstanten Brennstoffzusammensetzung ausgehen. Sie gehorcht dann der chemischen Formel CH_mO_n :

mit $m = 1.44$ und $n = 0.66$. Dies entspricht einer Zusammensetzung von 50 Gew-% Kohlenstoff, 6 Gew-% Wasserstoff und 44 Gew-% Sauerstoff.

Stellt man mit diesen Annahmen die chemische Gesamtgleichung der Oxidation von Holz auf und faßt zusammen, so läßt sich die Brennstoffkonstante A definieren:

$$A = 1 + \frac{m}{4} + \frac{n}{2} = 1.03 \quad (2)$$

¹Es wird unterschieden zwischen der **Holzfeuchtigkeit** u und dem **Wassergehalt** w . Der Wassergehalt wird als das Verhältnis aus kg _Wasser zu kg _feuchtem Holz definiert. Die Holzfeuchtigkeit dagegen bezeichnet das Verhältnis aus kg _Wasser zu kg _absolut trockener Holzsubstanz. Beide Angaben erfolgen in %.

Die Brennstoffkonstante beschreibt den Sauerstoffbedarf für die vollständige Verbrennung von einem Mol Brennstoff obiger Zusammensetzung.
Mit dem Luftüberschuß

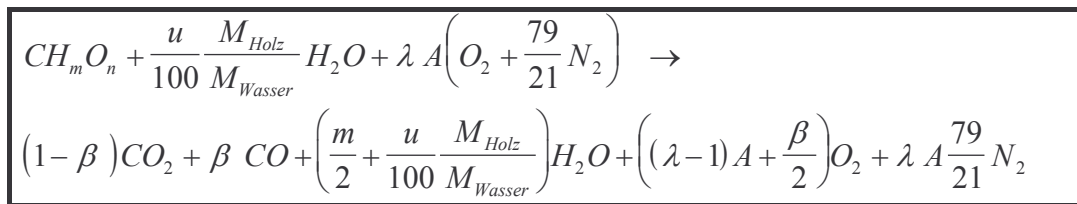
$$\lambda = \frac{\textit{tatsächliche Luftmenge}}{\textit{stöchiometrisch notwendige Luftmenge}}$$

und dem Koeffizienten

$$\beta = \frac{[CO]}{[CO]+[CO_2]}$$

ergibt sich die chemische Reaktionsgleichung (3) der Holzverbrennung [3]. Aus ihr sind die stöchiometrischen Koeffizienten des Abgases herauszulesen.

Der Koeffizient β , der vom Nutzer anzugeben ist, gibt den Kohlenmonoxidgehalt des trockenen Abgases bezogen auf den C-Gehalt im Brennstoff wieder. Er drückt damit die Güte der Verbrennung aus. Fällt kein CO an, ist die Oxidation vollständig bzw. die Verbrennung ideal.



(3)

Der Reaktionsgleichung sowie den Wirkungsgradberechnungen liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Alle Kohlenwasserstoffe (Dioxine, Furane, ...) im Ruß und Abgas werden vernachlässigt. Die unvollständige Verbrennung wird nur durch die Bildung von Kohlenmonoxid berücksichtigt.
- Weitere Schadstoffe wie Stickoxide und Schwefeldioxid gehen ebenfalls nicht in die Berechnung mit ein.
- Alle Abgase verhalten sich wie ideale Gase, d.h. der Druck wird als konstant angenommen, die Druckabhängigkeit im Verlauf der weiteren Berechnung vernachlässigt.
- Die Verbrennungsluft besteht aus 21 Vol-% Sauerstoff und 79 Vol-% Stickstoff. Die Luftfeuchtigkeit der Verbrennungsluft wird damit mit 0 angenommen.

2.1 Die Wirkungsgrade

Mit Hilfe der thermischen und chemischen Verluste läßt sich der feuerungstechnische Wirkungsgrad bestimmen. Wichtige Einflußgrößen für diesen Wirkungsgrad sind

- die Abgastemperatur
- der Luftüberschuß λ
- und der CO-Gehalt der Abgase.

Im Kesselwirkungsgrad sind außerdem noch die Strahlungsverluste während des Feuerungsbetriebes sowie die Rostverluste der Asche enthalten.

Strahlungs-, Rost- und Betriebsbereitschaftsverluste gehören zu den Herstellerangaben eines Kessels und sollen hier nicht weiter diskutiert werden. Nur soviel: Dem TRNSYS-Type werden diese Angaben über die Inputliste zur Verfügung gestellt. Dabei sind die Rost- und Strahlungsverluste zu einem Koeffizienten zusammengefaßt.

Die thermischen Verluste

Die Enthalpiedifferenz des Abgases, die aufgrund der Abkühlung des Abgases von der Wärmetauscher ausström- auf Umgebungstemperatur auftritt, beschreibt die thermischen Verluste eines Kessels. Es wird angenommen, daß alle Abgaskomponenten im betrachteten Temperaturbereich gasförmig sind, und es zu keiner Kondensation kommt. Berücksichtigung findet daher nur die sensible Wärme der folgenden i Abgaskomponenten:

- Kohlendioxid
- Kohlenmonoxid
- Sauerstoff
- Wasserdampf
- Stickstoff.

Unter diesen Voraussetzungen kommt man zur Gleichung, die die thermischen Verluste beschreibt [3].

$$V_{therm} = 100 \frac{\int_{T_{amb}}^{T_{abg}} \sum_i v_i C_{p_i}(T) dT}{M_{Br} h_u} \quad [\%] \quad (4)$$

Die stöchiometrischen Koeffizienten v_i des Abgases können für alle i Komponenten der Reaktionsgleichung (3) entnommen werden. Da mit Ausnahme der spezifischen Wärmekapazität alle Größen von T unabhängig sind, lassen sie sich vor das Integral schreiben. Das Integral über die spezifischen Wärmekapazitäten wird mit Hilfe eines Polynoms approximiert (T in K) [7].

$$\Delta h_i = \int C_{p_i}(T) dT = a_i (T_{abg} - T_{amb}) + \frac{b_i}{2} (T_{abg}^2 - T_{amb}^2) + \frac{c_i}{3} (T_{abg}^3 - T_{amb}^3) \quad [\text{kJ/kmol}]$$

Eine weitere Größe in der Gleichung (4) ist die Molmasse des Brennstoffes [3]

$$M_{Br} = M_{Holz} \left(1 + \frac{u}{100} \right) \quad [\text{kg/kmol}]$$

wobei $M_{Holz} = 24 \text{ kg/kmol}$ für die Molmasse von absolut trockenem Holz der oben gegebenen Zusammensetzung steht.

Die chemischen Verluste

Die chemischen Abgasverluste beschreiben die Verluste aufgrund unvollständiger Verbrennung. Die nicht völlig oxidierten Abgaskomponenten - Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid - leisten keinen Beitrag zur freiwerdenden Reaktionsenthalpie. Hier wird jedoch nur das anfallende CO berücksichtigt.

Geht man von einem unteren, volumenbezogenen Heizwert $h_{u,CO} = 11567 \text{ kJ/m}^3$ (bei einem Druck von 1.013 bar und einer Temperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$) aus, so lassen sich die chemischen Verluste wie folgt berechnen [3]:

$$V_{chem} = 100 \frac{[CO] V_{Atr} h_{u,CO}}{h_u} \quad [\%] \quad (5)$$

Das trockene Abgasvolumen V_{Atr} [$\text{m}^3_{\text{Abgas}}/\text{kg}_{\text{Brennstoff}}$] berechnet sich aus dem Normvolumen, der Molmenge des trockenen Abgases der Reaktionsgleichung (3) und dem Molgewicht des feuchten Brennholzes. Der Volumenanteil von Kohlenmonoxid im trockenen Abgas ist mit Hilfe von β bestimmbar.

Eventuelle Rostverluste durch den Ascheabzug können mit Hilfe der chemischen Verluste berücksichtigt werden.

Die Strahlungsverluste

Die Strahlungsverluste werden in Abhängigkeit von der Anlagenbelegung, der mittleren Heizmitteltemperatur und der Umgebungstemperatur berechnet. Als Herstellerangaben sind hierbei die maximale Heizmitteltemperatur und ein Strahlungsverlust-Koeffizient, der sich auf die maximale Kesselleistung bezieht, notwendig. Für die Kesselwirkungsgradbestimmung werden die Strahlungsverluste auf den Heizwert bezogen. Strahlungsverluste treten nur bei Betrieb des Brenners auf. Die Betriebsbereitschaftsverluste werden analog berechnet.

Die Abgaskondensation

Anlagen mit Abgaskondensation werden auch als Brennwertkessel bezeichnet. Durch die Abkühlung des Abgasstromes auf Temperaturen unterhalb des Taupunktes kann der Teil der Energie, welche in der Feuerung für die Verdampfung des Brennholzwassers aufgebracht werden mußte, zurückgewonnen werden. Entsprechendes gilt für das während der Reaktion entstandene Wasser.

Anstelle des Heizwertes kann somit der um die Verdampfungswärme des kondensierten Wassers erhöhte Brennwert genutzt werden. Voraussetzungen für eine Abgaskondensation sind:

- Die Abgaskondensation lohnt sich lediglich bei Anlagen ab einer Feuerungsleistung von mehr als 500 kW. Der Grund liegt in der Verbrennungsregelung, die für einen bestimmten Luftüberschuß zu sorgen hat. Außerdem verlangt die Abgaskondensation nach korrosionsbeständigen und daher teureren Werkstoffen im Abgaswärmetauscher und Kamin.
- Der Luftüberschuß sollte bei einem $\lambda < 1.8$ liegen.
- Die Rücklaufemperatur des Heizsystems muß mindestens 10 °C unter dem Taupunkt der Abgase liegen.
- Der Wassergehalt w des eingesetzten Brennholzes sollte nicht unter 30 % bzw. die Holzfeuchtigkeit u nicht unter 43 % liegen.

Das Kondensat kann bei hoher Verbrennungsqualität ($[\text{CO}] < 250 \text{ mg/Nm}^3$, 11 Vol-% O_2) ohne Vorbehandlung in die Kanalisation eingeleitet werden.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der latenten Wärme der Abgaskondensation ist die folgende:

Mit Hilfe von Polynomen werden der Sättigungsdruck und die Verdampfungswärme in Abhängigkeit von der Abgastemperatur [6] sowie die Taupunkttemperatur in Abhängigkeit der Wasserdampf-Volumenkonzentration [5] im Abgas berechnet.

Liegt der tatsächliche Wasserdampfpartialdruck über dem Sättigungsdruck, so kondensiert Wasser aus, bis der Partialdruck dem Sättigungsdruck entspricht. Die auskondensierte Molmenge an Wasser pro Mol absolut trockenens Brennholz berechnet sich aus Gleichung (6), indem man nach n_{kond} auflöst.

$$x_{W_sat} = \frac{p_{W_sat}}{p_{amb}} = \frac{v_W - n_{kond}}{n_{abg} - n_{kond}} \quad (6)$$

Aus dieser Größe ist mit Hilfe der Molmasse von Wasser und Brennholz die auskondensierte Wasserdampfmasse bezogen auf 1 kg Brennstoff zu bestimmen. Der Wärmegewinn durch Abgaskondensation gehorcht damit der Gleichung:

$$V_{kond} = 100 \frac{r(\mathcal{G}_{RL}) m_{kond}}{h_u} \quad [\%] \quad (7)$$

Die Verdampfungsenthalpie bezieht sich auf die Rücklaufemperatur, da das Kondensat bei dieser Temperatur anfällt.

Für die Wirkungsgrade folgt nun letztendlich:

1. Feuerungswirkungsgrad [2]

$$\eta_F = 100 - V_{therm} - V_{chem} + V_{kond} \quad [\%]$$

2. Kesselwirkungsgrad [2]

$$\eta_K = \eta_F - V_{rad} \quad [\%]$$

Mit den bisher vorgestellten Größen und Gleichungen sind alle weiteren Größen wie die Heizleistung, der Massenstrom des Heizmittels, anfallende Kondensatmenge, Abgasvolumen, ..., berechenbar.

3. Type - Beschreibung

In der nachfolgenden Abbildung ist die Parameter-, In- und Outputliste des TRNSYS-Type 370 schematisch dargestellt. Die Ausgabe besteht aus 29 Outputs. Ausserdem werden 13 Parameter und 9 Inputs vom Programm verlangt und abgefragt. Eine eingehendere Beschreibung der Liste ist nachfolgend aufgeführt.

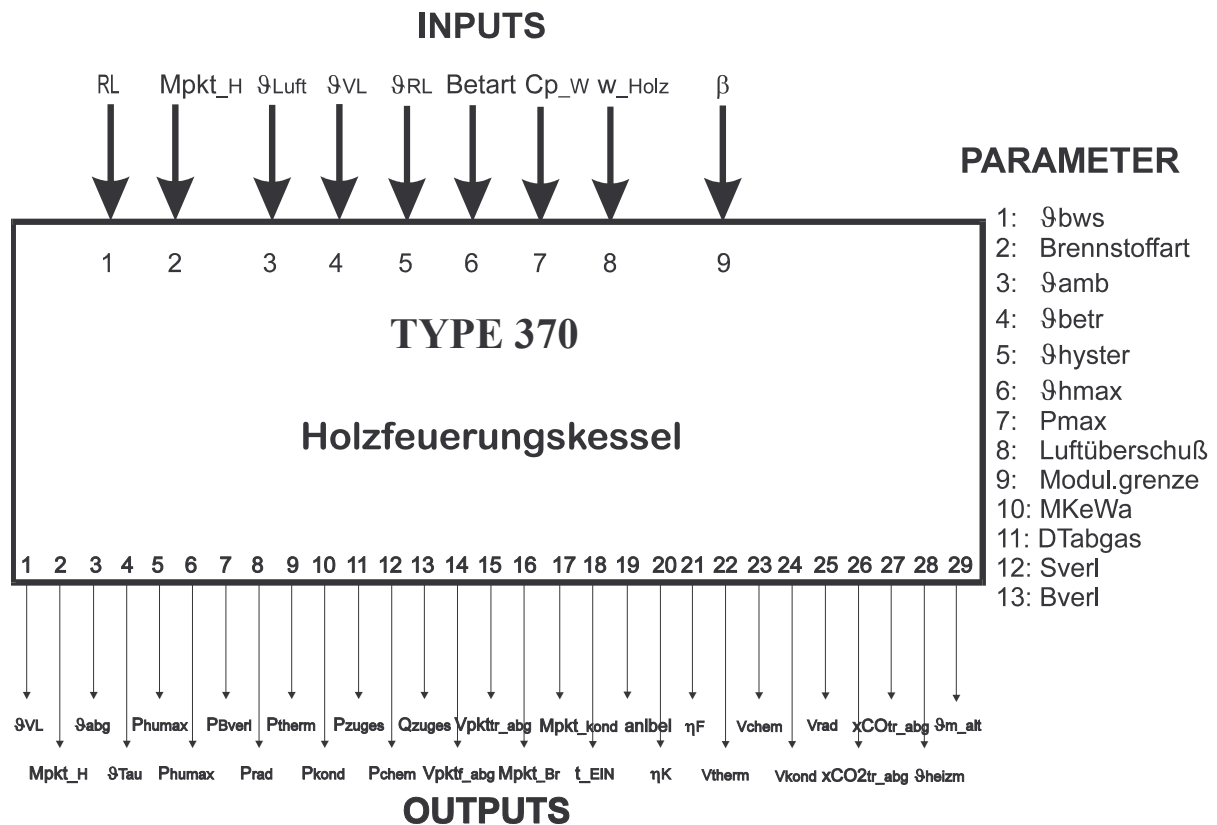


Abb.1: Schematische Ein- und Ausgabeliste des Type 370 für den Holzfeuerungskessel

Beschreibung der PARAMETER, INPUT und OUTPUT-Liste des TYPE 370 Gas- und Holzkessel mit Möglichkeit zur Brennwertnutzung

PARAMETER 13

- | | | |
|----|---|------|
| 1 | Vorlauftemp. ϑ_{bws} für Brauchwasser-Wärmetauscher
Dieser Parameter ist lediglich von Bedeutung, falls der 6.
Inputwert Betart , der die Betriebsart bestimmt, die Größe 0
besitzt. | °C |
| 2 | Brennstoffart 1 = Erdgas L, 2 = Erdgas H, 3 = Flüssiggas, 4 = Holz | No. |
| 3 | Raumtemperatur ϑ_{amb} in Kesselumgebung | °C |
| 4 | Betriebsbereitschaftstemperatur ϑ_{betr} des Kessels
Ist der Brenner nur in Bereitschaftsbetrieb, so wird der Kessel nach
Unterschreiten einer Hysteresetemperatur wieder auf
Betriebsbereitschaftstemperatur gebracht. | °C |
| 5 | Hysterese ϑ_{hyster} für Parameter 4 | °C |
| 6 | Maximale mittlere Kesselwassertemperatur ϑ_{hmax}
Diese Temperatur dient der Berechnung der maximalen Strahlungs-
und Betriebsbereitschaftsverlusten. | °C |
| 7 | Maximale Heizleistung P_{max} | kJ/h |
| 8 | Luftüberschußzahl λ
ca. 1.1 - 1.3 für Gaskessel
ca. 1.5 - 2.5 für Holzkessel s. auch Tabelle 3 | - |
| 9 | untere Modulationsgrenze | % |
| 10 | Kesselwasserinhalt MKeWa
Mit Hilfe des Kesselwasserinhaltes kann zusätzlich die Masse
des Kessels selbst berücksichtigt werden. | kg |
| 11 | D_{Tabgas} beziffert die Temperaturdifferenz zwischen Abgas
und Rücklauf im Wärmetauscher. | °C |
| 12 | Strahlungsverlust S_{verl} (Herstellerangaben)
Der Koeffizient beziffert die maximalen Strahlungsverluste
bezogen auf die maximale Heizleistung des Kessels. | % |
| 13 | Betriebsbereitschaftsverlust B_{verl} (Herstellerangaben)
Der Koeffizient bestimmt die Betriebsbereitschaftsverluste.
Die Verluste sind ebenfalls auf die maximale Kesselleistung bezogen. | % |

INPUTS 9

1	RL	aktuelle Rücklauftempertur RL	°C
2	Mpkt_H	Massenstrom des Heizmittels	kg/h
3	ϑLuft	Temperatur der zugeführten Verbrennungsluft	°C
4	ϑVL	Soll-Vorlauftemperatur des Reglers	°C
5	ϑRL	Soll-Rücklauftemperatur des Reglers	°C
6	BtrArt	Betriebsart 0=Brauchwasser; 1=Heizung und Brauchwasser	No.
7	Cp_w	Spezifische Wärmekapazität des Heizmassenstromes Wasser Cp < 0.0 => die Wärmekapazität wird programmintern Bestimmt Cp > 0.0 => die Wärmekapazität wird mit dem hier angegebenen Wert belegt.	kJ/kg/K

Man beachte: Falls in der Simulation an anderer Stelle nochmals die Wärmekapazität des Heizmittels verwendet wird, sollte Cp_w an dieser Stelle mit demselben Wert wie innerhalb des anderen TRNSYS-Types belegt werden !

Die beiden folgenden Inputs sind nur für die Holzfeuerung notwendig.

8	w_Holz	Wassergehalt des Holzes Der Wassergehalt wird intern in die Holzfeuchtigkeit umgerechnet.	%
9	β	CO-Gehalt des Abgases bezogen auf den C-Gesamtgehalt des Holzes. Der Koeffizient bestimmt den Grad der unvollständigen Verbrennung, d.h. $\beta = 0$ => vollständige Oxidation des Kohlenstoffes zu CO ₂ $\beta = 1$ => gesamtes C lediglich zu CO oxidiert	%

OUTPUTS 29

1	ϑVL	Vorlauftemperatur in den Kessel	°C	
2	Mpkt_H	Massenstrom des Heizmittels	kg/h	
3	ϑabg	Abgastemperatur im Eintritt des Wärmetauschers	°C	
4	ϑTau	Taupunkttemperatur zu Beginn der Kondensation	°C	
5	Phomax	gesamte zugef. Wärmemenge (auf H _o bezogen)	kJ/h	
6	Phumax	gesamte zugef. Wärmemenge (auf H _u bezogen)	kJ/h	
7	PBverl	Betriebsbereitschaftsverluste	kJ/h	
8	Prad	Strahlungsverluste bei Betrieb des Brenners	kJ/h	
9	Ptherm	Wärmeverluste des Abgases	kJ/h	
10	Pkond	durch Kondensation gewonnener Wärmestrom	kJ/h	
11	Pzuges	unter Berücksichtigung des Kesselwirkungsgrades zugeführter Wärmestrom	kJ/h	
12	Pchem	durch unvollständige Oxidation verursachte Verluste	kJ/h	*
13	Qzuges	dem Heizkreislauf zugeführte Wärme	kJ	
14	Vpktf_abg	Volumenstrom des feuchten Abgases	m ³ /h	
15	Vpktr_abg	Volumenstrom des trockenen Abgases	m ³ /h	
16	Verbr	Gasverbrauch bei Gas als Brennstoff	m ³ /h	
16	Mpkt_Br	Massenstrom des Brennholzes bei Holzfeuerung	kg/h	
17	Mpkt_kond	Massenstrom des anfallenden Kondensats	kg/h	
18	t_Ein	Einschaltdauer während einer Taktzeit	h/h	
19	anlbel	Anlagenbelegung	%	
20	ηκ	Kesselwirkungsgrad bezogen auf H _u	%	
21	ηF	Feuerungswirkungsgrad bezogen auf H _u	%	
22	Vtherm	Thermische Verluste des Abgases bezogen auf H _u	%	*
23	Vchem	Chemische Verluste durch unvollst. Verbrennung bezogen auf H _u	%	*
24	Vkond	Gewinne durch Abgaskondensation bezogen auf H _u	%	*
25	Vrad	Radiative Verluste bezogen auf H _u	%	
26	xCO2tr_abg	Volumenkonzentration an CO ₂ im trockenen Abgas	%	
27	xCOtr_abg	Volumenkonzentration CO im trockenen Abgas	%	
28	ϑHeizm	mittlere Heizmitteltemperatur im Kessel	°C	
29	ϑm_alt	mittlere Heizmitteltemperatur im vorherigen Schritt	°C	

Die mit einem ‘ * ‘ versehenen Outputs stehen nur bei Holzfeuerung zur Verfügung.

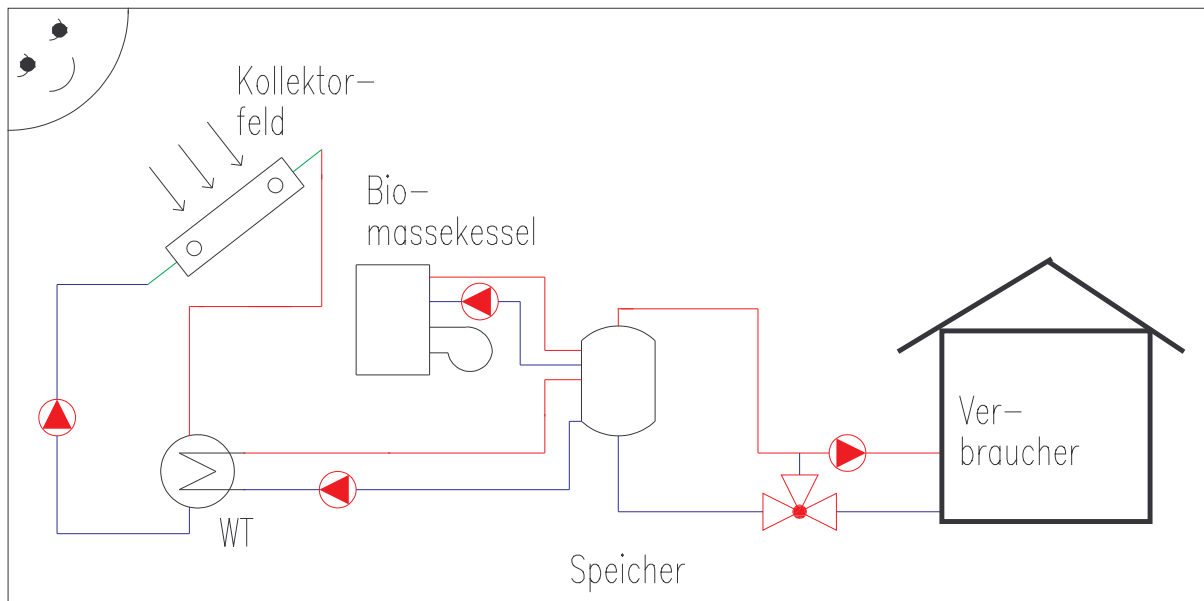


Abb.2: Solares Nahwärmenetz kombiniert mit einem Biomassekessel für die Heizperiode.

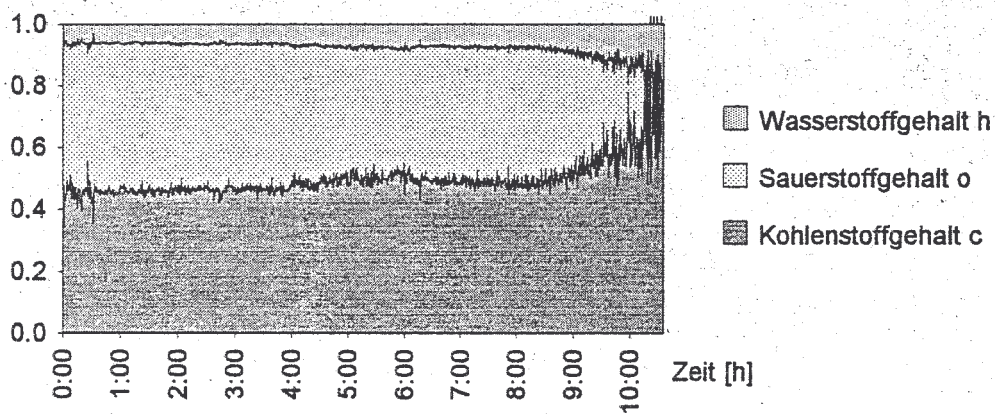


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der Brennstoffzusammensetzung während eines typischen Abbrandes von Holz [4].

	wasserfrei	getrocknet	lufttrocken	walddtrocken	erntefrisch
Wassergehalt w des Holzes [%]	0	10	17	30	50

Tabelle 1: Typische Werte des Wassergehaltes von Holz in Abhängigkeit beschreibender Attribute.

bekannt	unbekannt	u [%]	w [%]
u [%]		-	$w = \frac{u}{100 + u} 100$
w [%]		$u = \frac{w}{100 - w} 100$	-

Tabelle 2: Umrechnungstabelle für Wassergehalt w und Holzfeuchtigkeit u.

			TA Luft (ab 1 MW)
Luft-überschuß	Ziel	1.5 - 1.8	
	typisch	1.5 - 2.5	
Abgas-temperatur	Ziel	< 160 °C	
	typisch	120 - 250 °C	
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	Ziel	92 %	
	typisch	80 - 90 %	
CO	< 1 MW	typisch	250 mg/Nm ³
	< 5 MW	typisch	
NO_x	Holzschnitzel	typisch	500mg/Nm ³
	Restholz	typisch	
Staub	typisch	< 150mg/Nm ³	150mg/Nm ³

Tabelle 3: Typische Emissions- und Betriebswerte automatischer Holzfeuerungen mit Zyklon, ohne Abgaskondensation.

Formelzeichen

Lateinische Zeichen

A	-	Brennstoffkonstante
C _p	kJ/kmol/K	spezifische Wärmekapazität
[CO]	-	Volumenkonzentration im trockenen Abgas
h _u	kJ/kg	Heizwert
m _{kond}	kg/kmol	Masse des kondensierten Wassers
M _{Br}	kg/kmol	Molmasse feuchtes Holz
M _{Holz}	kg/kmol	Molmasse absolut trockenes Holz
n	kmol	Molmenge
p	N/m ²	Druck
r	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie von Wasser
T _{abg}	°C	Abgastemperatur
T _{amb}	°C	Umgebungstemperatur
u	%	Holzfeuchtigkeit
V	%	Verluste
w	%	Wassergehalt

Griechische Zeichen

β	-	Grad der unvollständigen Verbrennung
η	%	Wirkungsgrad
λ	-	Luftüberschuß
ν	-	stöchiometrischer Koeffizient
ϑ _{RL}	°C	Rücklauftemperatur

Indices

abg	-	Abgas
amb	-	Umgebung
Atr	-	trockenes Abgas
Br	-	Brennstoff bzw. feuchtes Holz
chem	-	chemisch
F	-	Feuerungswirkungsgrad
Holz	-	absolut trockenes Holz
K	-	Kesselwirkungsgrad
kond	-	Abgaskondensation, Kondensat
rad	-	radiativ
RL	-	Rücklauf
sat	-	Sättigung
therm	-	thermisch
VL	-	Vorlauf
W	-	Wasser

Literaturverzeichnis

- [1] Baumbach G., Angerer M., Zuberbühler U., Straub D., „Schadstoffemissionen gewerblicher und industrieller Holzfeuerungen“, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart, 1996
- [2] Nussbaumer Th., Good J., Jenni A., Koch P., „Projektieren automatischer Holzfeuerungen“, Pacer, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern 1995
- [3] Good J., Nussbaumer Th., „Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen“, DIANE 7, Bern 1993
- [4] Wagner D., Nussbaumer Th., „Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen“, BEW, Bern 1994
- [5] Heinisch R., Klose W., Schütt E., „Wirkungsgrad und Abgasverlustgrad von Brennwertkesseln“, Institut für Chemieingenieurtechnik, Technische Universität Berlin, HLH Bd. 38, März 1987
- [6] Recknagel, Sprenger, Schramek, „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“, Oldenbourg, 1994/1995
- [7] Smith J. M., Van Ness H. C., „Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics“, 2d edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1959