

Energie- und Stoffströme am Holzpellettheizkessel

Regenerative Wärmetechnik (RWT), Laborversuch Pelletkessel

24. Juni 2022

| | | |
|---------------------|---------------------------|--------|
| Verfasser: | Julia Metla | 563309 |
| | Azarya Ekaputra Arkyoda | 564507 |
| | Yousef Mahmoud | 565158 |
| | Martin Teichert | 564191 |
| Studiengang: | Regenerative Energien | |
| Semester: | SoSe 2021/22 | |
| Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Mirko Barz | |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|---|
| Abbildungsverzeichnis | 2 |
| 1 Erläuterung der Symbole, Formelzeichen und Indizes | 3 |
| 2 Einführung | 4 |
| 3 Messwerte | 4 |
| 4 Auswertung | 5 |
| 4.1 Berechnung der zugeführten Energie durch den Brennstoff | 5 |
| 4.2 Berechnung der abgeführten Nutzwärme | 5 |
| 4.3 Berechnung der Abstrahlverluste | 5 |
| 4.4 Berechnung der Abgasverluste | 6 |
| 4.5 Energiebilanz im Sankey-Diagramm | 8 |
| Literaturverzeichnis | 9 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|---|
| 1 Sankey-Diagramm für den durchgeführten Pelletkesselversuch | 8 |
|--|---|

1 Erläuterung der Symbole, Formelzeichen und Indizes

| Symbol | Einheit | Bezeichnung |
|-------------------|--|--|
| \dot{H}_i | W | Enthalpiestrom Brennstoff |
| \dot{m}_{Br} | kg/h | Massenstrom Brennstoff |
| H_i | kWh/kg | Heizwert Pellets |
| Δm | kg | Brennstoffverbrauch |
| Δt | h | Versuchszeitraum |
| \dot{Q}_{Nutz} | W | Nutzwärmeleistung |
| \dot{m}_{Kreis} | kg/s | Massenstrom im Heizwasserkreislauf |
| c_{p,H_2O} | kJ/(kg*K) | Spezifische Wärmekapazität von Wasser |
| $t_{Rück}$ | °C | Rücklauftemperatur |
| t_{Vor} | °C | Vorlauftemperatur |
| \dot{V}_{Kreis} | m³/h | Volumenstrom im Heizwasserkreislauf |
| ρ_{H_2O} | kg/m³ | Dichte von Wasser |
| η_K | % | Kesselwirkungsgrad |
| \dot{Q}_{WV} | W | Wärmeverluststrom (Kesseloberfläche) |
| α | W/(m²*K) | Wärmeübertragungskoeffizient |
| $A_{O,Kessel}$ | m² | Kesseloberfläche |
| $t_{O,Kessel}$ | °C | Kesseloberflächentemperatur |
| t_U | °C | Umgebungstemperatur |
| M_L | kg _{Luft} /kg _{Brennstoff} | Luftmassenbedarf |
| λ | - | Luftüberschusszahl |
| $M_{tL,min}$ | kg _{Luft} /kg _{Brennstoff} | Mindestluftmassenbedarf (trockene Luft) |
| X_U | - | Absolute Umgebungsfeuchte |
| $CO_{2,max}$ | % | Maximaler CO ₂ -Gehalt |
| CO_2 | % | Gemessener CO ₂ -Gehalt |
| CO | ppm | Gemessener CO-Gehalt |
| \dot{m}_L | kg _{Luft} /h | Luftmassenstrom |
| \dot{m}_G | kg _{Gas} /h | Abgasmassenstrom |
| $c_{p,G}$ | kJ/(kg*K) | Spezifische Wärmekapazität des Abgases |
| x_x | % | Anteil des Stoffes x am Abgas |
| $c_{p,x}$ | kJ/(kg*K) | Spezifische Wärmekapazität des Stoffes x |
| M_W | kg _{Wasser} /kg _{Brennstoff} | In der Verbrennungsluft enthaltenes Wasser |
| H | - | Wasserstoffanteil des Brennstoffes |
| W | - | Relative Feuchte des Brennstoffes |
| \dot{m}_W | kg _{Wasser} /h | Wasserdampfstrom des Abgases |
| \dot{H}_G | kW | Abgasverluste |
| t_G | °C | Abgastemperatur |

2 Einführung

3 Messwerte

Tabelle 1: Tabellarische Darstellung der aufgenommenen Messwerte

| Zeit in min | O ₂ -Anteil | Wasser | | Abgastemp. in °C |
|-------------|------------------------|-----------------------------------|----------|---------------------------------------|
| | | Volumenstrom in m ³ /h | ΔT in °C | |
| 0 | 11.60 | 1.778 | 8 | 92 |
| 1 | 14.20 | 1.800 | 7 | Außentemp. in °C |
| 2 | 9.60 | 1.780 | 6 | 24.8 |
| 3 | 11.90 | 1.729 | 8 | Eimer voll Masse in kg |
| 4 | 10.90 | 1.821 | 6 | |
| 5 | 9.90 | 1.802 | 7 | |
| 6 | 10.30 | 1.848 | 7 | Eimer leer Masse in kg |
| 7 | 12.60 | 1.745 | 7 | |
| 8 | 10.90 | 1.799 | 7 | |
| 9 | 11.60 | 1.789 | 7 | verbraucher BS in kg |
| 10 | 10.50 | 1.803 | 7 | |
| 11 | 10.80 | 1.736 | 7 | |
| 12 | 11.80 | 1.776 | 8 | $\dot{m}_{\text{Brennstoff}}$ in kg/h |
| 13 | 11.10 | 1.962 | 7 | |
| 14 | 11.00 | 1.828 | 8 | |
| 15 | 11.00 | 1.774 | 7 | Brennkesseltemp. in °C |
| 16 | 12.40 | 1.714 | 7 | |
| 17 | 11.70 | 1.741 | 7 | |
| 18 | 8.30 | 1.698 | 7 | |
| 19 | 11.80 | 1.789 | 8 | |
| 20 | 10.40 | 1.815 | 7 | |
| 21 | 11.90 | 1.800 | 8 | |
| 22 | 10.30 | 1.812 | 7 | |
| 23 | 11.20 | 1.772 | 7 | |
| 24 | 10.20 | 1.925 | 7 | |
| 25 | 11.00 | 1.754 | 7 | |
| 26 | 11.00 | 1.785 | 7 | |
| 27 | 9.80 | 1.780 | 7 | |
| 28 | 11.90 | 1.808 | 7 | |
| 29 | 11.70 | 1.772 | 7 | |
| 30 | 10.80 | 1.759 | 7 | |
| Mittelwerte | 11.10% | 1.790 | 7.129 | |

4 Auswertung

4.1 Berechnung der zugeführten Energie durch den Brennstoff

Um die zugeführte Brennstoffwärme \dot{H}_i zu bestimmen, ist zunächst der mittlere Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_{\text{Brennstoff,feucht}}$ zu ermitteln. Diese ergibt sich durch die Differenz der Masse des Eimers vor und nach dem Versuch geteilt durch die Versuchsdauer.

$$\dot{m}_{\text{Br}} = \frac{m_{\text{Eimer,vor}} - m_{\text{Eimer,nach}}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$= \frac{2,612 \text{ kg} - 0,808 \text{ kg}}{0,5 \text{ h}} = 3,608 \text{ kg} \quad (2)$$

Mit dem Brennstoffmassenstrom und dem angegebenen Heizwert H_i ergibt sich der zugeführte Brennstoffwärmestrom \dot{H}_i durch Multiplikation der beiden Größen.

$$\dot{H}_i = H_i \cdot \dot{m}_{\text{Br}} = 5,3 \text{ kWh/kg} \cdot 3,608 \text{ kg/h} = 19,122 \text{ kW} \quad (3)$$

4.2 Berechnung der abgeführten Nutzwärme

Die abgeführte Nutzwärme durch das Wasser kann mittels $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ bestimmt werden. Dafür wird der Massenstrom \dot{m} mithilfe des Volumenstromes \dot{V} und der Dichte ρ bestimmt. Diese liegt bei $983,19 \text{ kg/m}^3$. Für die spezifische Wärmekapazität wird ein Wert von $4,18 \text{ kJ/(kg K)}$ angenommen.

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

$$= 1,790 \text{ m}^3 / (3600 \text{ s}) \cdot 983,19 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,18 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 7,129 \text{ K} = 14,569 \text{ kW} \quad (5)$$

4.3 Berechnung der Abstrahlverluste

Um die Abstrahlverluste an die Umgebung zu bestimmen, sind die Reaktoroberflächen und deren Temperaturen die entscheidenden Größen. Grundsätzlich setzt sich der Abstrahlverlust aus Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion zusammen, wobei die Wärmeleitung aufgrund der sehr geringen Leitfähigkeit der Luft häufig vernachlässigt werden kann. Vor allem, wenn sich die Luft an der Oberfläche des Reaktors bewegt, überwiegt der konvektive Wärmeverlust gegenüber den anderen beiden Wärmeübertragungsmechanismen. Um die Verluste möglichst genau zu bestimmen, wurde die Reaktoroberfläche je nach Temperatur in verschiedene Bereiche unterteilt, wie in Tabelle 2 dargestellt wurde.

Tabelle 2: Einteilung der Kesseloberfläche in mehrere Bereiche mit den angenommenen Temperaturen und berechneten Flächen

| | Fläche / m ² | Temp / K | Temp / °C |
|------------------|-------------------------|----------|-----------|
| Oben | 0,366 | 305,15 | 32 |
| Aschekasten | 0,163 | 312,15 | 39 |
| Vordere Klappe | 0,085 | 303,15 | 30 |
| Restliche Fläche | 2,548 | 301,15 | 28 |

Für jeden einzelnen Bereich mit der Temperatur $t_{O,Kessel,i}$ und einer Fläche von $A_{O,Kessel,i}$ lässt sich der konvektive Abstrahlverlust wie folgt berechnen. α ist dabei der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an der Oberfläche, welcher mit $8,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen wird.

$$\dot{Q}_{WV_{konv.}} = \alpha \cdot \sum_i A_{O,Kessel,i} \cdot (t_{O,Kessel,i} - t_U) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{WV_{konv.}} &= 8,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot (2,548 \cdot (301,15 - 297,95) + 0,366 \cdot (305,15 - 297,95) \\ &\quad + 0,163 \cdot (312,15 - 297,95) + 0,085 \cdot (303,15 - 297,95)) \text{ m}^2\text{K} = 0,114 \text{ kW} \end{aligned} \quad (7)$$

Der strahlungsbedingte Abstrahlverlust kann nach oben hin abgeschätzt werden, wenn für den Formfaktor F und für den Emissionsgrad ϵ jeweils das Maximum von 1 angenommen wird. Da die abgestrahlte Wärme früher oder später auf eine Fläche mit Umgebungstemperatur trifft und es sich bei der Kesseloberfläche um Kunststoff handelt, sind beide Annahmen sogar relativ genau. Mithilfe der Stefan-Boltzmann Konstante von $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ergeben sich die Strahlungsverluste mit folgender Formel:

$$\dot{Q}_{WV_{strahl.}} = \sigma \cdot F \cdot \epsilon \cdot \sum A_{O,Kessel,i} \cdot (t_{O,Kessel,i}^4 - t_U^4) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{WV_{strahl.,max}} = \sigma \cdot \sum A_{O,Kessel,i} \cdot (t_{O,Kessel,i}^4 - t_U^4) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{WV_{strahl.,max}} &= 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot (2,548 \cdot (301,15^4 - 297,95^4) + 0,366 \cdot (305,15^4 - 297,95^4) \\ &\quad + 0,163 \cdot (312,15^4 - 297,95^4) + 0,085 \cdot (303,15^4 - 297,95^4)) \text{ m}^2\text{K}^4 = 0,084 \text{ kW} \end{aligned} \quad (10)$$

4.4 Berechnung der Abgasverluste

Um die Abgasverluste \dot{H}_G zu bestimmen, ist analog zu der Berechnung der Nutzwärme folgende Formel anzuwenden:

$$\dot{H}_G = \dot{m}_G \cdot c_{p,G} \cdot \Delta T \quad (11)$$

Dabei ergibt sich ΔT als Differenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur. Für den Massenstrom \dot{m}_G und ΔT gilt:

$$\Delta T = t_G - t_U = 94^\circ\text{C} - 24,8^\circ\text{C} = 67,2 \text{ K} \quad (12)$$

$$\dot{m}_G = \dot{m}_{Br} + \dot{m}_L \quad (13)$$

Der durchschnittliche Brennstoffmassenstrom \dot{m}_{Br} ergibt sich hierbei über die Massendifferenz des Nachfüllgefäßes vor und nach dem Versuch. Der Luftmassenstrom \dot{m}_L ergibt sich mit dem Luftmassenbedarf $M_{tL,min}$ mit der Luftzahl λ . Diese wiederum ergibt sich aus dem Sauerstoffanteil im Abgas O_2 , da in diesem nur noch der Sauerstoff enthalten ist, der stöchiometrisch nicht benötigt wird. Für λ gilt daher:

$$\lambda = \frac{0,21}{0,21 - O_2} = \frac{0,21}{0,21 - 0,111} = 2,12 \quad (14)$$

Der Luftmassenbedarf $M_{tL,min}$ ergibt sich mittels chemischer Zusammensetzung der verwendeten Holzpellets (C: 50,9% - O: 42% - H: 6,6% - S: 0%) mithilfe der folgenden Formel:

$$M_{tL,min} = 11,44 \cdot C + 34,33 \cdot H + 4,29 \cdot (S - O) \quad (15)$$

$$= 11,44 \cdot 0,509 + 34,33 \cdot 0,066 + 4,29 \cdot (0 - 0,42) = 6,29 \text{ kg/kg}_{Br} \quad (16)$$

Schlussendlich ergeben sich folgende Werte:

$$\dot{m}_L = \lambda \cdot M_{tL,min} \cdot \dot{m}_{Br} = 2,12 \cdot 6,29 \text{ kg/kg}_{Br} \cdot 3,608 \text{ kg}_{Br}/\text{h} = 48,12 \text{ kg/h} \quad (17)$$

$$\dot{m}_G = \dot{m}_L + \dot{m}_{Br} = 48,12 \text{ kg/h} + 3,608 \text{ kg/h} = 51,72 \text{ kg/h} \quad (18)$$

Zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität des Abgases $c_{p,G}$ ist die Zusammensetzung des Abgases entscheidend. Vereinfacht kann das Abgas als Gemisch aus lediglich 4 Komponenten angenommen werden: Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid. Der Sauerstoffanteil ξ_{O_2} wurde hierbei direkt im Versuch bestimmt, wohingegen die anderen Anteile berechnet werden müssen. Dies geschieht mit den folgenden Formeln für den Wasserdampfanteil ξ_{H_2O} , den Kohlendioxidanteil ξ_{CO_2} und den Stickstoffanteil ξ_{N_2} . X_U ist dabei die absolute Feuchte der Luft, welche mithilfe eines Online-Rechners für Umgebungstemperatur und 50% relativer Luftfeuchtigkeit mit 11,4 g/m³ bzw. 0,0114 kg/kg (mit einer Dichte von 1 kg/m³) ermittelt wurde[1].

$$\xi_{CO_2} = 0,21 - \xi_{O_2} = 0,21 - 0,111 = 0,099 \quad (19)$$

$$\xi_{H_2O} = 9 \cdot H + W + X_U \cdot \lambda \cdot M_{L,min} = 9 \cdot 0,066 + 0,08 + 0,0114 \text{ kg/kg} \cdot 2,12 \cdot 6,29 \text{ kg/kg} = 0,0576 \quad (20)$$

$$\xi_{N_2} = 1 - \xi_{O_2} - \xi_{CO_2} - \xi_{H_2O} = 1 - 0,111 - 0,099 - 0,0576 = 0,7324 \quad (21)$$

Mithilfe dieser Zusammensetzung und der spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Komponenten kann die gewichtete spezifische Wärmekapazität des gesamten Abgases bestimmt werden. Hierbei gilt allgemein:

$$c_{p,G} = \sum_i c_{p,i} \cdot \xi_i \quad (22)$$

mit den spezifischen Wärmekapazitäten $c_{p,i}$ und den Anteilen der jeweiligen Komponenten ξ_i . Konkret ergibt sich:

$$c_{p,G} = c_{p,O_2} \cdot \xi_{O_2} + c_{p,CO_2} \cdot \xi_{CO_2} + c_{p,H_2O} \cdot \xi_{H_2O} + c_{p,N_2} \cdot \xi_{N_2} \quad (23)$$

$$= (0,912 \cdot 0,111 + 0,846 \cdot 0,099 + 1,85 \cdot 0,0576 + 1,04 \cdot 0,7324) \text{ kJ/(kg K)} = 1,0533 \text{ kJ/(kg K)} \quad (24)$$

Somit ergeben sich insgesamt Abgasverluste von:

$$\dot{H}_G = \dot{m}_G \cdot c_{p,G} \cdot \Delta T = 51,72 \text{ kg/(3600 s)} \cdot 1,0533 \text{ kJ/(kg K)} \cdot 67,2 \text{ K} = 1,017 \text{ kW} \quad (25)$$

4.5 Energiebilanz im Sankey-Diagramm

Im nachfolgenden Diagramm ist die Energiebilanz mithilfe der auftretenden Leistungen in kW dargestellt. Es ist zu erkennen, dass zusätzliche Verluste auftreten, welche nicht berechnet werden. Diese zusätzlichen Verluste betragen etwa 17,5% der Brennstoffleistung.

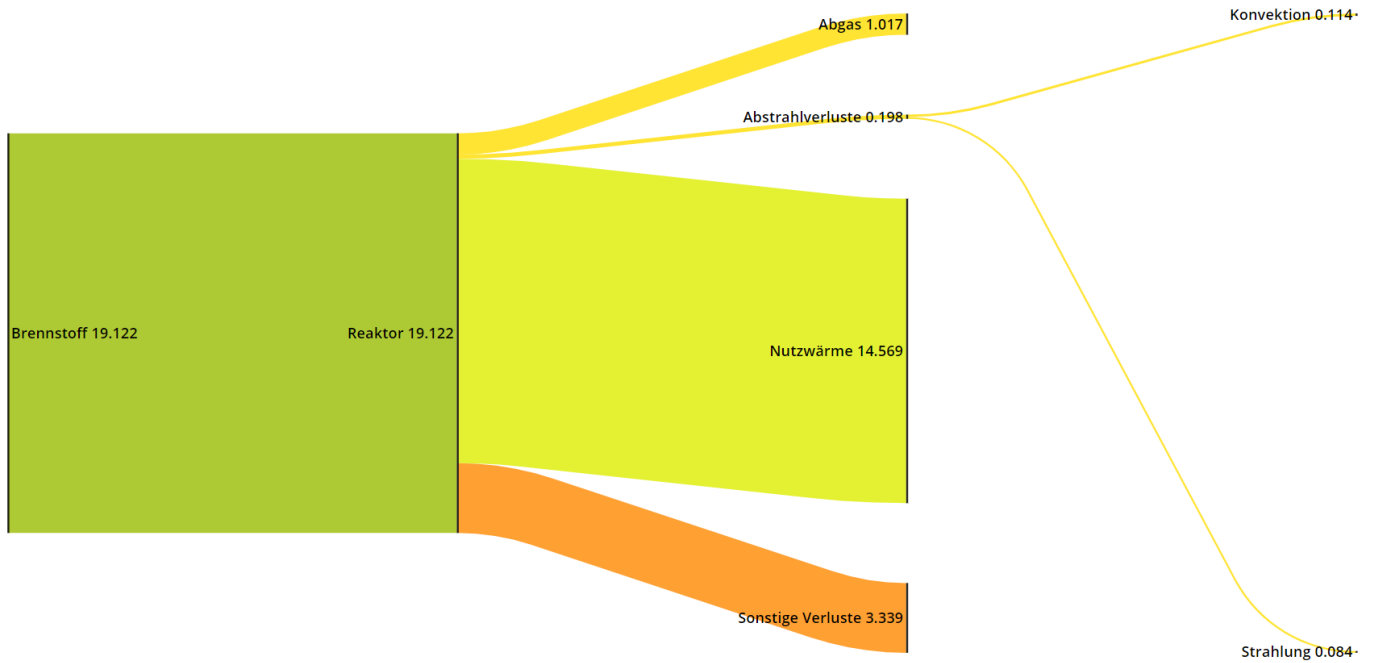


Abbildung 1: Sankey-Diagramm für den durchgeführten Pelletkesselversuch

Literaturverzeichnis

- [1] wetterochs.de, *Luftfeuchtigkeit*, <http://www.wetterochs.de/wetter/feuchte.html> (Zugriff am: 24.06.2022).