

Wohltätig ist des



Macht,
wenn sie der Mensch
besäht, bewacht.

Friedrich Schiller, Lied von der Glocke

Bestimmung der Brennwerte verschiedener Festbrennstoffe

Wettbewerb „Jugend Forscht“ 1999

Andreas Henke (17 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg**

Leitung: StD Thomas Biedermann



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Theorie der Verbrennung	3
2.1	Aus Sicht der Chemie	3
2.2	Aus Sicht der Physik	5
3.	Konstruktion und Einsatz des Testofens	7
3.1	Grundsätze der Konstruktion	7
3.2	Messmethoden	8
3.3	Brennversuche	9
3.3.1	Erprobung der Apparatur	9
3.3.2	Aufnahme einer konkreten Messung	9
3.3.3	Auswertung einer Messung	11
4.	Fazit und Ausblick	12
5.	Anhang	12
5.1	Danksagungen	12
5.2	Literatur	12



1. Einleitung

Am Anfang war das Feuer

Schon seit Tausenden von Jahren nutzt der Mensch die Wärme, die bei der Verbrennung von nachwachsenden Rohstoffen entsteht. Damals wie heute ist Holz der dabei am häufigsten benutzte Brennstoff. Geändert hat sich im Wesentlichen das Gerät, in dem dieses Material verbrannt wird: wurde früher lediglich ein Steinring aufgebaut, um eine unkontrollierte Ausbreitung zu verhindern und kleine Kinder vor unliebsamen Erfahrungen zu schützen, gibt es heute auf dem Markt bereits ausgefeilte Systeme, die auch noch das letzte Quentchen Energie aus dem Holz holen und dabei ganz nebenbei auch noch die Schadstoffemission minimieren.

Wer schon mal - als Kind oder auch später - versucht hat, ein Lagerfeuer anzuzünden, wird die Erfahrung gemacht haben, dass nicht alles Holz gleich gut brennt. Nicht nur der Trocknungsgrad spielt eine entscheidende Rolle, sondern auch die Holzart beeinflusst das Ergebnis in ganz entscheidendem Maße.

In unserem Haus haben wir einen Kaminofen, mit dem wir in der Übergangszeit, aber manchmal auch einfach nur wegen der Gemütlichkeit ab und zu etwas von unserem Holzvorrat verbrennen. Als es wieder mal notwendig wurde, neues Holz einzukaufen, erhob sich die Frage, welche Sorte man denn am besten nehmen sollte, um ein möglichst wirkungsvolles Feuer zu erhalten. Und diese Frage brachte mich auf die Idee zu dieser Arbeit.

Allerdings modifizierte ich ein wenig meine Zielrichtung, indem ich mich von der 'Gemütlichkeit' des Feuers etwas distanzierte und eher auf die grundsätzlichere Fragestellung einließ, wie man denn mit Holz eine optimale Verbrennung erzielen könnte, um eine möglichst große Energieausbeute zu bekommen.

Es gibt verschiedene Aspekte, aus denen man diese Fragestellung beleuchten kann: aus chemischer Sicht handelt es sich eine Verbrennung, also eine chemische Reaktion, aus physikalischer Sicht geht es um Umwandlung und Transport verschiedener Energieformen, und in technischer Hinsicht müßte man sich mit Fragen der Dimensionierung eines Ofens befassen. Letzteres ist eher Sache eines Architekten oder Bauingenieurs und übersteigt meine Möglichkeiten, aber die ersten beiden Aspekte lassen sich mit den in der Schule erworbenen Kenntnissen hinreichend bewältigen.

2. Theorie der Verbrennung

2.1 Aus Sicht der Chemie

Bei der Verbrennung von Holz handelt es sich um eine exotherme Reaktion, die eine gewisse Startenergie benötigt, um einzusetzen und so lange abläuft, bis das reaktionsfähige Material verbraucht ist. Es handelt es um eine Reaktion von Kohlenstoffen in seinen organischen Verbindungen mit Sauerstoff. Holz besteht überwiegend aus Zellulose (40% - 50%), Lignin (10% - 30%) sowie anderen Polyosen (10% - 30%) [1] sowie je nach Trocknungsgrad 0 - 18% Wasser [2].

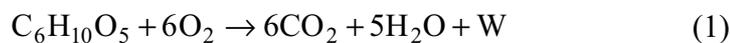


Bei Zellulose handelt es sich um ein Polysaccharid und sie ist damit den Kohlenhydraten zuzuordnen. Diese enthalten neben Kohlenstoffatomen C die Elemente Wasserstoff H und Sauerstoff O wie im Wasser im Verhältnis 2 : 1 und können durch die allgemeine Strukturformel $C_m(H_2O)_n$ dargestellt werden.

Das Lignin ist ein sehr komplexes Molekül, das die Hohlräume zwischen den Zellwänden einer Pflanze ausfüllt und aus Hydroxylgruppen - z.B. Methyläther - gebildet wird.

Bei Polyosen handelt es sich um Hemicellulosen, die mit der oben beschriebenen Zellulose eng verwandt sind.

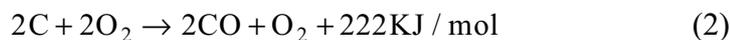
Die zugehörige Reaktionsgleichung ist insgesamt sehr unübersichtlich, da es sich um viele verschiedene Kohlenstoffverbindungen handelt, stellvertretend soll hier lediglich die Reaktionsgleichung für die Verbrennung von einem das Zellulose-Molekül bildenden Saccharids angegeben werden:



Der erste Term stellt die Strukturformel des Saccharids dar, der zweite den für die Verbrennung benötigten Sauerstoffs, während auf der anderen Seite der Gleichung die Produkte Kohlendioxid sowie Wasser erscheinen. Die Energie W wird bei dieser Reaktion frei, deshalb spricht man von einer *exothermen* Reaktion.

Da ich keine Angabe für den Betrag von W in der Literatur finden konnte, versuchte ich eine Abschätzung der Größenordnung über verwandte Reaktionen vorzunehmen.

Die Verbrennung von Kohlenstoff kann man als einen zweistufigen Prozess darstellen, bei dem zuerst Kohlenstoff mit Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Sauerstoff reagiert



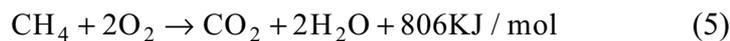
und anschließend das Kohlenmonoxid mit Sauerstoff zu Kohlendioxid umgewandelt wird



Bei beiden Prozessen wird Energie frei. Diese Reaktion lässt sich auch zusammengefasst darstellen als



Sie besagt, dass bei der Verbrennung von 1 Mol Kohlenstoff entsprechend 12,01 g Masse eine Energie von 790 KJ frei wird, damit könnte man theoretisch 10 l Wasser um etwa 19°C erwärmen. Zum Vergleich habe ich den Verbrennungsvorgang der Kohlenwasserstoffverbindung Methan - dem Hauptbestandteil von Erdgas - herangezogen:



hier wird also bei der Verbrennung von 16 g Methan - das entspricht ca. 22 l Gas - etwa die selbe Energie frei.

In der Literatur wird für die Verbrennung von Holz eine mittlere Energieausbeute von 15 KJ pro Gramm angegeben, leider fehlt mir zur weiteren Abschätzung aus den Reaktionsgleichungen das Molekulargewicht von Holz.



2.2 Aus Sicht der Physik

Die Physik beginnt an der Stelle, wo der chemische Vorgang im Wesentlichen beendet ist. Während durch den Verbrennungsprozess die im Holz gespeicherte chemische Energie in Wärme umgewandelt worden ist, sind es nun vor allem physikalische Phänomene, die für die weiteren Vorgänge verantwortlich sind.

Durch den Verbrennungsvorgang werden die in fester Form vorliegenden Ausgangsprodukte in den gasförmigen Zustand (CO_2) überführt. Hinzu kommt die passiv vom Vorgang betroffene Zuluft. Die freiwerdende Energie geht zu einem geringen Teil in Strahlungsenergie über (Wärmestrahlung, Licht), der größte Anteil jedoch erhöht die Temperatur der nunmehr gasförmigen Verbrennungsprodukte sowie der passiv beteiligten Bestandteile der Luft - im Wesentlichen Stickstoff.

Stellt man eine Energiebilanz des Systems „Ofen“ dar, so ergibt sich ein Schaubild nach Abb. 1. Die Zuluft besitzt Raumtemperatur und befördert pro Zeiteinheit kontinuierlich eine bestimmte Wärmemenge in den Verbrennungsraum. Der Brennstoff beinhaltet Energie in Form von chemischer Energie und wird einmalig in den Brennraum eingebracht.

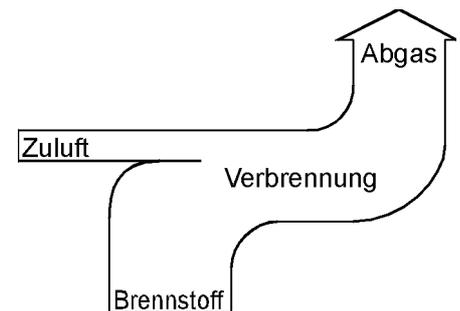


Abb. 1: Energiebilanz eines Ofens

Durch die Verbrennung wird ein Teil des in der Zuluft enthaltenen Sauerstoffs verbraucht und bildet mit den anderen Reaktionsprodukten das Abgas, welches nach der Reaktion mit hoher Temperatur durch den Kamin abgegeben wird. In einem Ofen wird diese Energie wieder dem Abgas entzogen und durch Wärmetauscher zur Heizung oder Warmwasserbereitung herangezogen. Es liegt also nahe, die Energie dieses Abgasstromes zu messen.

Das Entscheidende bei diesem Vorgang ist die Tatsache, dass die pro Zeiteinheit zugeführte Gasmenge in Form von Luft erheblich geringer ist als die Gasmenge, die durch den Abzug wieder abgegeben wird. Gleichzeitig ist die Temperatur des Abgases wesentlich höher als die der Zuluft. Der Unterschied zwischen diesen beiden Vorgängen entsteht durch die aus der Verbrennung herrührende Energie.

Einen Ansatz dazu liefert der Erste Hauptsatz der Thermodynamik. Er besagt [3], dass die Zunahme der inneren Energie gleich der Summe der von außen zugeführten Wärme und zugeführter Arbeit ist:

$$\Delta U = Q + W \quad (6)$$

Darin bezeichnet ΔU die Änderung der inneren Energie, Q die von außen zugeführte Wärmeenergie und W die zugeführte Arbeit.

In diesem Fall ist der Druck vor, während und nach der Verbrennung jeweils gleich und entspricht dem Umgebungsdruck (atmosphärischer Brenner), man bezeichnet diesen Vorgang als *isobare Zustandsänderung*. Nach [4] gilt dann

$$Q_p = \frac{5}{2} R \cdot n \cdot \Delta T \quad (7)$$

darin ist n die Stoffmenge in Mol, R die Universelle Gaskonstante und ΔT die Temperaturänderung.



Da die Konstante $\frac{5}{2}R$ nur für einatomige ideale Gase verwendet werden kann, muss hier stattdessen die für mehratomige Gase zutreffende Größe C_{mp} benutzt werden, die für einatomige Gase $20,8 \text{ KJ} \cdot \text{KMol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ beträgt, während für Luft der Näherungswert ca. $29 \text{ KJ} \cdot \text{KMol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ eingesetzt werden muss.

Die Temperaturänderung ergibt sich aus der Differenz der Temperatur der einströmenden Luft T_b und der Temperatur des Abgases T_j zu

$$\Delta T = T_j - T_b \quad (8)$$

Die beteiligte Stoffmenge in Mol ergibt sich aus

$$n = \frac{V_m - V_l}{V_j} \quad (9)$$

dabei ist V_m das Abgasvolumen, V_l das Volumen der Zuluft und V_j das Normvolumen eines idealen Gases angepaßt auf Temperatur und Druck der Zuluft. Nach der allgemeinen Gasgleichung gilt

$$V_j = V_n \cdot \frac{p_n \cdot T_j}{p_b \cdot T_n} \quad (10)$$

darin ist V_n das Normvolumen ($22,414 \text{ l/mol}$), p_n der Normdruck (1013 hPa), p_b der tatsächliche Umgebungsdruck und T_n die Normtemperatur ($273,15 \text{ K}$).

Nach Einsetzen von (10) in (9) und anschließend in (7) ergibt sich

$$Q_p = \frac{5}{2} \cdot R \cdot \frac{V_m - V_l}{V_n} \cdot \frac{p_b \cdot T_n}{p_n} \cdot \left(1 - \frac{T_b}{T_j}\right) \quad (11)$$

Sie erlaubt die Bestimmung der Wärmeenergie ausschließlich aus am Ofen unmittelbar messbaren Größen.

Bei den Messungen habe ich darauf verzichtet, die Größe p_b zu messen, da sie sich nur unwesentlich von p_n unterscheidet und sich damit diese beiden Größen aus der Gleichung (11) herauskürzen lassen.

Zu jedem Volumen gehört bei einer bestimmten Temperatur eine bestimmte Energiemenge. Erhöht man die Temperatur, so vergrößert sich einerseits das Volumen, andererseits aber auch die pro Volumeneinheit transportierte Energie. Bestimmt man den prozentualen Anteil der tatsächlichen Energie bezogen auf die Energie bei einer beliebig hohen Temperatur, erhält man einen Graphen nach nebenstehender Abbildung. Er zeigt, dass z.B. bei einer Abgastemperatur von 900 K (630°C) ein Wirkungsgrad von ca. 65% erreicht werden kann. Prinzipiell kann bei dieser Temperatur also keine größere Energieausbeute aus dem Abgas gewonnen werden.

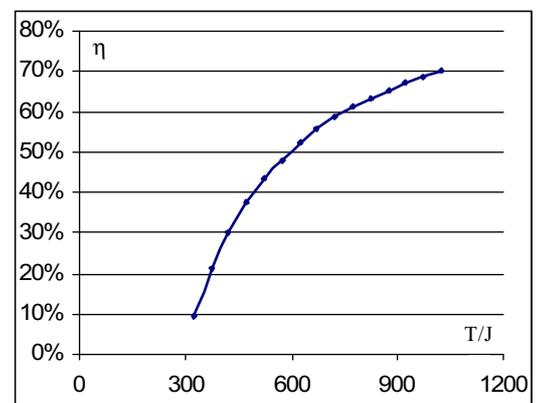


Abb. 2: Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Abgastemperaturen.



3. Konstruktion und Einsatz des Testofens

3.1 Grundsätze der Konstruktion

Für die Messungen benötigte ich einen Versuchsaufbau, der folgende Bedingungen erfüllen musste:

- leichte Zugänglichkeit des Brennraumes
- steuerbare Zuluftversorgung
- Messung der Abgasgeschwindigkeit und -temperatur
- transportabel

Ein konventioneller Brennofen schied aus, da er keiner dieser Bedingungen in ausreichendem Maße erfüllen konnte. Dies ist vor allem darin begründet, dass aus technischer Hinsicht solche Öfen zur Versorgung eines Haushaltes mit Wärmeenergie konzipiert wurden und damit für Leistungen im Bereich mehrerer Kilowatt ausgelegt sind.

Eine Eigenkonstruktion war somit unumgänglich. Dabei waren neben den oben genannten Bedingungen einige zusätzliche Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Grundkonstruktion des Ofens aus handelsüblichen Rohmaterialien
- feuerfeste und temperaturstabile Montage der Brennkammer
- mit einfachen handwerklichen Mitteln kostengünstig baubar

Den prinzipiellen Aufbau der Brennkammer gibt die Skizze in der Abb. 3 wieder. Ich entschied mich für eine quaderförmige Brennkammer, die aus einem Oberteil und einem Unterteil besteht. Zwischen diesen beiden Hälften befindet sich ein Gitterrost (Fußabtreter) als Brennrost. Die Wände der Kammern bestehen aus 2 mm dickem Stahlblechen, die durch 4 mm dicke L-Profile aus Stahl miteinander verschraubt sind. Um ein Verziehen der Verschraubungen zu verhindern, habe ich die Schraubbolzen von innen in die L-Profile eingeschweißt. Durch die Verschraubungen kann man jede Seite der Kammer öffnen und Ober- und Unterteil einigermaßen leicht voneinander trennen.

Ein Computergebläse, dessen Luftdurchsatz durch Regeln der Betriebsspannung zwischen 0 und 18 V eingestellt werden kann, ist an einem Rohr von 10 cm Durchmesser und 20 cm Länge an die Vorderseite der unteren Kammer geschraubt, um eine Überhitzung zu vermeiden. Darüber erlaubt ein zweites Rohr gleicher Länge die Beobachtung des Brennvorganges - allerdings erwiesen sich normale Gläser den großen Temperaturunterschieden nicht als gewachsen und wurden dadurch durch eine Metallabdeckung ersetzt. An der gegenüberliegenden Seite der oberen Kammer befindet sich ein gusseiserner Rohrflansch, an den ein um 90° nach oben angewinkeltes

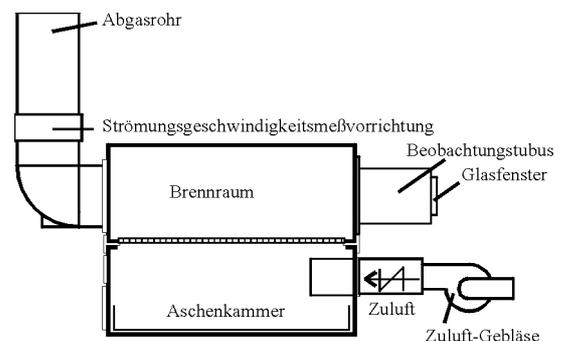


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau des Ofens



mehrteiliges Ofenrohr von 13 cm Durchmesser den Abgasstrom aufnimmt. In diesem Rohr befindet sich ein metallener Lüfterflügel, der an einer kugelgelagerten Achse befestigt ist, die unten aus dem Abgasrohr herausragt. Dort befindet sich eine Lichtschranke, mit der die Drehzahl der Achse erfasst werden kann. Dieser Strömungsmesser wurde mit einem ausgeliehenen Windmesser geeicht. Zur Temperaturmessung des Abgases dient ein NiCr-Element, das bis zu Temperaturen von 1100°C eingesetzt werden kann.

3.2 Messmethoden

Da der Flügel zur Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit verhältnismäßig schwer ist, besitzt er eine große mechanische Trägheit, was einerseits zu einem stetigen Kurvenverlauf führt, andererseits aber zur Folge hat, dass er bei einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeit einige Zeit benötigt, bis er den neuen Messwert richtig angibt. Um dieses Verhalten näher zu untersuchen, habe ich das Zuluftgebläse eingeschaltet und in regelmäßigen Zeitabständen die Drehzahl des Flügels gemessen, bis er die Enddrehzahl erreicht hatte. Anschließend schaltete ich das Gebläse wieder aus und setzte die Messungen

bis zum Stillstand des Flügels fort. Es ergab sich eine Kurve nach Abb. 4. Sowohl der Anstieg als auch die Abnahme folgen einem etwa exponentiellen Verlauf. Die Zeit bis zum Erreichen von 95% der Maximaldrehzahl liegt bei etwa 54 s, beim Auslaufen benötigt er dagegen 125 s bis zum Absinken auf 5% der ursprünglichen Drehzahl.

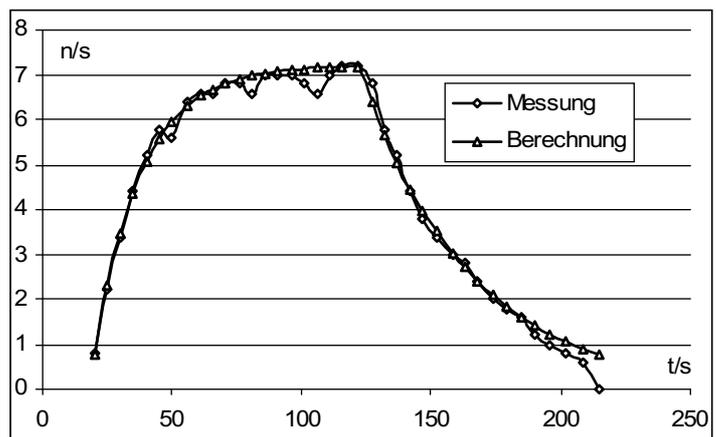


Abb. 4: Trägheit des Abgas-Strömungsmessers

Bei den nachfolgend beschriebenen Vorversuchen hatte ich das Thermome-

ter ursprünglich unmittelbar am Stutzen eingeführt, der aus der oberen Kammer in das Abgasrohr führt, um etwa in der Rohrmitte die Temperatur messen zu können. dabei stellte sich aber heraus, dass ich statt der Abgastemperatur von 300°C bis etwa 500°C die Flammentemperatur von knapp 1000°C gemessen hatte, die sich ergab, wenn die Flammen bis in das Rohr hineinschlügen. Um diesen Fehler zu umgehen, plazierte ich für die weiteren Messungen den Temperaturfühler etwa einen halben Meter hinter und oberhalb der Einmündung.

Zur Bestimmung der Drehzahl wird über eine Lichtschranke bei jeder Umdrehung der Flügelachse ein Signal erzeugt, das von einem Computer erfasst wird, der die Länge des Zeitintervalls bestimmt und nach der Eichung mit dem Windmesser in eine Durchflussmenge umrechnet. Außerdem dient er zur Protokollierung der manuell abgelesenen Temperaturen und besonderer Beobachtungen und speichert alle Werte verbunden mit einer Zeitangabe als Datei ab, die ich später z.B. mit einem Programm wie Excel auswerten kann.



3.3 Brennversuche

Bis zum jetzigen Zeitpunkt konnte ich einige Vorversuche am befeuerten Ofen vornehmen sowie eine konkrete Messung aufzeichnen.

3.3.1 Erprobung der Apparatur

Im ersten Vorversuch sollte festgestellt werden, ob die Brennkammer mit den Zusatzanbauten den thermischen Belastungen standhalten würden. Dazu verbrannte ich in der Kammer ca. 400 g trockenes gespaltenes Nadelholzes, das mit Papier auf dem Gitterrost angefeuert wurde. Es zeigten sich folgende Mängel:

- die etwa 2 mm dünne Achse begann bei höheren Drehzahlen zu schlagen, was einen weiteren Anstieg der Drehzahl verhinderte
- das Gleitlager verschmutzte sehr schnell, durch die dadurch vergrößerte Reibung blieb der Flügel des Strömungsmessers nach einiger Zeit stehen.
- Der Anfeuerungsprozess mit Hilfe von Papier erwies sich als unzuverlässig.
- Die Glasscheibe platzte nach wenigen Minuten, da die Strahlungswärme der Flammen sie zu stark aufheizte.
- Wenn die Flammen den Temperaturfühler berührten, wurde statt der Abgastemperatur die sehr viel höhere Flammentemperatur gemessen.
- Der Zugang zum Brennraum und zum Aschenkasten besonders bei heisser Brennkammer erwies sich als äußerst problematisch.

Die Probleme mit dem Strömungsmesser wurden dadurch vermindert, indem ich eine stärkere Achse (8 mm statt 2 mm Durchmesser) verwendete und diese nun auch am oberen Ende mit einem Kugellager lagerte (welches allerdings seinerseits bei hohen Temperaturen immer noch nicht ganz den gewünschten Effekt erzielt).

Für einen besseren Zugang zum Brennraum wurde die vordere Seite der Brennkammer, an der sich auch der Lüfterflansch befindet, mit einem Scharnier versehen.

Zum Anfeuern des Holzes setzte ich eine Metallschale ein, die mit einer bestimmten Spiritusmenge befüllt die Initialzündung liefert. Dieses Vorgehen hat nebenbei den Vorteil, dass ich durch Verwendung einer konstanten Spiritusmenge die dadurch zusätzlich zugeführte Energie besser berücksichtigen kann.

Da mir kein feuerfestes Glas zur Verfügung steht, musste ich auf eine direkte Beobachtung des Verbrennungsvorganges verzichten und den entsprechenden Flansch durch eine Metallplatte verschließen. Die Funktion der Brennkammer wird dadurch jedoch nicht wesentlich beeinträchtigt.

3.3.2 Aufnahme einer konkreten Messung

Für eine konkrete Messung sind folgende vorbereitende Tätigkeiten notwendig:

- Abmessen einer bestimmten Holzmenge



- Zerkleinern des Holzes auf einheitlich große Stücke
- Bestimmen des Feuchtegehaltes einer Probe durch Trocknen und Bestimmen des Masseunterschiedes
- Beschicken des Brennraumes mit dem Brennmaterial - dabei wird das Holz in einer regelmäßigen rechteckigen Anordnung aufgeschichtet (sog. „Pagodenfeuer“)
- Befüllen der Metallschale mit ca. 30 ml Spiritus

Die Durchführung der Messung kann nun beginnen. Sie läuft grundsätzlich nach folgendem Muster ab:

- Starten des Erfassungsprogrammes für Temperatur und Abgasströmungsmessung auf dem Computer
- Anzünden des Spiritus
- Verschließen der Brennkammer
- Nachdem das Holz Feuer gefangen hat (die Abgastemperatur erreicht mehr als 150 °C) das Zuluftgebläse auf den gewünschten Wert einregeln
- Messen der Temperatur in einem Zeitabstand von 30 Sekunden, die Speicherung der Werte erfolgt nach manueller Eingabe automatisch zusammen mit den Ergebnissen der Strömungsmessung durch das Computerprogramm.

Eine gesamte Messung dauert bis zum Erlöschen der letzten Glutreste je nach Einstellung der Zuluftmenge etwa 20 - 40 Minuten. Anschließend hat die Brennkammer immer noch eine Temperatur von über 100 °C, die dafür sorgt, dass die Abgastemperatur trotz fehlender Verbrennungsvorgänge immer noch deutlich über der Zulufttemperatur liegt. Nach etwa 10 Minuten hat die Oberseite der Brennkammer, die unmittelbar den Flammen ausgesetzt ist, eine so hohe Temperatur, dass sich das Stahlblech verfärbt (Anlauffarben), was auf eine Temperatur von mehr als 300 °C schließen lässt.

Die Auswertung der Messdateien wurde wegen der großen Datenmenge (40 - 80 Messwerte pro Messung) mit dem Programm EXCEL von Microsoft vorgenommen, was die unmittelbare Verarbeitung von Textdateien erlaubt. In der Abbildung 5 sind in Form einer Graphik die Verlaufskurven für Temperatur und Durchflussmenge des Abgases in Abhängigkeit von der Zeit schematisch dargestellt. Da zum Zeitpunkt, wo ich diese Messung aufgenommen habe, die Strömungs-

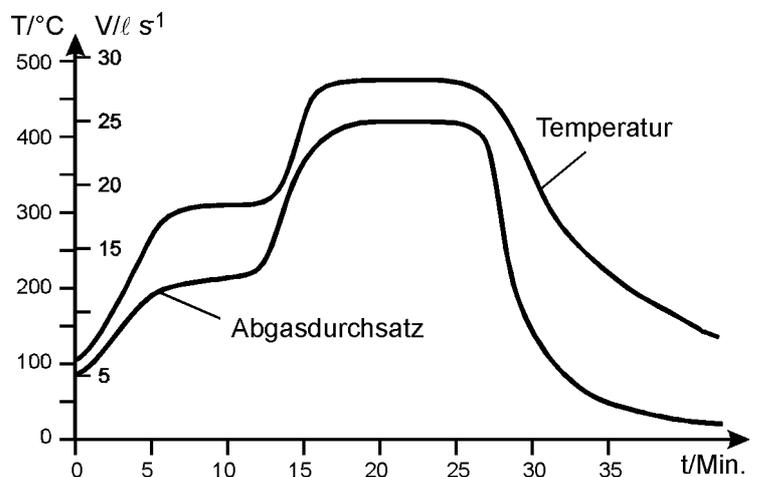


Abb. 5: Diagramm einer Beispielmessung (Schema)



messung wegen eines Programmfehlers häufig Aussetzer hatte, sind diese Werte stark schematisiert wiedergegeben.

In den ersten fünf Minuten steigt die Temperatur wegen des brennenden Papiers allmählich an. nach 5 Minuten ist das Papier verbrannt, aber nur ein Teil des Holzes ist von den Flammen erfasst. Es dauert weitere 5 Minuten, bis die Flammen plötzlich auf das gesamte Holz übergreifen. Nun bleibt die Temperatur für etwa 10 Minuten ziemlich konstant. Nach insgesamt 25 Minuten ist das gesamte Holz verbrannt, was an dem steilen Temperaturabfall zu erkennen ist. Nun wird ein großer Teil der Abgaswärme durch die in der Wandung der Brennkammer gespeicherte Wärmeenergie bewirkt.

Die Kurve für den Verlauf des Abgasdurchsatzes folgt im Prinzip der Temperatur nach. Es ist aber deutlich zu erkennen, dass sie nach Ende der Verbrennung sehr viel steiler abfällt als diese.

Eine Erklärung dafür findet sich in der Tatsache, dass nun keine Verbrennungsprodukte mehr den Abgasstrom anreichern, es wird nur noch die Zuluft erwärmt und dehnt sich dadurch aus. Mit zunehmender Abkühlung klingt auch dieser Effekt aus.

3.3.3 Auswertung einer Messung

In der Abbildung 6 ist noch einmal das Schema von Abb. 5 wiedergegeben. darin eingezeichnet sind die Hilfskonstruktionen,

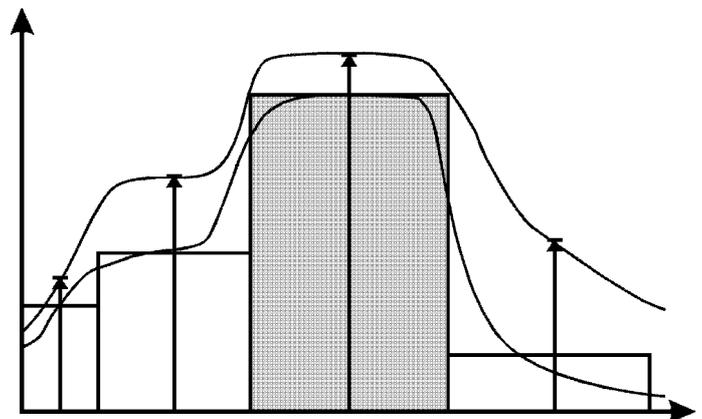


Abb. 6: Bestimmung der Abgasenergie durch Näherung

Die Rechtecke erlauben mir eine Abschätzung des Luftdurchsatzes innerhalb eines bestimmten Zeitintervalles, die Pfeile geben an, welche mittlere Temperatur diese Luftmenge hat. Die Eichung des Strömungsmessers erlaubt mir aus der Skalierung zu bestimmen, wie groß die entsprechende Luftmenge in Litern tatsächlich ist. Damit habe ich Aussagen über V_m sowie T_j , während die anderen Größen während des gesamten Versuches konstant blieben (Umgebungstemperatur und -druck). Daraus kann ich Q_p bestimmen.

Im konkreten Fall ergeben sich z.B. für das schraffierte Rechteck (Hauptphase der Verbrennung) folgende Werte und Rechnungen:

Zeitintervall:	$\Delta t = 13 \cdot 60 \text{ s} = 780 \text{ s}$
Volumendurchsatz:	$V_m = 25 \text{ l/s} \cdot 780 \text{ s} = 19\,500 \text{ l}$
Abgastemperatur:	$T_j = 475 \text{ °C} = 748 \text{ K}$
Anfangstemperatur:	$T_b = 4 \text{ °C} = 277 \text{ K}$
Umgebungsdruck:	$p_b = p_n = 1013 \text{ hPa}$
Zuluftdurchsatz:	$V_l = 0,71 \text{ l/s} \cdot 780 \text{ s} = 554 \text{ l}$
Molare Wärmekap.: Normtemperatur:	$c_{mp} = 29 \text{ KJ KMol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $T_n = 273 \text{ K}$
Normvolumen:	$V_n = 22,414 \text{ l}$



Nach Einsetzen in die Formel nach Gleichung (11) erhält man

$$Q_p = 29J \cdot Mol^{-1} \cdot K^{-1} \cdot \frac{19500l - 554l}{22,414l} \cdot \frac{1013hPa \cdot 273K}{1013hPa} \cdot \left(1 - \frac{277K}{748K}\right) = 4200KJ$$

Nach den Literaturangaben kann man pro Kilogramm Holz mit ca. 15 000 KJ Energieausbeute beim Verbrennen rechnen. Bezogen auf meine Ausgangsmasse von 0,4 Kg wäre demnach also ein Wert von 6000 KJ zu erwarten gewesen. Damit liegen meine Messwerte in der zu erwartenden Größenordnung. Einige Energieanteile wurden ja bei dieser Rechnung noch nicht berücksichtigt.

Weitere Messungen konnte ich leider noch nicht durchführen.

4. Fazit und Ausblick

Es hat sich als sehr aufwendig erwiesen, eine Apparatur zu bauen, die den großen thermischen Anforderungen gewachsen ist, dies betrifft insbesondere den Strömungsmesser im Abgasrohr. Die bisherigen Messungen haben gezeigt, dass diese Messmethode erwarten lässt, genauere Angaben über die chemische Energie zu erhalten, die in Holz gespeichert ist und die man durch Verbrennung in Wärme umsetzen kann.

Weitere Messungen mit gleichen Holzmengen aus ein und dem selben Stück müssen zeigen, wie groß die Reproduzierbarkeit der Messwerte ist.

Damit steht mir dann ein Gerät zur Verfügung, mit dem ich Hölzer unterschiedlicher Art und mit verschiedenem Trocknungsgrad untersuchen und vergleichen kann.

Durch genauere Untersuchung der Abgase vor allem unter chemischen Aspekten wäre es auch denkbar, Aussagen über die durch das Rauchgas entstehende Umweltbelastung zu machen oder gezielt nach Maßnahmen zu einer optimierten Verbrennung zu suchen.

5. Anhang

5.1 Danksagungen

Ich danke meinen Eltern dafür, dass sie mir die Zeit eingeräumt haben, mich intensiv mit diesem Projekt zu beschäftigen, das mich doch an vielen Nachmittagen nach Weesen geführt hat.

Mein Dank gilt auch dem Förderkreis Jugend Forscht, der mit seinen finanziellen Mittel den Bau der Brennkammer ermöglicht hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei der Familie Biedermann für die Geduld bedanken, mit der sie meine Experimente trotz intensiver Rauchentwicklung - auch beim Schweißen - erduldet hat. Herzlichen Dank auch an Herrn Biedermann, der mir immer wieder mit Rat und Tat zur Seite stand, wenn ich meinte, allein nicht weiterzukommen, und der mich bei nachlassender Motivation auch stets dazu überreden konnte, nicht die Flinte ins Korn zu werfen.

5.2 Literatur

- [1] W. Asselborn e.a.: „Chemie heute - Sekundarbereich II“, Schroedel-Verlag, Hannover 1998, S. 367
- [2] „Meyers Lexikon“, VEB Bibliogr. Institut, Leipzig 1976, S. 398
- [3] J. Grehn: „Metzler Physik“, Schroedel Schulbuchverlag, Hannover 1992, S. 158 f