

Holzverbrennung im HV-Kessel

Unter diesem Titel gibt es so viel Literatur, dass man quasi damit heizen könnte. Die diversen Autoren haben allerdings das Problem, hinreichend seriös und ausführlich schreiben zu müssen, damit die Arbeit veröffentlicht werden kann. Den Anspruch stelle ich jetzt mal nicht, weshalb dieser Beitrag eher salopp klingen wird.

Holz besteht aus 48-50%C, 6-6,5%H und 42-46%O.

Würde man es chemisch korrekt (=stöchiometrisch) verbrennen, braucht man noch eine Portion Sauerstoff (O₂) dazu und erhält Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O). Das sind nämlich genau diejenigen Bestandteile, aus denen der fragliche Baum seine Biomasse mithilfe des Sonnenlichts Jahr für Jahr aufgebaut hat.

Beispielsweise werden 12kg Kohlenstoff mit 22,4m³ O₂ zu 22,3m³ CO₂ verbrannt. Die gasförmigen Volumina vorher und nachher sind annähernd gleich, der feste Kohlenstoff ist weg und existiert fortan als dreiatomiges Gas-Molekül weiter. Holz setzt z.B. bei der Vergasung bis ca. 80% seiner Masse als flüchtige Bestandteile bzw. Gas frei. Kauft man sich einen Sack Holzkohle zum Grillen, so ist das eine leichte Last gemessen am Volumen, weil eben nur noch 30-40% vom ehemaligen Holzstück übrig sind. Die reale Dichte der porösen Holzkohle liegt allerdings bei 1,4 kg/ltr.

Wir schichten nun 12kg Holz in unsere Füllkammer und zünden die Ladung an. Da die Füllkammer durch Türe und AHK hermetisch verschlossen ist, müssen wir über den Primärlüfter den zur Verbrennung zusätzlich nötigen Sauerstoff zuführen. Der im Holz enthaltene O₂-Anteil würde nicht mal für die Hälfte des Kohlenstoffs reichen, die ebenfalls stattfindende Verbrennung des Wasserstoffanteils wird der Einfachheit halber noch gar nicht berücksichtigt. Unsere Primärluft hat 79% Inertgasanteil N₂ und nur ca. 21% O₂. Das hat die Natur sehr weise eingerichtet, denn bei bis zu 100% O₂ würde sich unser Kessel in eine Raketenbrennkammer verwandeln. Folglich schicken wir den Stickstoff als Ballast durch den Kessel, heizen ihn auf und müssen anschließend zusehen, dass wir die Wärme so gut es geht wieder rausziehen, indem wir die Abgastemperatur AGT reduzieren.

Unsere 12kg Holz verkokeln auf einem hoffentlich vorhandenen Holzkohle-Glutbett, das den einzigen Ausweg aus der Füllkammer, nämlich den Düsenspalt mehr oder weniger blockiert. Hier findet nun das statt, was den HV vom Allesbrennerheizkessel unterscheidet. Das gesamte Gasgemisch wird stetig mit dem vom Lüfter erzeugten Füllkammerdruck von schätzungsweise 50-150 Pa durch dieses glühende Festbett gedrückt. Der Glühfarbe des metallischen Düsenrostes nach zu schließen, können hier Temperaturen von 800 – 1000°C angesetzt werden. Bereits oxidierte Gasbestandteile wie CO₂ und H₂O (Wasserdampf) zersetzen sich nicht mehr, da deren Dissoziationstemperatur deutlich höher liegt und die Verweilzeit zu kurz sein dürfte. Alles andere, wie Teer, Ruß und "Rauch" werden in der Hitze der glühenden Holzkohle entsprechend ihrer Aufenthaltszeit gecrackt. Hauptsächlich die Boudouard-Reaktion verwandelt das meiste, was C intus hat in Kohlenmonoxid CO. Je gründlicher dieser Aufschluss stattfindet, umso effizienter arbeitet unser Gasgenerator.

In dieses "glühende" Holzgasgemisch das mit respektablem Geschwindigkeit durch die Düse austritt, muss nur noch genügend Sekundärluft beigemischt werden. Je nach Düsenbauart entsteht eine mehr oder weniger turbulente Diffusionsflamme, der man in einer heißen Brennkammer nur noch genügend Zeit zum kompletten Ausbrand geben muss.

Es sieht so aus, als ob dieser Prozess relativ einfach bilanzierbar wäre, insbesondere wenn man sich vorläufig nur für Volumenströme und Geschwindigkeiten interessiert.

Eine Füllkammerladung für meinen HVS25LC ist durchschnittlich eine rechteckige 40Liter-Mörtelwanne voll Holz und wiegt ca. 15kg. Wenn Holz einen Heizwert besitzt, von

$$15,5 \text{ MJ/kg} = 15000 \text{ kJ/kg} = 15000 / 3600 \text{ kJ/kg} \cdot 1/(\text{s/h}) = 4,3 \text{ kWh/kg} \quad (\text{Umrechnung})$$

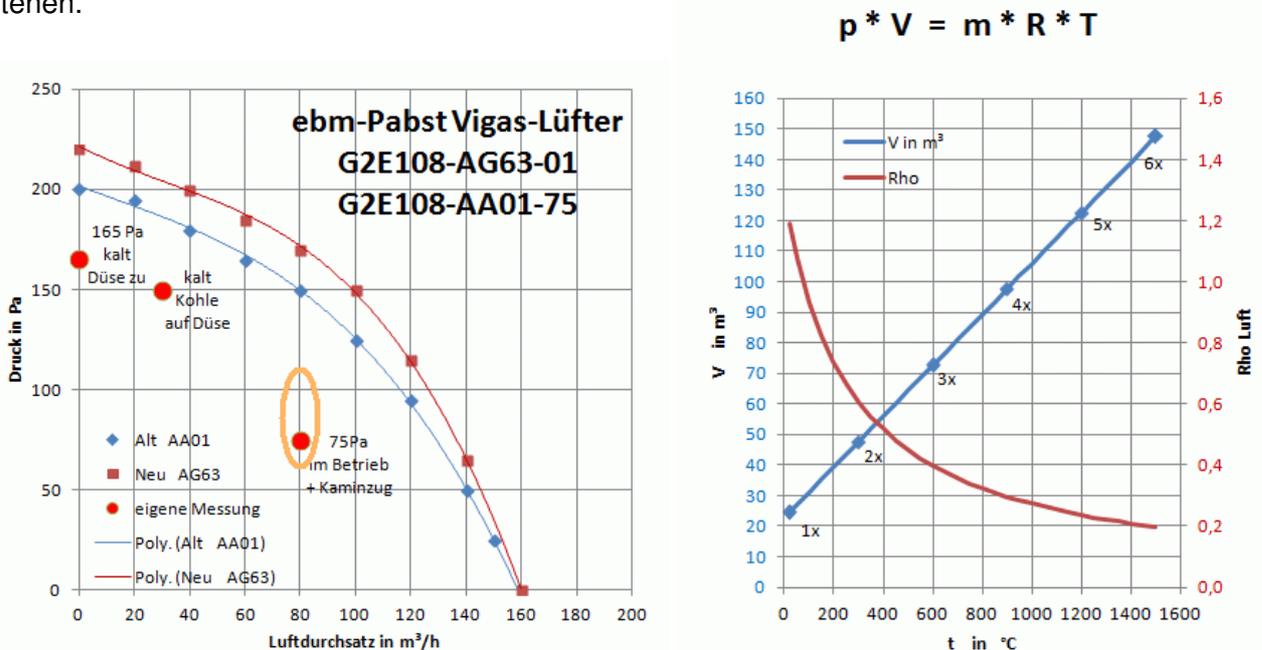
dann sollten 15kg Holz $4,3 \text{ kWh/kg} \cdot 15 \text{ kg} = 64,5 \text{ kWh}$ liefern.

Tatsächliche Werte, die mit Holzwiegen und Wärmemengenmesser gefahren wurden (Erwin/gutber) liegen bei 3,4kWh/kg . D.h. dass meine Füllung bei Nominalleistung eines 25kW-Kessels für 2,5h reichen sollte. Auch bei mir hält das bestenfalls für 1,25h, bis ich wieder nachlegen muss. Es existieren somit "Spielverderber" verschiedenster Art, wie z.B. Anfahrverlust; Kesselwirkungsgrad; Isolationsverlust; unterer Heizwert; Abgasverlust; Holzfeuchte.

Der o.g. Stundenverbrauch von 12kg Holz enthält ungefähr 50%C und benötigt deshalb an Verbrennungsluft bei einem O₂/N₂-Verhältnis von ca. 1:4

$$V_{\text{Luft}} = 22,4\text{m}^3 / 12\text{kg} \cdot 6\text{kg} \cdot (1 + 4) = 56\text{m}^3$$

Multipliziert man dieses Ergebnis noch mit dem Lambdawert = 1,35 kommt man mit einiger Mühe und einem unguuten Gefühl auf den im Lüfterdiagramm gekennzeichneten Luftdurchsatz von 75,6m³/h. Woraus man schließen könnte, dass entweder Fehler im Ansatz vorhanden sind oder dass man die Herleitung genauer betrachten sollte. Um aber ehestmöglich eine weiter verwertbare Größenordnung zu haben, bleibt das vorläufig so stehen.



Ein Ansaug-Luftdurchsatz bei RT von 75m³/h hat einen Abgasausstoß bei 300°C AGT vom zweifachen Volumen, bzw. bei 200°C $75 \cdot 2 \cdot 2/3 = 100\text{m}^3/\text{h}$.

Der Rauchrohrquerschnitt beträgt $A_{RR} = (0,08\text{m})^2 \cdot \pi = 0,02\text{m}^2$;

$$v_{AG} = 100\text{m}^3/\text{h} / 0,02\text{m}^2 / 3600\text{s/h} = 1,38\text{m/s}$$

Entsprechend diesem Beispiel lassen sich nun angenähert Volumenströme (m^3/h) und Geschwindigkeiten (m/s) bestimmen, wenn man die lokale Gastemperatur abschätzt oder kennt. Der Systemdruck = Luftdruck wird als konstant 10^5 Pa angenommen. Lokal bewegen sich in unserem Fall die Druckdifferenzen maximal im zweistelligen Pa-Bereich, weshalb das Fluid als inkompressibel angesehen werden darf. Die gesamte Kesseldurchströmung folgt natürlich einem Druckgefälle, das aus der Summe von Lüfterdruck und Kaminzug besteht. Das muss man sich wie einen Gebirgsbach vorstellen, es geht immer nur bergab.

Bollern oder gar Verpuffungen sind kurzzeitige "Regelwidrigkeiten" im Druckausgleich. Findet im Gasstrom ein kontinuierlicher Verbrennungsvorgang statt steigt seine Temperatur und damit sein Volumen isobar, also bei gleichem Druck. Nichts außer ein paar Engpässen hindert das Gasvolumen, sich in Richtung Schornstein zu bewegen.

Typisches Beispiel ist die Füllkammer. Sie wird vom Primärlüfter "aufgeladen", d.h. auf Druck gebracht. Zudem findet eine Verbrennung statt,

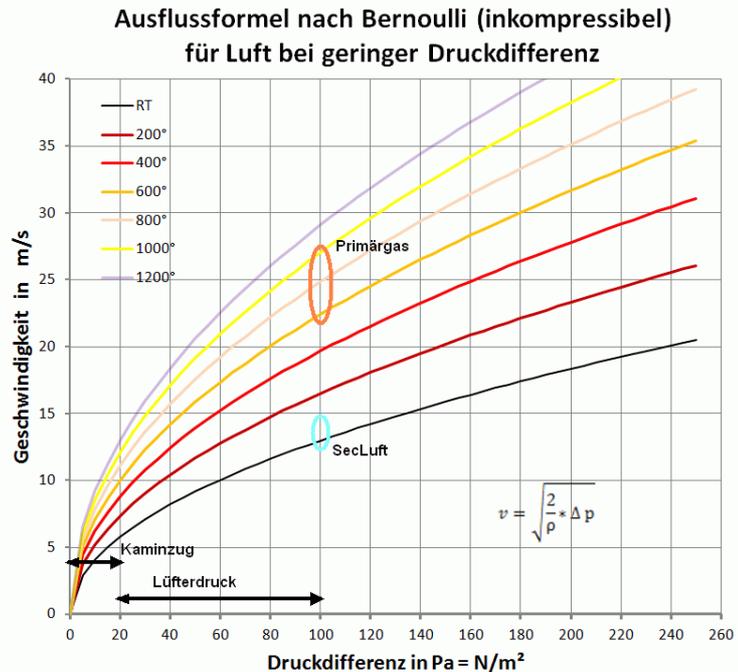
die das Gasvolumen ausdehnt. Entweichen kann alles nur über die Engstelle Düsenapertur. Der Füllkammerüberdruck gegenüber der nachfolgenden Brennkammer wird in der Düse abgebaut, indem das Gas Geschwindigkeit aufnimmt. Das hat der alte Bernoulli herausgefunden und formuliert. An dieser Stelle können wir schon mal prüfen, welche Geschwindigkeit der rechnerische Volumenstrom im Vergleich zu Bernoulli hat.

$$75 \text{ m}^3/\text{h} * 4 = 300 \text{ m}^3/\text{h} \text{ bei angenommen } 900^\circ\text{C}$$

$$v_{\text{Düse}} = 300(\text{m}^3/\text{h}) / 3600(\text{s/h}) / 0,0032\text{m}^2 = 26 \text{ m/s}$$

Das ist schon ein fast verdächtig guter Treffer.

In der Düse wird noch ein Anteil relativ kalter Sekundärluft zugemischt. Beim Einmischen in den Primärgasstrom beginnt spontan die Holzgasverbrennung. In einer turbulenten Diffusionsflamme erfährt der Gasstrom eine letzte Volumenausdehnung und Temperaturerhöhung. Der doch recht komplexe Prozess über und in der Düse sollte separat behandelt werden. Jedenfalls sprechen Temperaturangaben von HV-Besitzern für eine Flammtemperatur von 1200°C aufwärts. Diese Flamme strahlt Energie ab und vermischt sich in der Brennkammer über Rezirkulation. Ich messe im hinteren, ruhigen Teil der Kammer $750 - 900^\circ\text{C}$. Irgendwo in diesem Temperaturbereich wird der Gasstrom seine Reise an der Brennkammertüre vorbei nach hinten zu den WT-Rohren antreten. Je nachdem, ob Seitenturbulatoren, große Brennkammer oder wasserführender Kesselboden eingebaut sind oder nicht, wird ein spezifisches Quantum an Wärme an das Kesselwasser übertragen und zur AG-Kühlung beitragen. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind eher moderat.



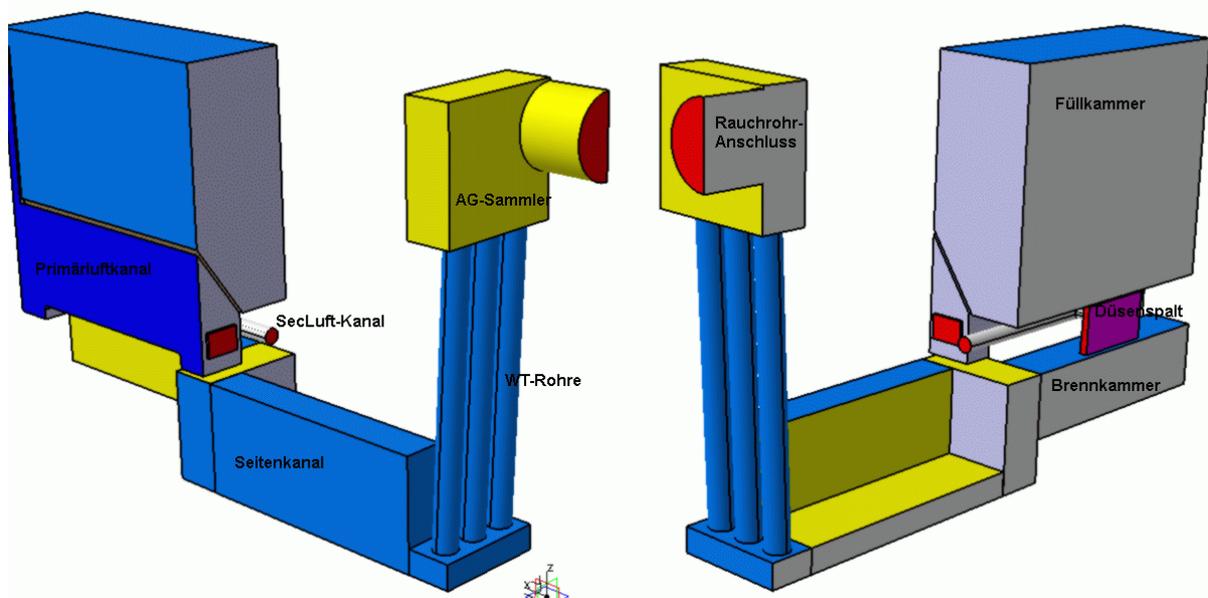
Interessant wird es wieder bei der finalen Wärmetauschergruppe, den 6 WT-Röhren. Eine Temperatur am Röhreneintritt kann leicht gemessen werden. Werte sind gerade nicht bekannt, aber eine Schätzung von 600 – 400°C dürfte nicht allzu sehr daneben liegen.

$$75\text{m}^3/\text{h} * 2,5 = 187,5\text{m}^3/\text{h}$$

$$A_{\text{WT}} = 6 * (0,023\text{m})^2 * \pi = 0,01\text{m}^2$$

$$v_{\text{WT}} = 187,5 (\text{m}^3/\text{h}) / 3600 (\text{s/h}) / 0,01\text{m}^2 = 5,2\text{m/s}$$

Im WT-Rohr kühlt sich das Abgas um ca. 200°C ab. Durch die Volumenreduktion reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit. Ein Gesichtspunkt, der für den Turbulatorenbau interessant sein dürfte. Hier ist ohnehin eine kritische Stelle an der aerodynamisch sehr ungünstigen Form der Eintrittsöffnung. Eine Drossel mit Strömungsabriss vernichtet uns kostbaren Querschnitt und damit Druck. Das dürfte mit einer der Gründe sein, dass "Scheiben"-Turbulatoren hier gute Ergebnisse bringen – der freie Querschnitt ist schon am Eingang ruiniert, also stören stromabwärts angebrachte Körper nicht weiter.



Um sich einigermaßen vorstellen zu können, wie der Stofffluss im Kessel sortiert ist, hier ein Schnittbild mit aufgeklappten Innereien. Rot markiert die Ein- und Austrittsquerschnitte. Blau markiert sind alle wasserführenden und damit Wärmetauscher-Flächen. Grau sind Schnittflächen und gelb Grenzflächen eingefärbt.

Nach den bisher zusammengestellten Fakten und Vermutungen könnte man z.B. über Excel Ein Volumenstrom- und Geschwindigkeitsdiagramm erstellen das an verschiedenen Kontrollflächen des obigen Bildes verankert wird. Da oft mehrere unabhängige Fakten/Formeln zusammengeführt werden, kann man die Konsistenz der Daten überprüfen.

Hat man dieses Gerüst, lassen sich auch Details gesondert betrachten, wie insbesondere das aerodynamische und thermodynamische Geschehen an der Düse. Ich denke da insbesondere an die aktuelle Meinungsfindung, was alleine schon die Dimensionierung der Durchtrittsquerschnitte von Düsenpalt und SecLuft-Kanälen bei Lufttrennern und Singlelüftern anbelangt. Und ich denke, dass auch bei Seiten- und WTRohr-Turbulatoren noch etwas zu holen ist.