

## **DIPLOMARBEIT**

### **Bestimmung des Brennwertes** **von heterogenen Materialien** **im Technikumsmaßstab**

ausgeführt am

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften  
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Univ.Prof. DI Dr. Hermann Hofbauer,  
DI Emmanuel Padouvas  
und Leopold Kleemann

durch

Gunilla Mitterbauer  
Anschützgasse 18  
1150 Wien  
[gmitterbauer@yahoo.de](mailto:gmitterbauer@yahoo.de)

Wien, September 2007

Gunilla Mitterbauer

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>ABSTRACT</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>GRUNDZÜGE DER ABFALLWIRTSCHAFT IN ÖSTERREICH</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002)</b>	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>Die Deponieverordnung</b>	<b>10</b>
<b>3.3</b>	<b>Der Bundes-Abfallwirtschaftsplan</b>	<b>11</b>
<b>3.4</b>	<b>Abfallaufkommen</b>	<b>12</b>
<b>3.5</b>	<b>Ausgewählte Abfallgruppen</b>	<b>16</b>
3.5.1	Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen	17
3.5.2	Restmüll	22
<b>3.6</b>	<b>Anlagen zur Abfallbehandlung – Verwertungs- und Beseitigungsanlagen</b>	<b>24</b>
3.6.1	Thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle)	24
3.6.2	Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle	26
3.6.3	Mechanisch-biologische Behandlungsanlagen (MBA)	28
3.6.4	Deponien	29
<b>4</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Grundlagen der Verbrennung</b>	<b>34</b>
5.1.1	Elementarzusammensetzung	34
5.1.2	Kennwerte der Verbrennung	35
<b>5.2</b>	<b>Analysen</b>	<b>39</b>
5.2.1	Kalorimetrie	39
5.2.2	Bestimmung des Wassergehaltes von Brennstoffproben	40
<b>6</b>	<b>PRAKTISCHER TEIL</b>	<b>41</b>
<b>6.1</b>	<b>Beschreibung der Anlage</b>	<b>41</b>
6.1.1	Verbrennungsteil	42
6.1.2	Kondensator	45
6.1.3	Messeinrichtungen	47
<b>6.2</b>	<b>Durchführung der Versuche</b>	<b>53</b>
6.2.1	Vorbereitung	53
6.2.2	Messung	54
6.2.3	Nachbereitung	54
<b>6.3</b>	<b>Auswertung der Versuche</b>	<b>55</b>
6.3.1	Auswertungsgleichungen	57
6.3.2	Auswahl eines optimalen Auswertungszeitraumes	67
6.3.3	Vorversuche	70
6.3.4	Versuche	75

---

<b>7.....</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>79</b>
<b>7.1 .....</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>79</b>
<b>7.2 .....</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>81</b>
7.2.1 .....	Unterdruck im Abzug/Kamin .....	81
7.2.2 .....	Messung eines Gasvolumenstroms .....	81
7.2.3 .....	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe .....	81
7.2.4 .....	Wärmeabstrahlung .....	82
7.2.5 .....	Kühlwassertemperatur .....	82
<b>8.....</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>83</b>
<b>9.....</b>	<b>ANHANG A.....</b>	<b>87</b>
<b>9.1 .....</b>	<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>87</b>
<b>9.2 .....</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
<b>9.3 .....</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>92</b>
<b>10 ..</b>	<b>ANHANG B.....</b>	<b>94</b>
<b>10.1 .....</b>	<b>Eckdaten der durchgeführten Versuche .....</b>	<b>94</b>
10.1.1 .....	Vorversuche .....	94
10.1.2 .....	Versuche .....	97
<b>10.2 .....</b>	<b>Abbrandkurven der durchgeführten Versuche .....</b>	<b>99</b>
10.2.1 .....	Vorversuche .....	99
10.2.2 .....	Versuche .....	105
<b>11 ..</b>	<b>ANHANG C.....</b>	<b>110</b>
<b>11.1 .....</b>	<b>Funktionsweise verschiedener Messgeräte.....</b>	<b>110</b>
11.1.1 .....	O <sub>2</sub> -Messung.....	110
11.1.2 .....	CO <sub>2</sub> /CO-Messung .....	111
11.1.3 .....	Temperaturmessung.....	112

## **1 KURZFASSUNG**

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Messapparatur im Technikumsmaßstab zur Bestimmung des Brennwertes von heterogenen Materialien in einem Bereich von 4.000 bis 10.000 kJ/kg.

Ziel dieser Arbeit im Speziellen ist es, anhand der Verbrennung von Buchenholz mit bekanntem Brennwert ( $\sim 18.000$  kJ/kg) eine Energiebilanz über die gesamte Messapparatur aufzustellen, in der künftig die Bestimmung des (dann unbekannt) Brennwertes von heterogenen Materialien stattfinden soll.

Die Motivation zur Entwicklung eines derartigen Messsystems ist begründet in der Österreichischen Deponieverordnung von 1996, wonach der Brennwert als Beurteilungskennwert für die Ablagerungsfähigkeit von Restmüll auf Deponien mit  $< 6.000$  kJ/kg festgesetzt wurde. Diese Maßnahme soll die direkte Ablagerung von Restmüll auf Deponien verhindern und so einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der klimarelevanten Gase, insbesondere von  $\text{CH}_4$ , leisten.

Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung und des hohen Inertstoffanteils der Abfallmaterialien sind die Probenaufbereitung und im Besonderen die Probengröße problematisch. Eine Probeneinsatzmenge im Technikumsmaßstab (ca. 5 – 10 kg anstelle von 1-g-Proben im Bombenkalorimeter) erscheint hier repräsentativ.

Zu diesem Zweck wird ein Feststoffkessel (mit einem Füllraumvolumen von 75 l) in Verbindung mit einem nachgeschalteten Rauchgaskondensator verwendet (das Kondensat wird gesammelt).

Sämtliche Messungen werden mit Buchenscheitholz mit bekanntem Brennwert und Wassergehalt durchgeführt.

Die Temperaturen des Rauchgases und des Kühlwassers werden an verschiedenen Stellen der Apparatur gemessen, elektronisch registriert und aufgezeichnet.

Eine Energiebilanz über die gesamte Anlage soll den Brennwert der eingesetzten Brennstoffprobe (Buchenholz) liefern.

Den Hauptbilanzierungsanteil bildet die durch das Kühlwasser abgeführte Wärmemenge.

Die weiteren Bilanzierungsanteile, die bezüglich dieser Versuchsanordnung die Verluste darstellen, gilt es hier zu quantifizieren (Rauchgasverluste durch unvollständige Verbrennung, Strahlungsverluste etc...). Um die (Un-)Vollständigkeit der Verbrennung nachvollziehen zu können, werden die im Rauchgas auftretenden Anteile an  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $(\text{C}_x\text{H}_y)$  und  $\text{O}_2$  gemessen und in der Energiebilanz berücksichtigt. Auch die Wärmeverluste durch Abstrahlung werden gemessen und miteinbezogen.

So kann überprüft werden, inwieweit die bei der Verbrennung von Buchenholz frei werdende Wärmemenge auf das Kühlwasser übergeht. Einerseits können Verluste (bezüglich dieser Versuchsanordnung) quantifiziert werden, andererseits werden weiterführende Versuchsanordnungen entworfen, die die noch bestehenden Defizite ausräumen sollen.

## **2 ABSTRACT**

The objective of the project is the development of a measuring facility in pilot plant scale for the determination of the calorific value of heterogeneous materials in a range from 4.000 to 10.000 kJ/kg.

In the presented work, an energy balance of the entire measuring system is made using beech wood as a fuel with known calorific value ( $\sim 18.000$  kJ/kg), aiming at a determination of system specific parameters and suitable settings for the test method.

The motivation for the development of such a measuring system originates from the Austrian ordinance on landfills from 1996. In this regulation, a maximum threshold value of 6.000 kJ/kg d.m. is set for the calorific value of residual waste that is deposited in order to prevent the direct landfill of residual waste and therefore contribute to the reduction of climate-relevant gases, particularly of  $\text{CH}_4$ .

Sample treatment and in particular the sample size are problematic due to the heterogeneous composition and the high share of inert substance of waste materials. The enhancement of the sample quantity up to approximately 5 – 10 kg, instead of the 1-g-samples in the usual bomb calorimeter method, allows for the inhomogeneity of waste and makes the sample representative.

For the determination of the calorific value a solid fuel boiler (with a capacity of 75 l) is used combined with a downstream flue gas condenser (the condensate is collected). All measurements are carried out using beech split logs with known calorific value and water content as a reference.

The flue gas temperatures and the cooling water temperatures are measured in different places of the system and logged electronically.

An energy balance over the entire system enables to compare the resulting calorific value with the energy content of the fuel sample used (beech wood).

The main part of the energy is the heat quantity, that is dissipated by the cooling water. The other parts of the balance, which represent the losses concerning this test arrangement, should be quantified (flue gas losses because of incomplete combustion, radiation losses etc...). In order to quantify the losses due to incomplete combustion in the energy balance, the flue gas composition is measured. Heat losses due to radiation are measured and included as well.

With this systematic approach losses (concerning this test arrangement) could be quantified and continuative test arrangements were designed to remedy the still existing deficiencies.

### **3 GRUNDZÜGE DER ABFALLWIRTSCHAFT IN ÖSTERREICH**

Im Folgenden soll etwas weiter ausgeholt werden, um die Anwendung und die Notwendigkeit eines Müllkalorimeters im Zusammenhang mit dem Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) und vor allem mit den Vorgaben der Deponieverordnung zu erklären.

Der Bundes-Abfallwirtschaftsplan macht (mind. alle 5 Jahre) – nach den Vorgaben des AWG – einerseits eine Bestandsaufnahme der Situation der Abfallwirtschaft in Österreich (hier sind Daten über das Abfallaufkommen in Österreich zu finden), andererseits entwirft er Szenarien für die darauffolgenden Jahre.

Es soll ein kurzer Überblick über das Abfallaufkommen in Österreich gegeben werden. Hier sollen im Folgenden 2 spezielle Abfallgruppen herausgegriffen und besprochen werden, für die eine spätere Verbrennung im Müllkalorimeter zur Brennwertbestimmung (zur Einhaltung der Vorgaben der Deponieverordnung) sinnvoll erscheint – nämlich „Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen“ und der darin enthaltene „Restmüll“. Diese beiden Gruppen sollen im Müllkalorimeter später verbrannt werden, um – im Sinne der Umsetzung der Deponieverordnung – deren Brennwert bestimmen zu können.

Schließlich soll auch ein Überblick über die bestehenden Anlagen zur Abfallbehandlung (Verwertungs- und Beseitigungsanlagen) gegeben werden, im Besonderen über thermische Behandlungsanlagen und Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle, da diese die wichtigste Alternative zur Deponierung darstellen, mechanisch-biologische Behandlungsanlagen (MBA), in denen eine Vorbehandlung des Abfallstoffes zur nachfolgenden thermischen Behandlung oder Deponierung erfolgen kann und schließlich eine kurze Bestandsaufnahme der bestehenden Deponien in Österreich.

### **3.1 Das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002)**

Das Prinzip der Nachhaltigkeit ist heute allgemein anerkannte Leitlinie des Umweltschutzes, was auch im Besonderen für die Abfallwirtschaft gilt.

Im Abfallwirtschaftsgesetz aus dem Jahr 2002 (AWG 2002) sind die Ziele und Grundsätze einer nachhaltigen Abfallwirtschaft als Leitlinien für staatliches und privates Handeln verankert. Vorrangiges Ziel ist der Schutz von Mensch und Umwelt im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeit, was durch möglichst geringe Emissionen und bestmögliche Nutzung vorhandener Ressourcen erreicht bzw. begleitet wird (§ 1 Abs. 1).

Laut AWG 2002 (§ 1 Abs. 2) gelten folgende Grundsätze:

1. Abfallvermeidung
2. Abfallverwertung – stofflich oder thermisch, soweit dies ökologisch zweckmäßig und technisch möglich ist und die dabei entstehenden Mehrkosten im Vergleich zu anderen Verfahren der Abfallbehandlung nicht unverhältnismäßig sind und ein Markt für die gewonnenen Stoffe oder die gewonnene Energie vorhanden ist oder geschaffen werden kann.
3. Abfallbeseitigung durch Behandlung mit biologischen, thermischen, chemischen oder physikalischen Verfahren; feste Rückstände sind möglichst reaktionsarm und ordnungsgemäß abzulagern.

Im Vergleich zum AWG 2000 (1990) wurde das Vorsorgeprinzip in den Zielen des AWG 2002 noch explizit und wiederholt um das Prinzip der Nachhaltigkeit ergänzt (§ 1 Abs. 1 und § 1 Abs. 3 Z 3) und die Emissionen von Luftschadstoffen und klimarelevanten Gasen wurden miteinbezogen.

### **3.2 Die Deponieverordnung**

Die Deponieverordnung aus dem Jahre 1996 ist eine „Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen“ und regelt die zur Umsetzung der Ziele und Grundsätze gemäß AWG und die zum Schutz öffentlicher Interessen im Sinne des AWG gebotene, dem Stand der Technik entsprechende Ausstattung und Betriebsweise der Ablagerung von Abfällen auf Deponien.

Folgend dem AWG 2002 (§ 76) ist diese Deponieverordnung von allen Inhabern einer seit 1997 bestehenden, nach dem AWG 1990 (§ 29 Abs. 1) genehmigten oder wasserrechtlich bewilligten, noch nicht ordnungsgemäß stillgelegten oder geschlossenen Deponien gemäß dem jeweiligen Deponietyp einzuhalten.

Im Speziellen sind gemäß § 76 Abs. 1 AWG 2002 seit 1. Jänner 2004 die Anforderungen betreffend das Verbot der Deponierung einzuhalten, was für die vorliegende Arbeit maßgeblich relevant ist. Unter „Abfallqualität und Eingangskontrolle“ (III. Abschnitt) – „Verbot der Deponierung“ findet sich nämlich unter § 5 unter anderen auch der folgende Ausschluss:

Die Ablagerung folgender Abfälle ist verboten:

7. Abfälle, deren Anteil an organischem Kohlenstoff (TOC = total organic carbon) mehr als 5 Masseprozent beträgt; ausgenommen sind
  - f) Abfälle aus mechanisch-biologischer Vorbehandlung, die in gesonderten Bereichen auf einer Massenabfalldeponie abgelagert werden, sofern der aus der Trockensubstanz bestimmte Verbrennungswert (oberer Heizwert = Brennwert) dieser Abfälle weniger als 6.000 kJ/kg beträgt. Die Vermischung eines Abfalls aus mechanisch-biologischer Vorbehandlung mit heizwertarmen Materialien oder Abfällen unter der Zielsetzung, diesen Grenzwert zu unterschreiten, ist unzulässig.

Daraus ergibt sich nun die Notwendigkeit, bestimmen zu können, ob besagte Abfälle tatsächlich einen Brennwert  $H_0 < 6.000 \text{ kJ/kg}$  haben und demzufolge überhaupt deponiert werden dürfen oder einer thermischen Verwertung zugeführt werden müssen.

### **3.3 Der Bundes-Abfallwirtschaftsplan**

In Österreich fallen jährlich rund 54 Mio. Tonnen Abfälle an (Bezugsjahr 2004). Dies stellt hohe Ansprüche an die österreichische Abfallwirtschaft in Bezug auf eine geordnete Erfassung und Behandlung sowie die Einhaltung der gesetzlichen Regelungen.

Zur Verwirklichung der Ziele und Grundsätze des AWG 2002 hat der Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft mindestens alle 5 Jahre einen Bundes-Abfallwirtschaftsplan für Österreich zu erstellen (§ 8 Abs. 1 AWG 2002). 2006 wurde der 5. Plan seit dem Jahr 1992 veröffentlicht.

Der Bundes-Abfallwirtschaftsplan gilt einerseits als „Weißbuch“ der österreichischen Abfallwirtschaft, andererseits werden die gemeinschaftsrechtlich erforderlichen Programme (z. B. für Verpackungen, Batterien) umgesetzt und in den Behandlungsgrundsätzen wird der Stand der Technik beschrieben, der erforderlich ist, um Beeinträchtigungen der öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3 AWG 2002) zu vermeiden.

Der Bundes-Abfallwirtschaftsplan hat folgende Inhalte zu umfassen (§ 8 Abs. 2 AWG 2002):

- Bestandsaufnahme der Situation der Abfallwirtschaft
- regionale Verteilung der Anlagen zur Verwertung und Beseitigung von Abfällen
- Grundlagen und Elemente der aus § 1 abgeleiteten geplanten Strategien zur Abfallvermeidung und -verwertung (im aktuellen Fall für den Zeitraum 2006 bis 2011)
- Darstellung der Vorgaben und Maßnahmen des Bundes zur Erreichung der Ziele und Grundsätze der Abfallwirtschaft gemäß AWG 2002
- besondere Vorkehrungen für bestimmte Abfälle (z. B. Abfallverbringung), insbesondere Behandlungspflichten und Programme

### 3.4 Abfallaufkommen

Zuerst sei darauf hingewiesen, dass alle in diesem Kapitel angeführten Zahlen und Fakten über das Abfallaufkommen in Österreich dem aktuellen Bundes-Abfallwirtschaftsplan (2006) (siehe Kapitel 3.3) entnommen sind.

Gegenüber dem letzten Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2001 (Bezugsjahr 1999) ist das gesamte Abfallaufkommen um rund 5 Mio. Tonnen angestiegen und beläuft sich unter Berücksichtigung der Aushubmaterialien von rund 22 Mio. Tonnen auf über 54 Mio. Tonnen pro Jahr (Bezugsjahr 2004).

Dieses Gesamtabfallaufkommen von rund 54 Mio. Tonnen setzt sich nicht nur aus primär angefallenen Abfällen zusammen, sondern es werden auch (Sekundär-)Abfälle hinzugerechnet, die aus der Behandlung von Primärabfällen resultieren (z. B. Schlacken und Aschen aus der Verbrennung von Restmüll, Tiermehl und Tierfett aus der Behandlung von tierischen Nebenprodukten).

Das gesamte Aufkommen an Primärabfällen beläuft sich auf rund 52 Mio. Tonnen.

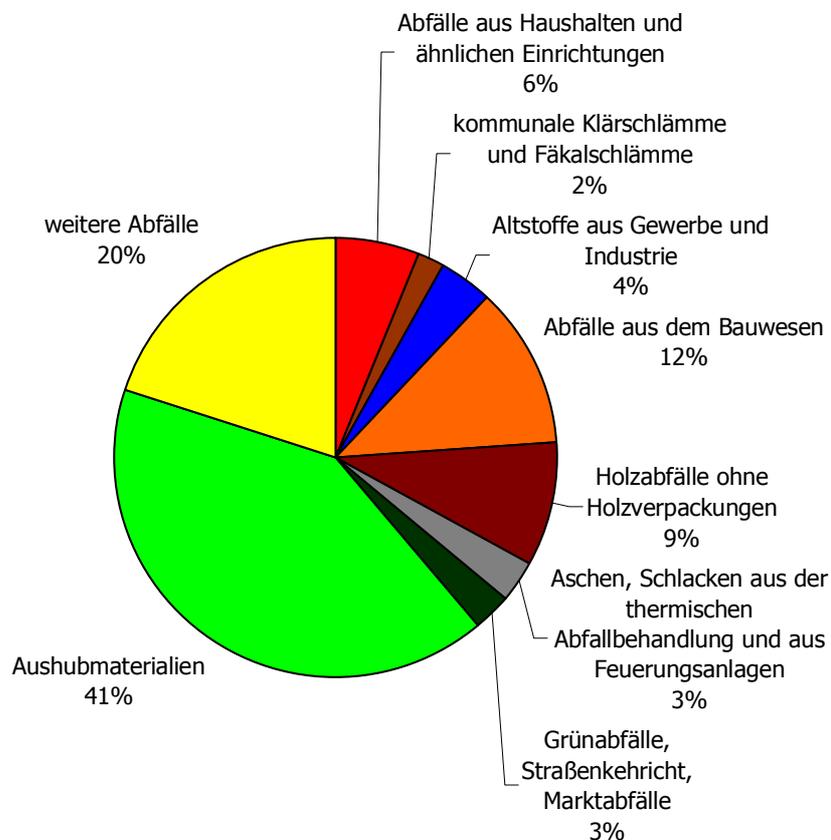


Abbildung 3-1: Bundesweites Abfallaufkommen (Primär- und Sekundärabfälle)

<b>Ausgewählte Abfallgruppen</b>	<b>Aufkommen [Mio. t/a]</b>
Aushubmaterialien	22,00
Weitere Abfälle: z. B. Abfälle mineralischen Ursprungs, gefährliche Abfälle, sonstige feste Siedlungsabfälle einschließlich ähnlicher Gewerbeabfälle, Kunststoffabfälle, Gummiabfälle, Shredderrückstände u. a. *	10,23
Abfälle aus dem Bauwesen	6,61
Holzabfälle ohne Verpackungen *	4,95
Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen *	3,42
Altstoffe aus Gewerbe und Industrie	2,31
Aschen und Schlacken aus der thermischen Abfallbehandlung und von Feuerungsanlagen *	1,57
Grünabfälle	1,31
Kommunale Klärschlämme (30 % Trockensubstanz)	0,79
Tierische Nebenprodukte	0,58
Fäkalschlämme (5 % Trockensubstanz)	0,41
Straßenkehricht	0,20
Altfahrzeuge *	0,15
Küchen- und Kantinenabfälle	0,15
Elektroaltgeräte *	0,12
Medizinische Abfälle *	0,06
Marktabfälle	0,02
Summe (ohne Bodenaushub)	~ 33
Summe (mit Bodenaushub)	~ 55

\* in diesen Abfallgruppen sind Überschneidungen mit gefährlichen Abfällen möglich (z. B. Bahnschwellen werden sowohl in der Abfallgruppe Holzabfälle als auch in der Abfallgruppe „weitere Abfälle“ dargestellt).

Eine Addition des Aufkommens in dieser Tabelle spiegelt daher nicht das gesamte Abfallaufkommen in Österreich wider.

Tabelle 3-1: Jährliches bundesweites Abfallaufkommen 2004 für ausgewählte Abfallgruppen (Primär- und Sekundärabfälle)

Wesentliche Zu- und Abnahmen des Abfallaufkommens gegenüber dem letzten Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2001 (Bezugsjahr 1999) zeigen sich in folgenden Bereichen:

- Die größte Massenverringerung ist bei Restmüll zu verzeichnen. Im Jahr 2003 wurden rund 1,8 Mio. Tonnen inkl. Altlastenmaterial abgelagert, 2004 waren es rund 283.000 Tonnen. Hier zeigt sich, dass die Deponieverordnung bereits sehr erfolgreich umgesetzt wurde.
- Es erfolgte ein weiterer Anstieg des Abfallaufkommens aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen um über 10 % innerhalb von 5 Jahren.
- Die Sammelergebnisse bei der getrennten Erfassung einiger Altstoffarten (biogene Abfälle, Holz, Papier) sowie bei Problemstoffen haben sich verbessert.
- Die Zunahme um rund 59 % bzw. um rund 630.000 Tonnen bei „Schlacken und Aschen, Flugaschen und -stäube aus der thermischen Abfallbehandlung und aus Feuerungsanlagen“ lässt sich aufgrund der Inbetriebnahme zusätzlicher Abfallverbrennungsanlagen erklären. Die Erhöhung ist begründet durch eine konstant steigende Einbringung von Abfällen sowie von heizwertreichen Materialien in Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen.
- Aushubmaterialien (größter Anteil von derzeit rund 41 % am Gesamtabfallaufkommen) sind um weitere 2 Mio. Tonnen angestiegen. Ausschlaggebend dafür ist in erster Linie die vermehrte Bautätigkeit bei den Österreichischen Bundesbahnen.
- Das Aufkommen an Baurestmassen, Baustellenabfällen und Gleisschotter hat sich um rund 900.000 Tonnen verringert. Da das Aufkommen von der Entwicklung des Tief- und Hochbaus abhängig ist, sind die Angaben jährlich unterschiedlich und folglich nicht exakt prognostizierbar.
- Das Aufkommen an Holzabfällen ist insgesamt um rund 1,5 Mio. Tonnen angestiegen. Gründe dafür sind verbesserte getrennte Sammlungen (Gewerbe und Industrie/kommunale Abfälle) sowie vermehrter Holzeinschlag und Holzproduktion.
- Bei den Abfällen aus „Wasseraufbereitung, Abwasserbehandlung und Gewässernutzung“ ist ein Rückgang um rund 400.000 Tonnen zu verzeichnen. Wesentlicher Grund dafür ist der Anstieg des Anschlussgrades der österreichischen Bevölkerung an das öffentliche Kanalnetz und der damit geringere Anfall von Fäkalschlamm aus Senkgruben.
- Mit rund 1 Mio. Tonnen ist der Anteil an gefährlichen Abfällen, die in Anlagen für gefährliche Abfälle behandelt wurden, gleich geblieben.

Die Meldungen der Anlagenbetreiber ergaben für das Jahr 2004 eine deponierte Menge von rund 9,7 Mio. Tonnen. Gegenüber den Meldungen aus dem Vorjahr ist eine Verringerung der abgelagerten Abfälle um rund 8 % erkennbar.

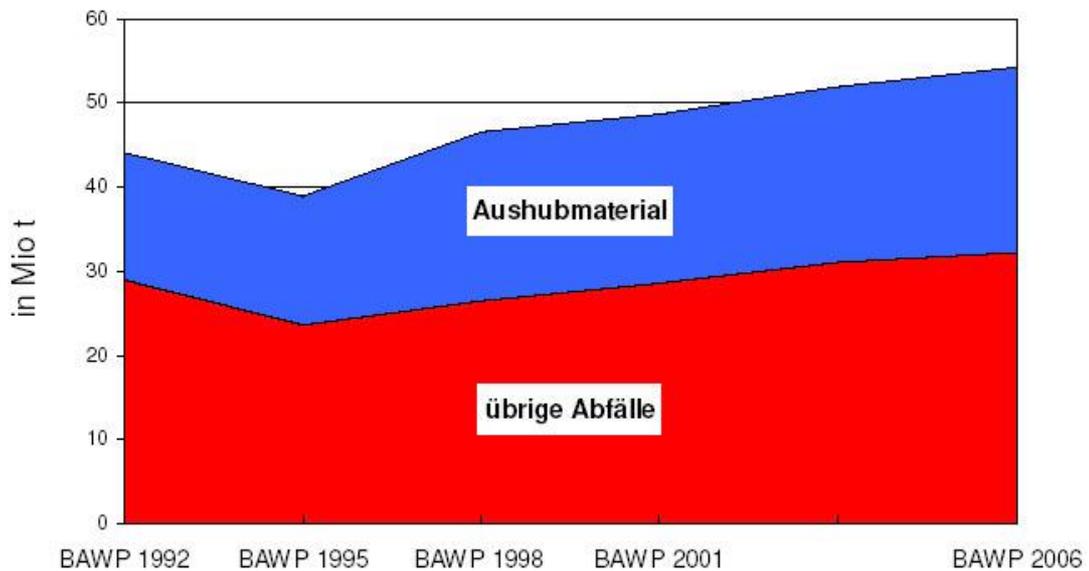


Abbildung 3-2: Entwicklung des Abfallaufkommens

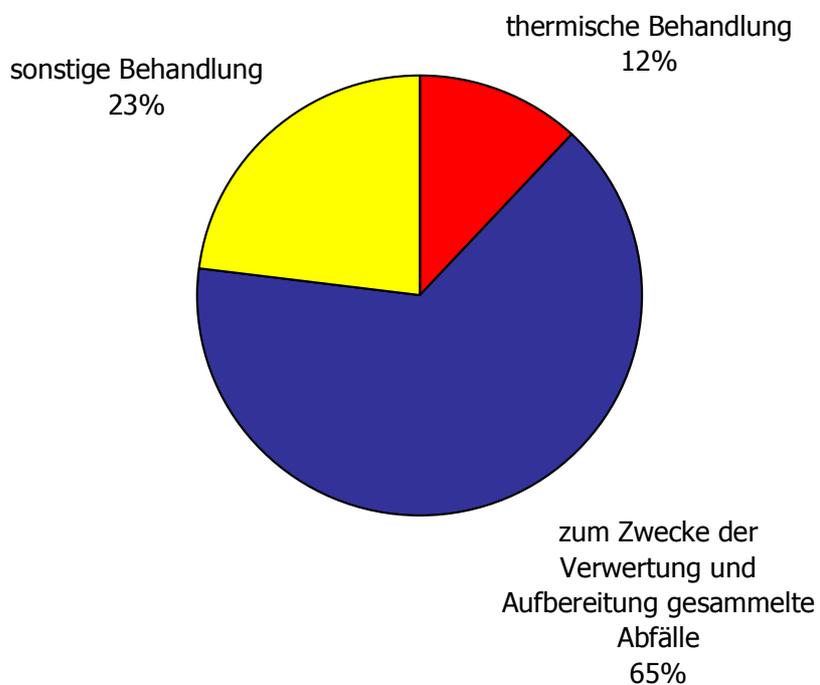


Abbildung 3-3: Verwertungs- u. Beseitigungsanteile 2004 (100 % ~ 54 Mio. Tonnen)

<b>Arten der Anlagen - einschließlich innerbetrieblicher Anlagen</b>	<b>Anzahl</b>
Thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle)	180
Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle	9
Chemisch-physikalische Behandlungsanlagen	37
Aufbereitungsanlagen für spezielle Abfälle (Altautos, Elektronikaltgeräte, Kunststoffe, Fette und Frittieröle, Chemikalien, Batterien, u. a.)	199
Shredder	6
Aufbereitungsanlagen für Baurestmassen	293
Biotechnische Behandlungsanlagen zur Vorbehandlung von Restmüll und sonstigen Abfällen (MBA = mechanisch-biologische Behandlungs-Anlagen)	16
Anlagen zur aeroben biotechnischen Behandlung getrennt gesammelter biogener Abfälle, Grünabfälle u. a. (Kompostierungsanlagen)	539
Anlagen zur Sortierung getrennt erfasster Altstoffe und anderer Abfälle	123
Anlagen zur Verwertung getrennt erfasster Altstoffe	43
Anlagen zur anaeroben biotechnischen Behandlung (Biogasanlagen)	406
Deponien (Massenabfall, Reststoff, Baurestmassen, Bodenaushub)	666

Tabelle 3-2: Abfallbehandlungsanlagen in Österreich (Datenstand April 2006)

### **3.5 Ausgewählte Abfallgruppen**

Hier werden 2 Abfallgruppen herausgegriffen und unter Berücksichtigung einer gleichbleibenden inhaltlichen und formalen Struktur betrachtet – nämlich „Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen“ und der darin enthaltene „Restmüll“, da diese Gruppen in dem hier besprochenen Müll-Kalorimeter später verbrannt werden sollen, um so deren Brennwert zu bestimmen.

### 3.5.1 Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen

Diese „Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen“ setzen sich aus den Fraktionen Restmüll, Sperrmüll, Altstoffe (Papier, Glas, Metall, Kunststoff, Textilien u. a.), biogene Abfälle und Problemstoffe zusammen und entsprechen im Wesentlichen dem Begriff „Siedlungsabfälle“ gem. AWG 2002 (§ 2 Abs. 4 Z 2).

Sie stammen aus Haushalten, aus Verwaltungseinrichtungen des Gewerbes, der Industrie und der öffentlichen Verwaltung, aus Kindergärten, aus Schulen, aus Krankenhäusern, aus dem Kleingewerbe, aus der Landwirtschaft, von Märkten und von sonstigen Anfallstellen, sofern diese an die kommunale Müllabfuhr angeschlossen sind.

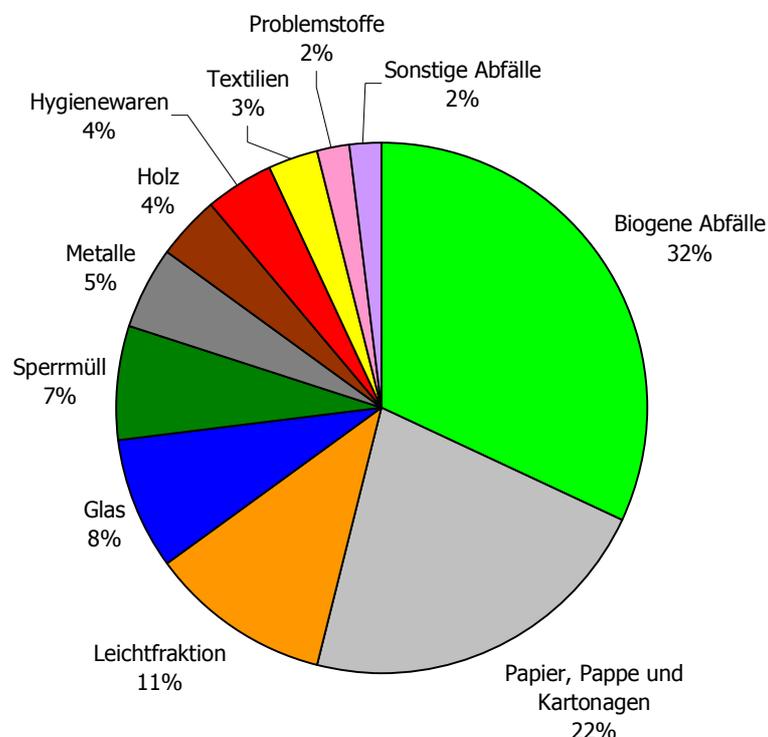


Abbildung 3-4: Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen im Jahr 2004, Teilfraktionen

Entscheidend für die Zusammensetzung der Abfälle sind die Siedlungsstruktur, der Gartenanteil, die vorherrschenden Energieträger zur Raumbeheizung, die Bevölkerungsdichte, die demografische Entwicklung (wirtschaftliche und soziale Faktoren), das Kaufverhalten, die Teilnahme der Bevölkerung an getrennten Sammlungen, der Tourismus, die Jahreszeiten u. a.

### 3.5.1.1 Abfallaufkommen

Im Jahr 2004 sind rund 3,42 Mio. Tonnen Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen angefallen.

Davon wurden über die öffentliche Müllabfuhr rund 1.383.000 Tonnen Restmüll und rund 236.000 Tonnen Sperrmüll abgeführt.

Rund 1,8 Mio. Tonnen oder rund 53 % des gesamten Aufkommens konnten über getrennte Sammlungen erfasst werden.

<b>Hauptfraktionen</b>	<b>1999 in Tonnen</b>	<b>2004 in Tonnen</b>	<b>Veränderung in Tonnen</b>	<b>Veränderung in %</b>
Gesamtaufkommen der Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen	3.096.000	3.418.700	+322.700	+10,4
Restmüll	1.315.000	1.382.600	+67.600	+5,1
Sperrmüll	218.500	236.400	+17.900	+8,2
Getrennt erfasste Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen	1.562.400	1.799.700	+237.300	+15,2
Problemstoffe	23.200	41.300	+18.100	+78,0
Altstoffe (ohne sortierte Altstoffe aus MBA und Splitting)	1.061.200	1.212.100	+150.900	+14,2
Biogene Abfälle	478.000	546.300	+68.300	+14,3
Summe in Tonnen / Durchschnitt in %	7.754.300	8.637.100	+882.800	Ø +20,8

Tabelle 3-3: Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen - Aufkommen nach Hauptfraktionen im Vergleich der Jahre 1999 und 2004

Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen haben einen Anteil von rund 6 Masseprozent am gesamten Abfallaufkommen (rund 3,42 Mio. Tonnen von rund 54 Mio. Tonnen).

Die Gründe für die Zunahme des Aufkommens der Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen liegen, wie auch bereits in den Vorjahren zu beobachten war, in einem weiteren Anstieg der Wohnbevölkerung, in einer dementsprechenden Zunahme der Haushalte (Singlehaushalte), in der Abnahme der durchschnittlichen Haushaltsgröße, in der vermehrten Nachfrage nach Fertiggerichten in kleineren, verpackten Portionen und in einem vermehrten marktseitigen Angebot an Einwegprodukten.

### **3.5.1.2 Verwertung und Beseitigung**

Die Verwertung und Beseitigung der rund 3,42 Mio. Tonnen Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen erfolgte 2004 anteilmäßig in folgenden Behandlungsanlagen (erster Behandlungsschritt nach Splitting):

<b>Wesentliche Behandlungsschritte</b>	<b>1999 in %</b>	<b>2004 in %</b>
(Mechanisch-)Biologische Vorbehandlung von Restmüll	6,3	11,2
Thermische Behandlung von Rest- und Sperrmüll	14,7	28,3
Behandlung von getrennt gesammelten Problemstoffen	0,8	1,2
Stoffliche Verwertung von getrennt gesammelten Altstoffen und der Altstoffe aus dem Splitting	34,3	35,6
Biotechnische Verwertung von getrennt gesammelten biogenen Abfällen	5,4	16,0
Unbehandelt auf Deponien	28,5	7,7
Summe	90	100

Tabelle 3-4: Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen Verwertung und Beseitigung im Vergleich der Jahre 1999 und 2004 (Erster Behandlungsschritt nach Splitting)

Gegenüber dem Jahr 1999 hat sich die absolut auf Deponien abgelagerte Masse um rund 519.000 Tonnen bzw. um rund 39 % verringert (von 1.333.000 Tonnen auf 814.000 Tonnen).

Der noch direkt und unbehandelt auf Deponien abgelagerte Anteil wird sich – bedingt durch die Vorgaben der Deponieverordnung – weiter drastisch verringern.

Mit den Rückständen aus der mechanisch-biologischen Vorbehandlung und aus der thermischen Behandlung sowie den Rückständen aus der Behandlung von Altstoffen und von biogenen Abfällen gelangten 2004 insgesamt 814.000 Tonnen oder rund 24 % der Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen auf Deponien.

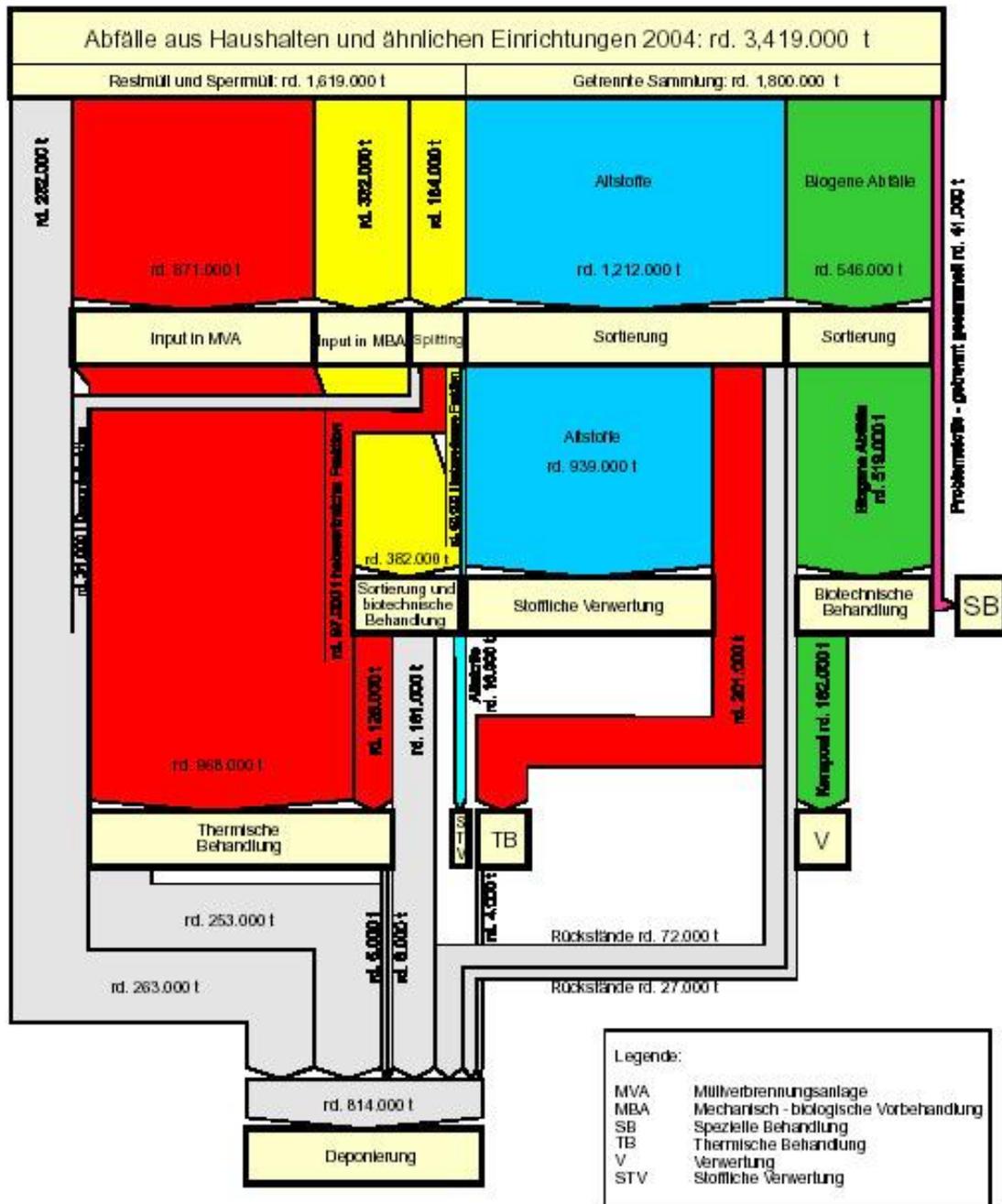


Abbildung 3-5: Stofffluss von Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen, 2004

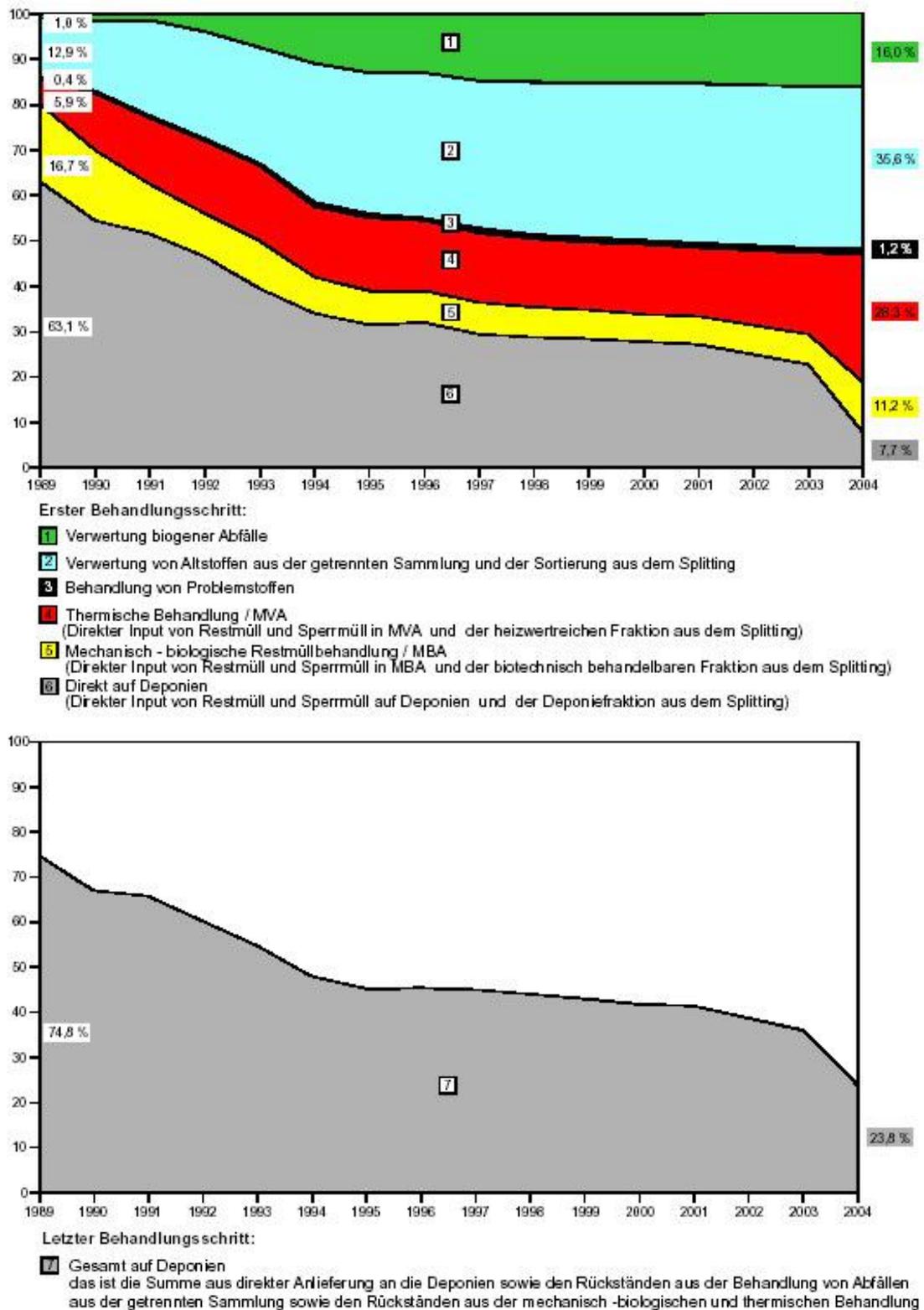


Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7: Verwertung und Beseitigung von Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen 1989 – 2004

### 3.5.2 Restmüll

Unter Restmüll versteht man sämtliche in Haushalten und ähnlichen Einrichtungen üblicherweise anfallende feste Abfälle ausgenommen Sperrmüll und getrennt gesammelte Abfälle wie Altstoffe (Papier, Glas, Metalle, Kunststoffe und andere), biogene Abfälle und Problemstoffe.

Bezogen auf das gesamte Aufkommen von Restmüll stellen „Papier, Pappe, Wellpappe und Kartonagen“ sowie „Biogene bzw. organische Abfälle“ die hauptsächlichen Anteile dar.

Weitere relevante Anteile des Restmülls sind „Kunst- und Verbundstoffe“, „Hygieneartikel“, „Textilien“, „Glas“, „Metalle“, „Holz“ und „Problemstoffe“.

Ein sonstiger nicht unwesentlicher Anteil besteht aus der nicht klassifizierbaren „Fein- und Grobfraktion“ des Restmülls.

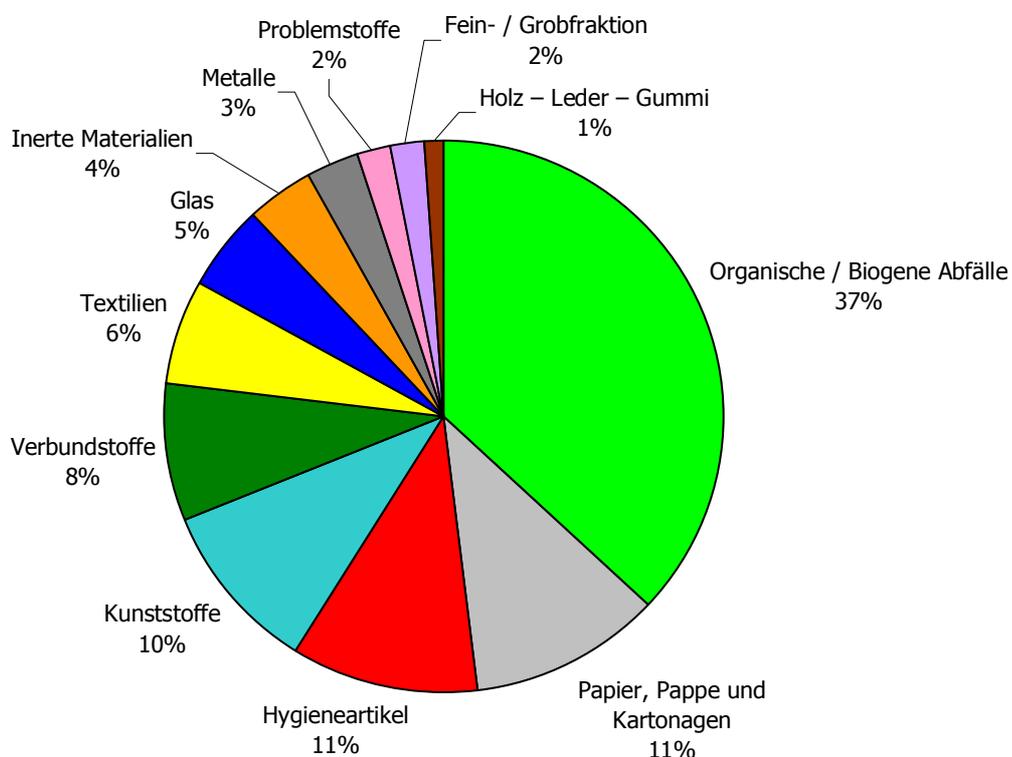


Abbildung 3-8: Zusammensetzung des Restmülls im Jahr 2004

### 3.5.2.1 Sammlung

Restmüll aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen wird unter Verwendung genormter Abfallbehälter über die öffentliche Müllabfuhr bzw. über private Unternehmen im Auftrag der Kommune abgeführt.

Haushaltsähnliche Abfälle aus Landwirtschaft, Gewerbe, Industrie und von öffentlichen Einrichtungen und Märkten werden ebenfalls zum überwiegenden Teil über die kommunale Müllabfuhr erfasst.

Der Anteil des Restmülls am gesamten Abfall aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen ist abhängig von den zur Sammlung des Restmülls angebotenen Behältergrößen, d. h. je größer das bereit gestellte Behältervolumen, desto mehr Anteile an Sperrmüll werden in diese Container eingebracht.

### 3.5.2.2 Beseitigung

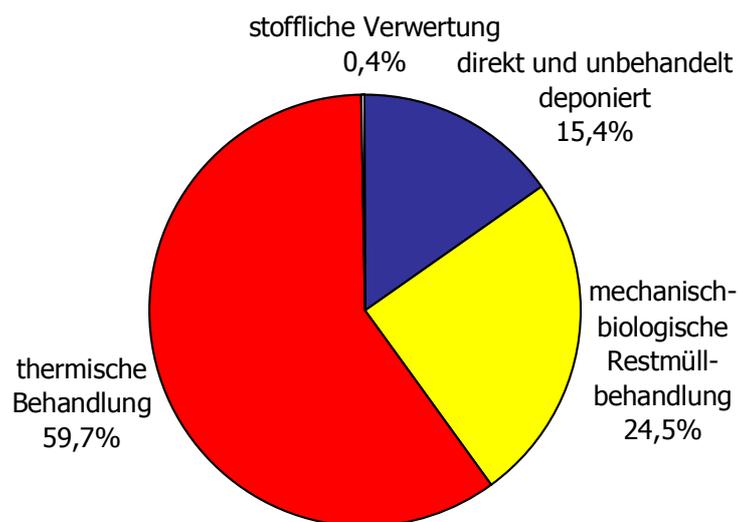


Abbildung 3-9: Beseitigungsanteile von Restmüll 2004 (100 % ~ 1,38 Mio. Tonnen)

Die Masse an Restmüll wird weiterhin leicht ansteigen, zum Teil bedingt durch eine Umstellung der umfassenden Sammlung der Leichtfraktion auf die Sammlung von stofflich verwertbaren Kunststoff-Emballagen.

Trotz einer absehbaren Steigerung des gesamten Aufkommens an Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen werden weitere Optimierungen der getrennten Sammlungen einen größeren Anstieg des Aufkommens von Restmüll verhindern.

### **3.6 Anlagen zur Abfallbehandlung – Verwertungs- und Beseitigungsanlagen**

Von allen Verwertungs- und Beseitigungsanlagen (z. B. chemisch-physikalische Behandlungsanlagen; Anlagen zur anaeroben biotechnischen Behandlung = Biogasanlagen; Anlagen zur aeroben biotechnischen Behandlung getrennt gesammelter biogener Abfälle, Grünabfälle u. a. = Kompostierungsanlagen; Aufbereitungsanlagen für spezielle Abfälle wie Altfahrzeuge, Elektronikaltgeräte, Kunststoffe, Fette und Frittieröle, Chemikalien, Batterien u. a.) soll hier speziell auf die thermischen Behandlungsanlagen (inkl. Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle) eingegangen werden. Auch die biotechnischen Behandlungsanlagen zur Vorbehandlung von Restmüll und sonstigen Abfällen (MBA) und die Deponien spielen in diesem Zusammenhang eine große Rolle.

#### **3.6.1 Thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle)**

Ziel der thermischen Behandlung von Abfällen ist:

- Reduktion des Gefährdungspotentials von Abfällen durch die Zerstörung ihrer organischen Anteile und durch die Konzentrierung der anorganischen Anteile unter nachfolgender Konditionierung (Immobilisierung) der Reststoffe
- Reduktion der Masse und des Volumens an zu deponierenden Abfällen
- Hygienisierung der Abfälle
- Energiegewinnung

Die abfallwirtschaftliche Anlagen- und Stoffdatenbank weist 180 Anlagen zur thermischen Behandlung von Abfällen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle) mit einer Gesamtkapazität von zumindest 2,9 Mio. Tonnen pro Jahr aus. (Da nicht von allen Anlagen Kapazitäten bekannt sind, handelt es sich bei der Gesamtkapazität um einen Mindestwert.)

Ein Teil der Behandlungsanlagen dient ausschließlich der thermischen Behandlung von Abfällen (z. B. Fernwärme Wien / Werk Simmeringer Haide); es existieren aber auch „Anlagen zur Mitverbrennung“ (z. B. Betriebe der Zement- und Stahlindustrie, der Energiewirtschaft, der Zellstoff- und Papierindustrie, der Span- und Faserplatten verarbeitenden Industrie), die neben herkömmlichen Brennstoffen wie Öl, Kohle, Holz u. a. anteilig auch aufbereitete Abfälle wie Kunststoffe (z. B. sortierte Leichtfraktion oder Getränke-Verbundverpackungen) oder Gummi (z. B. Altreifen) thermisch behandeln.

In den thermischen Behandlungsanlagen werden hauptsächlich folgende Abfälle unter Nutzung der Energieinhalte verbrannt:

- Reststoffe aus der Holzbearbeitung / -verarbeitung sowie Altholz
- Reststoffe aus der Papier- und Zellstoff-Produktion
- Kunststoffe und Verpackungsmaterialien
- Altreifen und sonstige Gummiabfälle
- Heizwertreiche Fraktionen aus der Sortierung von Abfällen
- Klärschlämme und sonstige Schlämme
- Shredder-Rückstände
- Gefährliche Abfälle und Altöle
- Tiermehl und Tierfett

<b>Bundesland</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Mindestkapazitäten in t/a</b>
Burgenland	7	60.100
Kärnten	15	228.000
Niederösterreich	24	33.200
Oberösterreich	41	906.000
Salzburg	24	105.000
Steiermark	40	1.301.500
Tirol	1	5.400
Vorarlberg	4	31.000
Wien	24	257.000
Österreich gerundet	180	2,9 Mio.

Tabelle 3-5: Thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle) (Datenstand April 2006)

Von den 180 thermischen Behandlungsanlagen verbrennen 128 Anlagen nur Abfälle, die innerhalb des eigenen Betriebes anfallen.

Die weiteren 52 Anlagen mit einer Mindestkapazität von rund 2,0 Mio. Tonnen sind zum Teil öffentlich zugänglich, übernehmen zum Teil aber auch nur Abfälle von bestimmten Partnerunternehmen, so genannte „ausgewählte Dritte“.

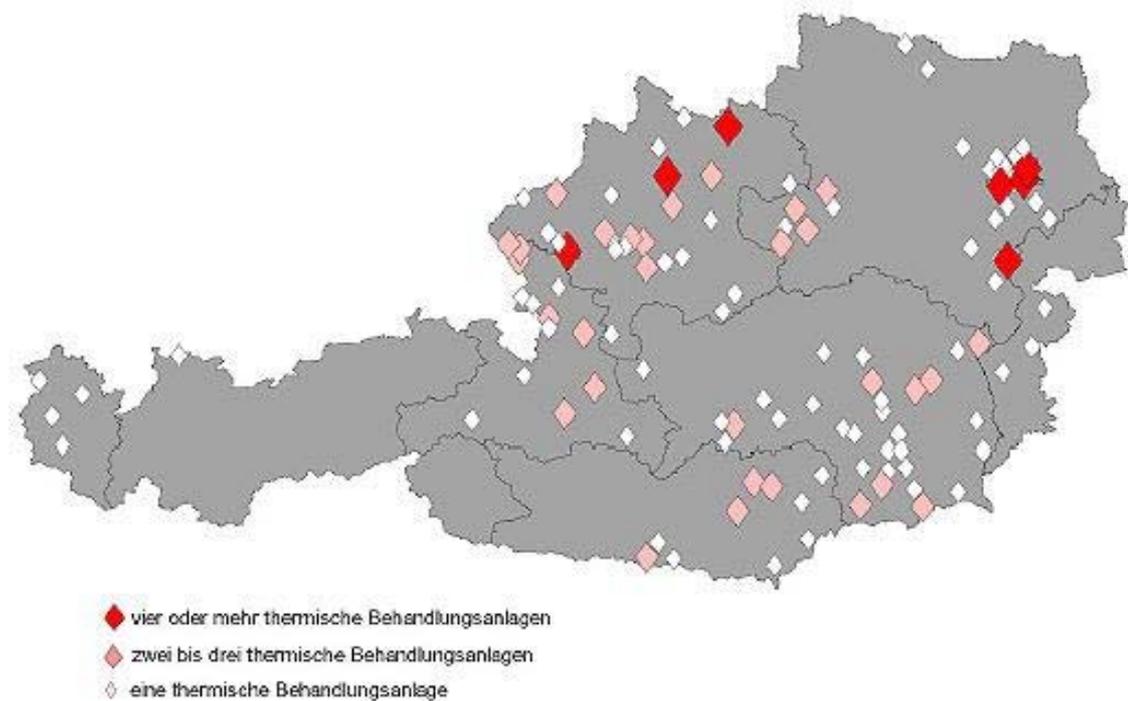


Abbildung 3-10: Thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle)

### **3.6.2 Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle**

Anlagen zur Verbrennung von Siedlungsabfällen sind mit einer Gesamtkapazität von rund 1,7 Mio. Tonnen pro Jahr in Betrieb.

In 6 Anlagen wird hauptsächlich Restmüll bzw. Sperrmüll eingesetzt. In 3 Wirbelschichtfeuerungsanlagen werden Klärschlamm und heizwertreiche Fraktionen thermisch behandelt.

In Bau befindet sich die MVA Pfaffenau in Wien mit einer genehmigten Kapazität von rund 250.000 Tonnen pro Jahr. Erweiterungen bestehender Anlagen sind angedacht.

Nach Inbetriebnahme aller geplanten Projekte kann von einer Kapazität von annähernd 2,0 Mio. Tonnen pro Jahr ausgegangen werden.

<b>Thermische Abfallbehandlung</b>	<b>Feuerung / Abfalleinsatz</b>	<b>Kapazität in t/a</b>
Müllverbrennungsanlage Spittelau, Wien	Rost (Restmüll)	270.000
Müllverbrennungsanlage Flötzersteig, Wien		200.000
Müllverbrennungsanlage WAV I, Wels		75.000
Müllverbrennungsanlage WAV II, Wels		230.000
Müllverbrennungsanlage Dürnrohr, Zwentendorf		300.000
Kärntner Restmüllverbrennung, Arnoldstein		80.000
Wirbelschichtofen 4 – Simmeringer Haide, Wien	Wirbelschicht (Heizwertreiche Fraktion, Klärschlamm)	110.000
Wirbelschichtfeuerung – Reststoffverwertung Lenzing		300.000
Thermische Reststoffverwertung, Niklasdorf (ENAGES)		100.000
Summe gerundet		1,7 Mio.

Tabelle 3-6: Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen in Betrieben (Datenstand April 2006)

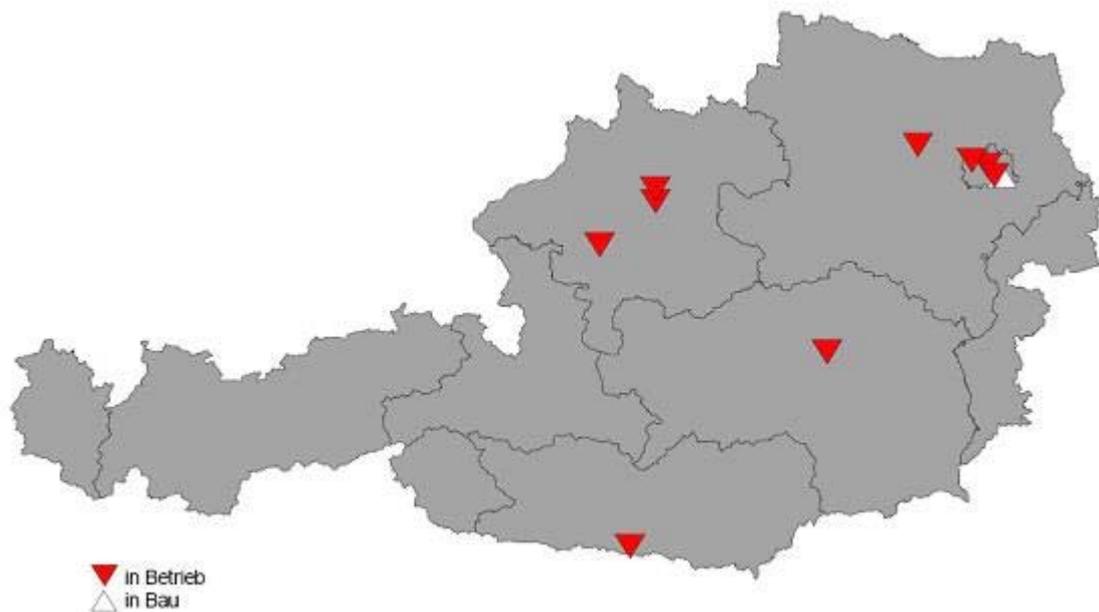


Abbildung 3-11: Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle in Betrieb bzw. im Bau

### **3.6.3 Mechanisch-biologische Behandlungsanlagen (MBA)**

Eine mechanisch-biologische Behandlung (meist zum Zweck der späteren Deponierung) ist eine verfahrenstechnische Kombination mechanischer und biologischer Prozesse zur Behandlung von Siedlungsabfällen und ähnlichen Gewerbeabfällen. Klärschlämme und weitere für eine mechanisch-biologische Behandlung (entsprechend dem Stand der Technik) geeignete Abfälle können gemeinsam mit diesen Abfällen mitbehandelt werden.

Ziel der mechanischen Prozesse ist insbesondere die Separierung von für eine biologische Behandlung wenig geeigneten Stoffen, von Störstoffen und Schadstoffen oder eine Optimierung des biologischen Abbaus der verbleibenden Abfälle durch Erhöhung der Verfügbarkeit und Homogenität.

Ziel der biologischen Prozesse ist der Abbau organischer Substanzen (Ab- und Umbau biologisch abbaubarer Bestandteile) durch die Anwendung von aeroben oder anaeroben mit nachfolgenden aeroben Verfahren. Die mechanisch-biologische Behandlung hat zu einer deutlichen Reduzierung der biologisch abbaubaren Anteile, des Volumens, des Wassergehaltes, des Gasbildungspotenzials und der Atmungsaktivität der Abfälle und zu einer deutlichen Verbesserung des Auslaugverhaltens und des Setzungsverhaltens der Abfälle zu führen.

Neben der mechanisch-biologischen Behandlung zum Zweck der Deponierung existiert in Österreich auch eine mechanisch-biologische Behandlung vor einer thermischen Behandlung. Dabei wird der Abfallinput im Zuge der mechanischen Aufbereitung teilweise zerkleinert und homogenisiert und die mitunter lediglich von Sperr- und Störstoffen, Eisen- und gegebenenfalls Nichteisen-Metallen befreiten Abfälle anschließend einer biologischen Behandlung (z. B. biologischen Trocknung oder Teilrotte) vorwiegend zur Reduktion des Feuchtegehaltes vor der thermischen Behandlung zugeführt. Im Gegensatz zur MBA vor der Deponierung erfolgt die gezielte Abtrennung von heizwertreichen Fraktionen lediglich optional und allfällige Anteile von zu deponierenden Reststoffen sind mengenmäßig gering.

Österreichweit stehen derzeit 16 Anlagen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung von Siedlungsabfällen und anderen Abfällen mit einer genehmigten Gesamtkapazität von rund 873.000 Tonnen pro Jahr (inkl. anderer Behandlungslinien, z. B. Kompostierung) in Betrieb. Die genehmigte MBA-Kapazität beträgt abzüglich

anderer Behandlungslinien rund 771.000 Tonnen pro Jahr, wobei sich auf Grund der gewählten Betriebsweise bzw. der vorliegenden Ausbaustufe eine geringere verfügbare Kapazität von rund 670.000 Tonnen pro Jahr ergibt.

Für das Jahr 2005 kann in den 16 Behandlungsanlagen von einem tatsächlichen MBA-Durchsatz von rund 612.500 Tonnen ausgegangen werden. Insgesamt wurden in den 16 MBA-Anlagen im Jahr 2005 rund 482.000 Tonnen Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (Restmüll), rund 51.000 Tonnen Gewerbeabfälle, rund 34.000 Tonnen Klärschlämme, rund 33.000 Tonnen Sperrmüll und rund 12.500 Tonnen sonstige Abfälle eingebracht. Die Auslastung in diesen Anlagen bezogen auf die genehmigte MBA-Kapazität von rund 771.000 Tonnen pro Jahr betrug im Jahr 2005 rund 79 %.

#### **3.6.4 Deponien**

Die Deponieverordnung unterscheidet folgende Deponietypen:

- Massenabfall
- Reststoff
- Baurestmassen
- Bodenaushub

Die 4 Klassifizierungen unterscheiden sich hinsichtlich der technischen Anforderungen an die jeweiligen Bauwerke und der Qualität der Abfälle, die abgelagert werden dürfen. Die Betreiber dieser Anlagen sind verpflichtet, Aufzeichnungen über abgelagerte Abfallmassen zu führen und diese Daten dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft jährlich zu melden.

Die Meldungen der Anlagenbetreiber ergaben für das Jahr 2004 eine deponierte Menge von rund 9,7 Mio. Tonnen auf 494 Deponien. Gegenüber den Meldungen aus dem Vorjahr ergibt sich eine Verringerung um rund 8 %. Die größte Massenverringerung ist bei den „Siedlungsabfällen und ähnlichen Gewerbeabfällen“ zu verzeichnen. Im Jahr 2003 wurden rund 1,8 Mio. Tonnen inkl. Altlastenmaterial abgelagert, 2004 waren es rund 283.000 Tonnen. Hier zeigt sich, dass die Deponieverordnung bereits sehr erfolgreich umgesetzt wurde.

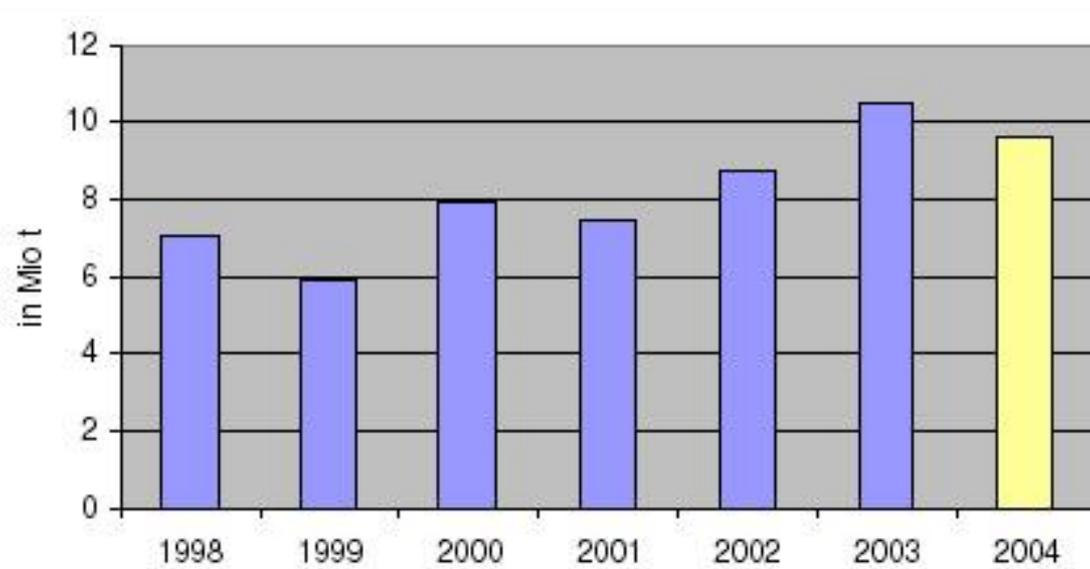


Abbildung 3-12: Abgelagerte Massen 1998 – 2004 (Datenstand April 2006)

<b>Größte gemeldete Ablagerungen nach Abfallarten</b>	<b>abgelagerte Masse 2004 in Tonnen</b>	<b>Anteil an der gesamt abgelagerten Masse in %</b>
Nicht gefährliche bzw. ausgestufte Aushubmaterialien	6.645.000	68,9
Mineralischer Bauschutt (keine Baustellenabfälle)	649.000	6,7
Unbehandelter Restmüll und Sperrmüll (Sperrmüll ~ 81.000 t)	364.000	3,8
Schlacken und Aschen aus Abfallverbrennungsanlagen	360.000	3,7
Rückstände aus der mechanischen und biologischen Behandlung (MBA) und vorbehandelter Restmüll	170.000	1,8
Betonabbruch	163.000	1,7
Gesamt (gerundet)	8,4 Mio.	87

Tabelle 3-7: Wesentliche deponierte Massen nach Abfallart im Jahr 2004 (Datenstand April 2006)

Deponietypen	in Betrieb befindliche Deponien	Deponien mit gemeldeten Ablagerungen im Jahr 2004	Gemeldete abgelagerte Masse 2004 in Mio. Tonnen	Deponien mit Meldungen über freies Deponievolumen in Mio. m <sup>3</sup>	Freies Deponievolumen 2004 in Mio. m <sup>3</sup>
Massenabfall	58	49	1,62	55	23,7
Reststoff	30	23	0,74	23	9,2
Baurestmassen	124	90	2,4	92	16,7
Bodenaushub	454	332	4,9	307	32,5
Gesamt	666	494	9,7	477	82,1

Tabelle 3-8: Deponiebetriebermeldungen 2004 nach Deponietypen gemäß Deponieverordnung (Datenstand April 2006)

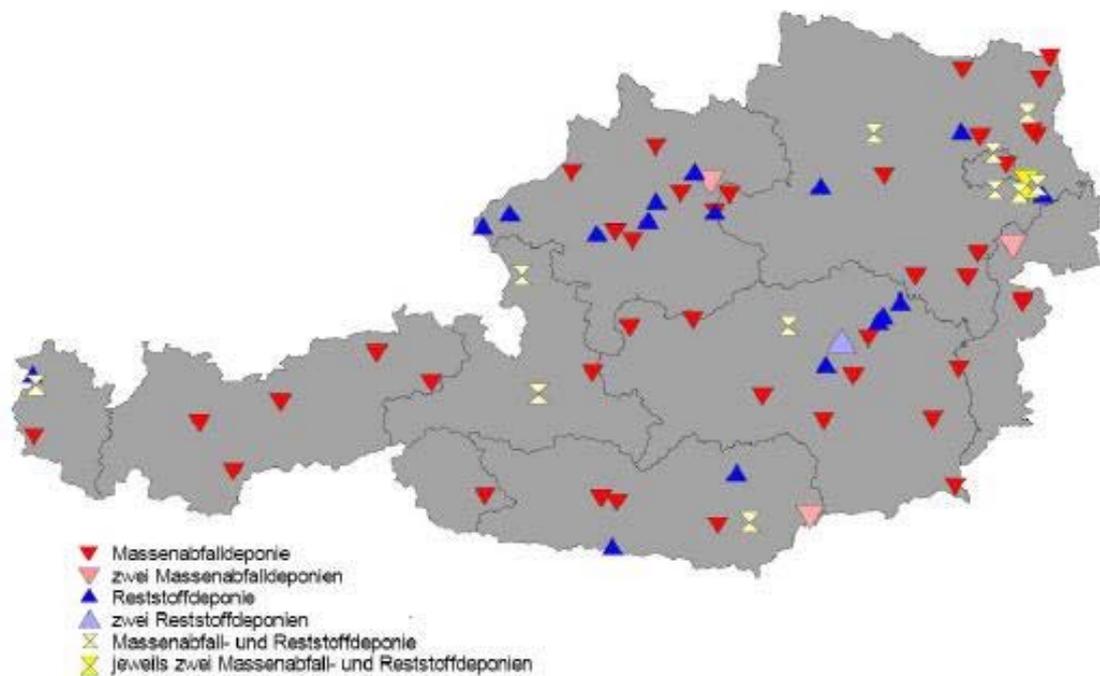


Abbildung 3-13: Massenabfall- und Reststoffdeponien 2006

## **4 PROBLEMSTELLUNG**

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung einer Messapparatur im Technikumsmaßstab zur Bestimmung des Brennwertes von (heterogenen) Materialien in einem Bereich von 4.000 kJ/kg bis 10.000 kJ/kg für Abfallstoffe und bis 18.000 kJ/kg für biogene Referenzmaterialien.

Die Motivation zur Entwicklung eines derartigen Messsystems ist begründet in der Österreichischen Deponieverordnung von 1996 (siehe Kapitel 3.2), wonach der Brennwert als Beurteilungskennwert für die Ablagerungsfähigkeit von Restmüll auf Deponien festgesetzt wurde. – Es wird die Einhaltung eines Brennwertes von unter 6.000 kJ/kg (bezogen auf die Trockensubstanz) gefordert. Diese Maßnahme soll die direkte Ablagerung von Restmüll auf Deponien verhindern und so einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der klimarelevanten Gase liefern.

Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung und des hohen Inertstoffanteils der Abfallmaterialien sind die Probenaufbereitung und im Besonderen die Probengröße problematisch. Eine Probeneinsatzmenge von ca. 5 – 10 kg (anstelle von 1-g-Proben im Bombenkalorimeter) erscheint sinnvoll und zielführend.

Es wird also ein „Müll-Kalorimeter“ im Technikumsmaßstab konzipiert – aufbauend auf die Erkenntnisse von G. Bachmann, der im Rahmen seiner Dissertation am Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Wien ein derartiges Messsystem zur Brennwertbestimmung von heterogenen Materialien entwarf.

Damals handelte es sich um eine Verbrennungsanlage im Technikumsmaßstab mit einem Verbrennungsteil mit interner Nachverbrennung samt Rauchgasabkühlung und Kondensation. Über eine Energiebilanz über die gesamte Anlage wurde der Brennwert der eingesetzten Probe, über eine zusätzliche Wasserbilanz der Heizwert ermittelt.

Es wurde ein Gasbrenner als Stützbrenner verwendet, wodurch vor jedem Versuch eine Kalibrationsmessung durchgeführt werden musste, bei der die Anlage durch Zugabe von Erdgas im selben thermodynamischen Zustand gehalten wurde wie bei der nachfolgenden Probenmessung. Ein bestimmter Temperatur-Sollwertverlauf musste bei jeder Messung (Kalibrationsmessung, Probenmessung) über die gesamte Abbranddauer möglichst genau eingehalten werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist in erster Linie, den messtechnischen und damit auch den zeitlichen Aufwand für eine Messung zu verringern, indem einerseits auf die Verwendung eines Gasstützbrenners verzichtet und andererseits die Anzahl der gemessenen Parameter reduziert werden soll. – Die Auswertung soll ausschließlich auf Grundlage der gemessenen Kühlwasser- und Rauchgastemperaturen im System erfolgen. Es soll überprüft werden, welcher Anteil der während der Verbrennung von Buchenholz frei werdende Wärmemenge auf das Kühlwasser übergeht und inwieweit eine Auswertung nur aufgrund der Kühlwassertemperaturen möglich bzw. zielführend ist.

Zur Realisierung der Brennwertbestimmung von heterogenen Materialien in diesem Kalorimeter soll zuerst im Zuge der Verbrennung von einem Brennstoff mit bekanntem Brennwert (z. B. Buchenholz) eine Energiebilanz aufgestellt werden, um Verluste lokalisieren und quantifizieren zu können.

Zu diesem Zwecke wird der Feststoffkessel EKH 30 der Firma EDER GmbH (mit einem Füllraumvolumen von 75 Liter) in Verbindung mit einem nachgeschalteten Rauchgaskondensator, durch den die kondensierbaren Anteile der entstandenen Rauchgase mittels Abkühlung auf annähernd Raumtemperatur auskondensiert und gesammelt werden, verwendet.

Die Temperaturen des Kühlwassers und des Rauchgases werden an verschiedenen Stellen der Apparatur gemessen, elektronisch registriert und aufgezeichnet werden.

Den Hauptbilanzierungsanteil bildet die durch das Kühlwasser abgeführte Wärmemenge. Die weiteren Bilanzierungsanteile, die bezüglich dieser Versuchsanordnung die Verluste darstellen, sollen hier quantifiziert werden (Abgasverluste durch unvollständige Verbrennung, Strahlungsverluste etc...). Um die (Un-)Vollständigkeit der Verbrennung nachvollziehen zu können, werden mittels einer Rauchgasanalyse die im Rauchgas aufgetretenen Anteile an  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $(\text{C}_x\text{H}_y)$  und  $\text{O}_2$  gemessen und in der Energiebilanz berücksichtigt.

So kann überprüft werden, inwieweit die bei der Verbrennung von Buchenholz frei werdende Wärmemenge auf das Kühlwasser übergeht.

Eine weitere Fragestellung, die nachfolgend noch erörtert werden soll, ist die Festsetzung des Endpunktes der Messung für die Auswertung. Sie muss reproduzierbar und damit auf andere Messungen anwendbar sein, was sich – in der gegebenen Messanordnung – als problematisch herausstellen wird.

## **5 THEORETISCHE GRUNDLAGEN**

### **5.1 Grundlagen der Verbrennung**

Eine Verbrennung ist eine chemische Reaktion (Oxidation = Reaktion mit  $O_2$ ) der brennbaren Bestandteile von Brennstoffen mit dem Sauerstoff der Luft unter Bildung von Wärme.

Im Folgenden wird immer (nur) auf feste Brennstoffe Bezug genommen.

#### **5.1.1 Elementarzusammensetzung**

Die brennbaren Bestandteile sind hauptsächlich Kohlenstoff C und Wasserstoff H, die zu Kohlendioxid  $CO_2$  und Wasserdampf  $H_2O$  verbrennen, Schwefel S verbrennt zu  $SO_2$ .

Als Ballaststoffe sind Sauerstoff O, Stickstoff N, Wasser  $H_2O$  und Asche enthalten. In der Asche sind die festen inerten Rückstände erfasst, die nicht mit Sauerstoff reagieren wie z. B. in Karbonaten gebundener Kohlenstoff, Sulfidschwefel und verschiedene Oxide wie z. B.  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ , MgO.

Die Mengen der vorhandenen Elemente werden durch eine Elementaranalyse ermittelt und als Massenanteile angegeben.

Die Summe der Massenanteile [kg/kg] ist:  $c + h + s + o + n + a + w = 1$

Die einzelnen Elemente liegen im Brennstoff in meist nicht näher bekannten Bindungen vor.

c	Gehalt an Kohlenstoff	[kg/kg]
h	Gehalt an Wasserstoff	[kg/kg]
n	Gehalt an Stickstoff	[kg/kg]
o	Gehalt an Sauerstoff	[kg/kg]
s	Gehalt an Schwefel	[kg/kg]
w	Gehalt an Wasser	[kg/kg]

## 5.1.2 Kennwerte der Verbrennung

Hier werden die Parameter der Verbrennungsrechnung beschrieben.

### 5.1.2.1 Heizwert und Brennwert

Der Brennwert ist diejenige Wärmemenge, die bei vollständiger Verbrennung eines Brennstoffes frei wird.

Bei Brennstoffen, die Wasserstoff und damit in den Verbrennungsprodukten auch Wasserdampf enthalten, muss man zwischen dem Heizwert  $H_u$  (früher „unterer Heizwert“) und dem Brennwert  $H_o$  (früher „oberer Heizwert“) unterscheiden – je nachdem, ob man die Verdampfungswärme des Wassers in den Verbrennungsgasen berücksichtigt oder nicht. Liegt das Wasser in den Abgasen in dampfförmigem Zustand vor, so rechnet man mit dem Heizwert, ist der Wasserdampf aus den Verbrennungsgasen herauskondensiert und liegt flüssig als Wasser vor, so ist der Brennwert heranzuziehen. Der Brennwert ist also um den Betrag der Verdampfungswärme des in den Abgasen enthaltenen Wassers größer als der Heizwert.

$$H_o = H_u + r \cdot (9 \cdot h + w) / 100 \quad [\text{kJ/kg}]$$

Bei festen und flüssigen Brennstoffen lässt sich der Heizwert wegen der vielen möglichen Bindungsarten der Elemente nur kalorimetrisch (siehe Kapitel 5.2.1.) ermitteln. Bei bekannter Elementaranalyse kann der Heizwert näherungsweise empirisch ermittelt werden nach Boie:

$$H_u \sim (34,8 \cdot c + 93,9 \cdot h + 10,5 \cdot s + 6,3 \cdot n - 10,8 \cdot o - 2,5 \cdot w) \cdot 10^3 \quad [\text{kJ/kg}]$$

$H_o$	Brennwert (früher „oberer Heizwert“)	[kJ/kg]	
$H_u$	Heizwert (früher „unterer Heizwert“)	[kJ/kg]	
$r$	Verdampfungsenthalpie des Wassers	[kJ/kg]	(= 2.500 kJ/kg)

### 5.1.2.2 Sauerstoffbedarf

Für feste Brennstoffe gelten nachfolgende Verbrennungsgleichungen:

Brennstoff	+	Sauerstoffbedarf	→	Verbrennungsgas	
<b>C</b>	+	<b>O<sub>2</sub></b>	→	<b>CO<sub>2</sub></b>	
12		32		12+32 = 44	kg
1		32/12 = 2,667		44/12 = 3,667	kg
		22,4/12 = 1,867		22,4/12 = 1,867	Nm <sup>3</sup>
<b>H<sub>2</sub></b>	+	<b>1/2 O<sub>2</sub></b>	→	<b>H<sub>2</sub>O</b>	
2		16		18	kg
1		8		9	kg
		5,6		11,2	Nm <sup>3</sup>
<b>S</b>	+	<b>O<sub>2</sub></b>	→	<b>SO<sub>2</sub></b>	
32		32		64	kg
1		1		2	kg
		0,7		0,7	Nm <sup>3</sup>
<b>N</b>	+	<b>O<sub>2</sub></b>	→	<b>NO<sub>2</sub></b>	
14		32		46	kg
1		2,286		3,286	kg
		1,6		1,6	Nm <sup>3</sup>
<b>C</b>	+	<b>1/2 O<sub>2</sub></b>	→	<b>CO</b>	
12		16		28	kg
1		1,334		2,334	kg
		0,934		1,867	Nm <sup>3</sup>
<b>CO</b>	+	<b>1/2 O<sub>2</sub></b>	→	<b>CO<sub>2</sub></b>	
28		16		44	kg
1		0,574		1,571	kg
		0,4		0,8	Nm <sup>3</sup>

Tabelle 5-1: Verbrennungsgleichungen

Daraus kann man – unter Vernachlässigung der NO<sub>x</sub>-Bildung – den für eine vollständige Verbrennung notwendigen minimalen Sauerstoffbedarf errechnen:

$$O_2 = 2,667 \cdot c + 8 \cdot h + s - o \quad [\text{kg/kg}] \quad \text{bzw.}$$

$$O_2 = 1,867 \cdot c + 5,6 \cdot h + 0,7 \cdot s - 0,7 \cdot o \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

### 5.1.2.3 Luftbedarf und Luftüberschusszahl

Die zur Verbrennung von Brennstoffen theoretisch erforderliche Luftmenge ist der minimale Luftbedarf  $L_{\min}$ , der sich aus der Zusammensetzung der Verbrennungsluft (21 Vol%  $O_2$ , 79 Vol%  $N_2$ ) errechnet:

$$L_{\min} = O_{2\min} / 0,21 \quad [Nm^3/kg]$$

Um eine vollständige Verbrennung zu erreichen, ist mehr Luft erforderlich als der theoretische minimale Luftbedarf ( $L_{\min}$ ), da sonst nicht jedem brennbaren Molekül der notwendige Sauerstoff zur Verfügung steht. Das Verhältnis der (tatsächlich zugeführten) Luftmenge  $L$  zum minimalen Luftbedarf  $L_{\min}$  nennt man Luftverhältniszahl, Luftzahl oder Luftüberschuss(zahl)  $\lambda$ :

$$\lambda = L / L_{\min} \quad [-] \qquad L = L_{\min} \rightarrow \lambda = 1$$

Da die (tatsächliche) Luftmenge ( $L$ ) und damit der tatsächliche Luftüberschuss ( $\lambda$ ) nicht gemessen wurden (wie in den Kapiteln 6.3.1.6.1 „Wärme in der Verbrennungsluft und im Rauchgas“ und 7.2 „Ausblick“ beschrieben), kann der Luftüberschuss  $\lambda$  unter Zuhilfenahme der im Folgenden beschriebenen Parameter  $V_{tr,\min}$  (= minimale trockene Rauchgasmenge  $\rightarrow$  5.1.2.4) und  $CO_{2\max}$  (= maximaler Kohlenstoffdioxidgehalt  $\rightarrow$  5.1.2.7) und unter Einbeziehung des (während des Versuchs) gemessenen  $CO_2$  folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$\lambda = ( 1 + CO_{2\max} / CO_2 - 1 ) \cdot V_{tr,\min} / L_{\min}$$

### 5.1.2.4 Trockene Rauchgasmenge

Aus der Tabelle 5-1 können die minimale trockene Rauchgasmenge  $V_{tr,\min}$  und die (tatsächliche) trockene Rauchgasmenge  $V_{tr}$  bestimmt werden:

$$V_{tr,\min} = 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + 0,79 \cdot L_{\min} \quad [Nm^3/kg]$$

$$V_{tr} = 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + ( \lambda - 0,21 ) \cdot L_{\min} \quad [Nm^3/kg]$$

### 5.1.2.5 Wasserdampfmenge

Die Wasserdampfmenge  $W$  im Rauchgas setzt sich zusammen aus dem Wasserdampf der Verbrennung (aus dem Wasserstoff des Brennstoffes) (Tabelle 5-1) und dem Wasser aus der Brennstofffeuchte ( $1/\rho_{WD} = 1,24 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ):

$$W = 11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

Aus der Luftfeuchtigkeit  $x$  entsteht eine zusätzliche Wasserdampfmenge  $W'$  im Rauchgas ( $\rho_L/\rho_{WD} = 1,6$ ):

$$W' = \lambda \cdot L_{\min} \cdot 1,6 \cdot x \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

$W'$  kann hier nicht miteinbezogen werden, da weder ein Gasvolumenstrom noch die Kondensatmasse kontinuierlich gemessen wurde (siehe auch 6.3.1.6.1 „Wärme in der Verbrennungsluft und im Rauchgas“ und 7.2 „Ausblick“).

### 5.1.2.6 Feuchte Rauchgasmenge

Die minimale feuchte Rauchgasmenge  $V_{f,\min}$  ist die Summe aus der minimalen trockenen Rauchgasmenge ( $V_{tr,\min}$ ) und der Wasserdampfmenge im Rauchgas ( $W$ ) (siehe 5.1.2.5), die (tatsächliche) trockene Rauchgasmenge  $V_{tr}$  setzt sich analog zusammen aus der trockenen Rauchgasmenge ( $V_{tr}$ ) und der darin enthaltenen Wasserdampfmenge ( $W$ ):

$$\begin{aligned} V_{f,\min} &= V_{tr,\min} + W \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \\ &= 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + 0,79 \cdot L_{\min} + 11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \\ V_f &= V_{tr} + W \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \\ &= 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + (\lambda - 0,21) \cdot L_{\min} + 11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \end{aligned}$$

### 5.1.2.7 Maximaler Kohlenstoffdioxidgehalt

Für jeden Brennstoff gibt es einen Höchstwert an Kohlendioxidgehalt, der bei vollkommener Verbrennung mit dem Luftverhältnis  $\lambda = 1$  ( $\rightarrow$  minimaler Luftbedarf  $L_{\min}$  bzw. minimale trockene Rauchgasmenge  $V_{tr,\min}$ ) erreicht wird:

$$\text{CO}_{2\max} = 1,867 \cdot c / V_{tr,\min} \cdot 100 \quad [\text{Vol}\%]$$

## **5.2 Analysen**

### **5.2.1 Kalorimetrie**

Kalorimeter sind Geräte zur Bestimmung des Brennwertes von Brennstoffen (siehe auch 5.1.2.1).

Der Brennwert des verwendeten Buchenholzes wurde in einem Bombenkalorimeter bestimmt und mit Werten aus Stoffdatenbanken (Biobib und Phyllis – siehe Kapitel 8) verglichen.

Beim verwendeten Kalorimeter handelt es sich um das Bombenkalorimeter „IKA C 2000 basic“. Hier wird eine gewogene Brennstoffprobe (Buchenholz in gemahlener Form) zu einer Tablette verpresst und in einer kalorimetrischen Bombe unter festgelegten Bedingungen verbrannt. Durch die bei der Verbrennung entstehende Wärme erhöht sich die Temperatur des Kalorimetersystems gegenüber seiner Anfangstemperatur. Diese Temperaturerhöhung wird gemessen. Aus dem Gewicht der Brennstoffprobe, der Temperaturerhöhung und der Wärmekapazität des Kalorimetersystems wird der Brennwert des Brennstoffs ermittelt. Beim Errechnen des Brennwertes müssen die beim Verbrennen der Zündhilfsmittel und der verwendeten Brennhilfsmittel (mit bekanntem Brennwert) entstandenen Wärmemengen berücksichtigt werden.

Da mit einem Bohrer gemahlene Buchenholz zur kalorimetrischen Bestimmung des Brennwertes verwendet wurde, handelt es sich dabei um eine (im Zuge des Mahlens) bereits vorgetrocknete Brennstoffprobe. Es musste also der Wassergehalt der gemahlene sowie der ursprünglichen Brennstoffprobe (in Späne geschnitten) bestimmt werden (Kapitel 5.2.2) und in den Brennwert miteinbezogen werden.

## **5.2.2 Bestimmung des Wassergehaltes von Brennstoffproben**

### **5.2.2.1 Trockenschrank**

2 abgewogene Brennstoffproben (sowohl in Pulverform als auch in Spänen) wurden im Trockenschrank bei 80 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Aus der jeweiligen Gewichts­differenz wurde der Wassergehalt der beiden Proben berechnet.

### **5.2.2.2 Xylol-Destillation**

In einem Rundhalskolben wird die Brennstoffprobe (in Spänen) vorgelegt, mit Xylol überschichtet und unter Verwendung eines Rückflusskühlers destilliert. Das Wasser wird dabei ausgetrieben, in der Destillationsvorlage kondensiert und volumetrisch bestimmt.

## 6 PRAKTISCHER TEIL

### 6.1 Beschreibung der Anlage

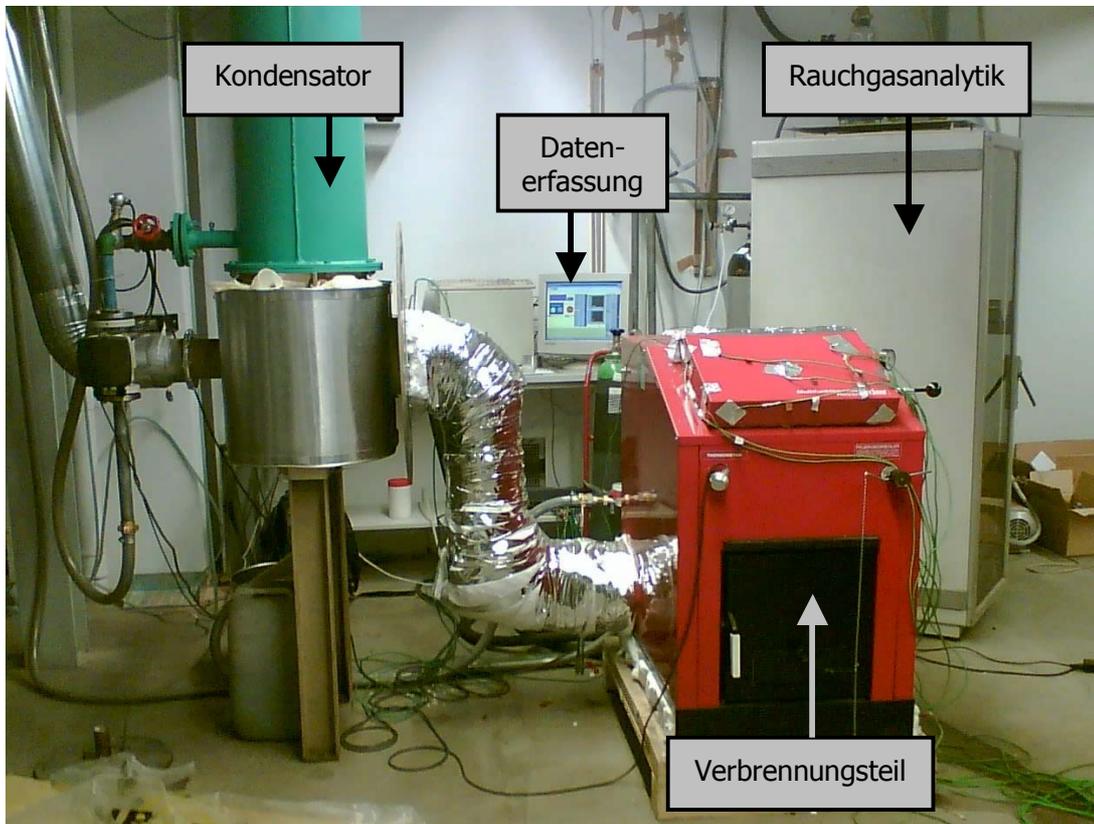


Abbildung 6-1: Gesamtanlage

Die Anlage besteht im Wesentlichen aus 2 Hauptteilen:

- dem Feststoffkessel, der den Verbrennungsteil inkl. Wärmetauscher darstellt und
- dem Rauchgas-Kondensator.

Damit das Rauchgas vom Kessel in den Kondensator gelangen kann, wurden die beiden Hauptteile der Anlage über ein verzinktes Stahlrohr mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Länge von ca. 1 m, das mit einer Dämmung aus Steinwolle (max. 160 °C) mit einer Dicke von 10 cm versehen wurde, verbunden.

Nach dem Kondensator wurde das Rauchgas in einen Abzug geleitet.

Das Kühlwasser wurde zuerst durch den Kondensator, von dort weiter durch den Feststoffkessel und anschließend zurück zur Rückkühlanlage gepumpt, wo das Wasser wieder auf ca. 14 - 15 °C abgekühlt und erneut zum Kondensator geleitet wurde.

Messtechnisch werden noch benötigt:

- die Rauchgasanalytik zur Messung von den im Rauchgas aufgetretenen Anteilen an  $\text{CO}_2$ , CO und  $\text{O}_2$  und
- die Messdatenerfassung.

Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) im Rauchgas konnten nicht gemessen und damit nicht in die Berechnungen miteinbezogen werden, weil das  $\text{C}_x\text{H}_y$ -Messgerät ab Ende Juni 2005 nicht mehr verfügbar war. – Da die FID-Flamme (während der Messungen) immer wieder erlosch, musste das Gerät repariert bzw. gereinigt werden. Daher mussten alle darauffolgenden Versuche (Kapitel 6.3.4 „Versuche“ bzw. 6.3.4.1 „Versuche zur „Endauswertung““) ohne eine entsprechende  $\text{C}_x\text{H}_y$ -Messung durchgeführt werden.

Bei der Auslegung der Anlage wurde von einer Brennstoffmenge von 5 – 10 kg Buchenholz mit einem Brennwert von 18.000 kJ/kg ausgegangen, um eine Energiebilanz aufstellen zu können.

Später sollen in diesem Kalorimeter  $\sim 10$  kg Müll mit einem Heizwert von ca. 4.000 – 10.000 kJ/kg (vgl. dazu Deponieverordnung – Kapitel 3.2) verbrannt werden, um so dessen Brennwert bestimmen zu können.

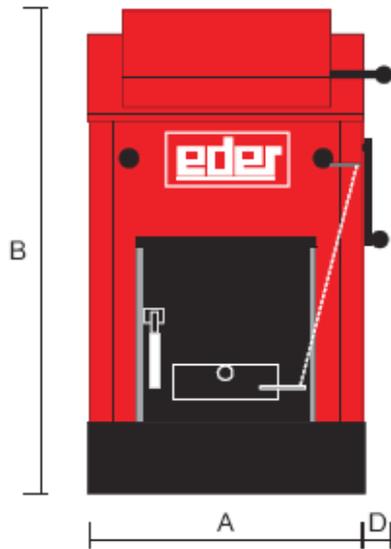
### 6.1.1 Verbrennungsteil

hier wurde ein Feststoffkessel der Firma EDER (Kesselbau – Heiztechnik – Expansionstechnik) zum Heizen mit Naturzug gewählt:  
eser EKH 30 mit einer Nennwärmeleistung von 30 kW – ein Allroundkessel für das Heizen mit Holz, Koks und Kohle (mit Brennstoffwahlklappe).

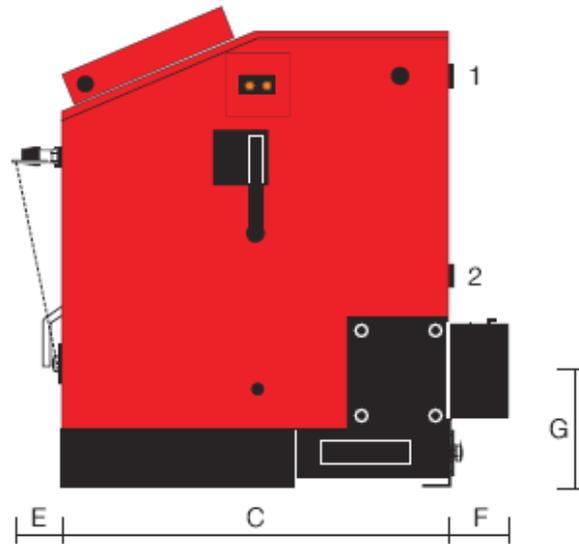


Abbildung 6-2 und die folgenden Abbildungen 6-3, 6-4 und 6-5:  
Feststoffkessel EKH 30 der Firma EDER

Vorderansicht: (Abbildung 6.3)



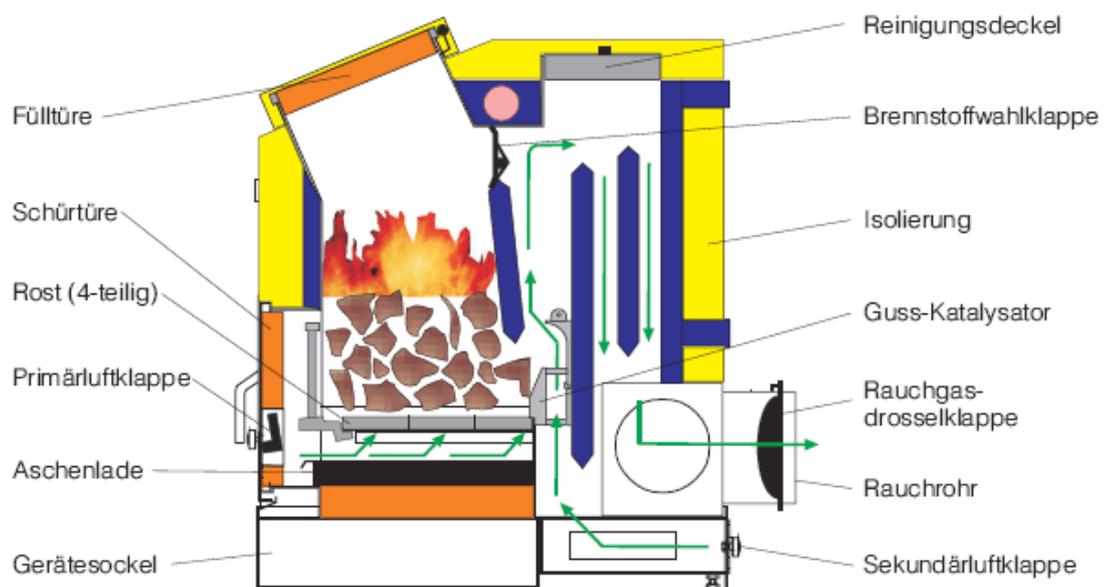
Seitenansicht (Abbildung 6.4):



Type	Leistung [kW]	RR-durch. [mm]	Gewicht [kg]	Füllraum [l]	Füllöffnung cm	Wasserinhalt [l]
EKH 30	22 - 30	180	450	75	40 x 30	50

A	B	C	D	E	F	G	1, 2
[mm]	VL, RL ["]						
625	1100	880	70	150	250	275	5/4"

Seitenansicht / Schnitt (Abbildung 6.5):



Die 30 x 40 cm große schräge Fülltüre dient der Beschickung mit Holz oder Koks und Kohle, in diesem Fall also mit Holz bzw. später mit Müll.

Da sich der obere Rand der Falltüre bezüglich der Wärmedämmung als größte Schwachstelle herausstellte, wurde hier mit Steinwolle (max. 160 °C) mit einer Dicke von 10 cm zusätzlich isoliert.

Weil der 4-teilige Rost bei der späteren Verwendung als Müllkalorimeter nicht ausreichen würde, kleinere Stücke zurückzuhalten, war es notwendig, einen Korb aus Lochblech in den Füllraum einzupassen, damit später auch klein-stückiger Müll verbrannt werden kann. Um hier, bei der Verbrennung von Buchenholz, schon unter möglichst ähnlichen Bedingungen wie bei der späteren Müllverbrennung zu arbeiten, wurde dieser Korb auch bei allen Holz-Verbrennungsversuchen verwendet.

Die Brennstoffwahlklappe würde es ermöglichen, den Abbrand von unten nach oben umzustellen. Dadurch könnte die für den jeweiligen Brennstoff erforderliche Flammen- und Rauchgasrichtung bestimmt werden. Dies wäre bei verschiedenen Brennstoffen (Holz – lange Flamme – unterer Abbrand bzw. Koks oder Kohle – kurze Flamme – oberer Abbrand) von Vorteil. Da diese Brennstoffwahlklappe hier keine Verwendung fand, weil die Bedingungen konstant bleiben mussten, blieb die Brennstoffwahlklappe immer auf „Holz – lange Flamme – unterer Abbrand“ eingestellt.

Mittels stufenlos einstellbaren Feuerungsregler kann die Primärluft und damit die jeweils gewünschte Leistung geregelt werden. Der Feuerungsregler misst ständig die Kesselwassertemperatur und verstellt entsprechend die Verbrennungsluftzufuhr mittels der Primärluftklappe, die in der Schürtüre eingebaut ist. Steigt also die Kesseltemperatur an, so wird die Klappe stufenlos geschossen, sinkt die Kesseltemperatur, dann öffnet die Klappe. Als Verbindung zwischen Feuerungsregler und Primärluftklappe dient eine Kette. – Diese Kette wurde hier allerdings entfernt und der Feuerungsregler somit deaktiviert, da es nicht wünschenswert wäre, wenn die Primärluftzufuhr stark schwanken würde – sie sollte sogar möglichst konstant sein, da (auch an anderer Stelle) keine Volumenstrommessungen durchgeführt werden sollten. Dies ist zulässig, da es Ziel dieser Anordnung war, möglichst die gesamte erzeugte Wärme auf das Kühlwasser zu übertragen und das Abgas praktisch mit Umgebungstemperatur abzuführen.

Gegen zu hohen Kaminzug könnte die Rauchgasdrosselklappe den Umständen entsprechend reguliert werden, was aber hier nicht notwendig war.

Die Vorteile, die der EKH 30 im Einsatz als Heizkessel zur Wohnraumbeheizung und Warmwasserbereitung bietet (Regelung der Primärluft durch einen stufenlos regelbaren Feuerungsregler, Brennstoffwahlklappe zur Umstellung von unterem auf oberen Abbrand) kommen hier also nicht zum Einsatz.

### 6.1.2 Kondensator

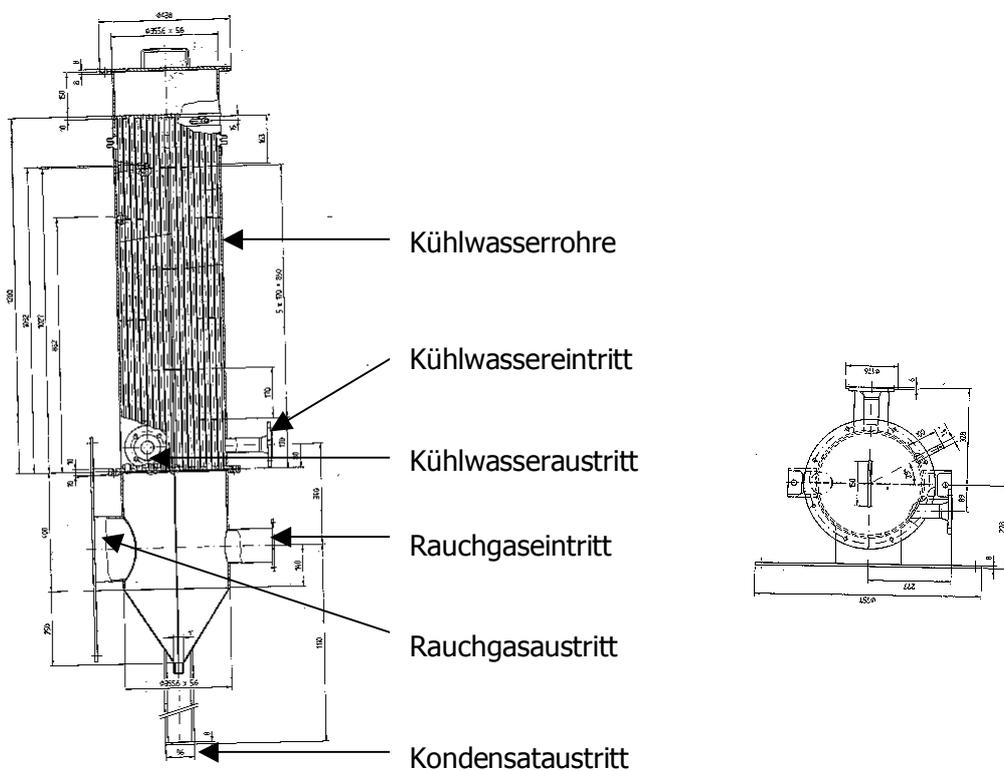


Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7: Rauchgaskondensator

Im Kondensator befinden sich gerade Rohre, die in 2 Rohrplatten eingeschweißt sind. Um Wärmespannungen zu vermeiden, ist das Gehäuse mit einem Dehnungskompensator ausgestattet. Die Innenauskleidung besteht aus einer thermischem Säkaphen-Beschichtung (dauerbeständig bis 180 °C), die sich durch die hohe Temperaturbeständigkeit und sehr gute Beständigkeit gegen aggressive Medien auszeichnet und Inkrustationen und Fouling verhindert. (Es handelt sich hier um eine

duroplastische Kunststoffkombination, die mehrschichtig appliziert wird und die im Polymerisationsofen eine homogene, hartelastische, porenfreie und chemisch hochbeständige Schutzschicht bildet.) Der Kondensatsyphon ist aus PVDF (Polyvinylidenfluorid), das Grundgestell aus Stahl und die Gasleitungen sind wärmeisoliert.

Die Leistung des Kondensators beträgt 20 kW.

Der Kondensatoreintritt wurde über ein verzinktes Stahlrohr mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Länge von ca. 1 m, das mit einer Dämmung aus Steinwolle mit einer Dicke von 10 cm versehen wurde, mit dem Rauchgasaustritt des Feststoffkessels verbunden (siehe Abbildung 6-1: Gesamtanlage).

Das Rauchgas kommt also vom Feststoffkesselaustritt in den Kondensator. Durch Kühlung mittels Kühlrohren sollte das Rauchgas hier auf ungefähr Umgebungstemperatur abgekühlt werden, tatsächlich war das Rauchgas aber aufgrund der niedrigen Temperatur des Wassers von der Rückkühlanlage (14 - 15 °C) kälter als die Umgebungsluft, was in der Berechnung berücksichtigt wurde (siehe Kapitel 6.3.1.6.1).

Das dabei entstehende Kondensat wird am unteren Ende des Kondensators gesammelt und ebenfalls in die Berechnung miteinbezogen (siehe Kapitel 6.3.1.4).

Der Kondensatsammelbehälter hat ein Volumen von ca. 20 Liter. Um zu verhindern, dass Fremdluft durch den im System befindlichen Unterdruck angesaugt wird, muss der Ausgang dicht verschlossen sein.



Abbildung 6-8: Kondensatsammelbehälter

Nach dem Kondensator wurde das Rauchgas – wiederum über ein verzinktes Stahlrohr (Durchmesser 15 cm) – in einen Abzug geleitet.

### 6.1.3 Messeinrichtungen

#### 6.1.3.1 Rauchgasanalytik

In diesem Kapitel wird die eingesetzte Gasanalysetechnik beschrieben.



Abbildung 6-9: CO<sub>2</sub>-/CO- und O<sub>2</sub>-Messgerät

oben: CO<sub>2</sub>[%]- und CO[ppm]-Messung

unten: O<sub>2</sub>[%]-Messung

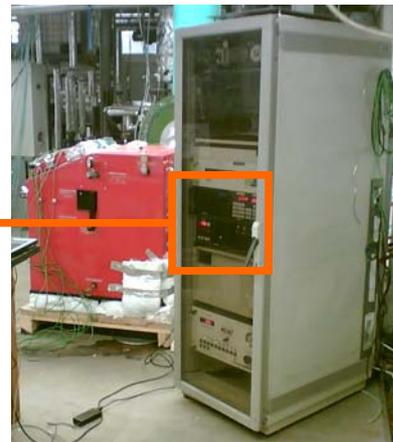


Abbildung 6-10: „Messturm“

„Messturm“, in dem diverse Analysegeräte untergebracht sind

Zur Kalibration der Messgeräte jeweils vor und nach jeder Messung wurden – je nach Verfügbarkeit – folgende Prüfgase verwendet:

- CO<sub>2</sub>: 9,85 %; 10,1 %; 14,43 %; 15,1 %
- CO: 487 ppm; 490 ppm; 516 ppm; 1464 ppm; 1520 ppm
- [CxHy: 80 ppm]
- N<sub>2</sub>: Nullpunkt bezüglich aller anderen gemessenen Parameter
- Luft: 20,8 % O<sub>2</sub>

Sämtliche Messungen der Rauchgaszusammensetzung und der Temperatur erfolgten online und somit kontinuierlich mit einer Abtastrate von 10 Sekunden.

Um Russpartikel zurückzuhalten, wurde das Rauchgas durch ein Filter, das mit Glaswolle gefüllt ist, in die Messgeräte gepumpt.

Zur Kontrolle, ob der Durchfluss gegeben und keine Verstopfung vorhanden war, diente ein Rotameter.

Wie schon zu Anfang des Kapitels 6.1 beschrieben, konnten die unverbrannten Kohlenwasserstoffe ( $C_xH_y$ ) wegen eines Defekts des Messgerätes nicht bei allen Versuchen gemessen und daher nicht in die Auswertungen miteinbezogen werden.

Die Beschreibungen der Funktionsweisen des  $O_2$ - und des  $CO_2/CO$ -Messgerätes finden sich im Anhang C.

### **6.1.3.2 Kühlwassermengenmessung**

Als Durchflussmesser wurde am Kühlwassereingang des Feststoffkessels eine so genannte „Wasseruhr“, ein Kaltwasserzähler (Mehrstrahl-Flügelrad) mit Rollenzählwerk, in die waagrechte Kühlwasserleitung eingebaut.

### 6.1.3.3 Temperaturmessung

Für die Rauchgasmessungen und die Messung der Raumtemperatur wurden NiCr-Ni-Thermoelemente des Typs K (Arbeitsbereich -200 – 1260 °C) in Form von biegbaren Mantel-Thermoelemente mit einem Durchmesser von 2,5 mm verwendet, für die Messung der Abstrahlungswärme am Feststoffkessel Oberflächen-Thermoelemente (ebenfalls Typ K) und zur Messung der Kühlwassertemperaturen (im Feststoffkessel und im Kondensator) Pt-100-Widerstandsthermometer mit Messumformer und Anschlusskopf.

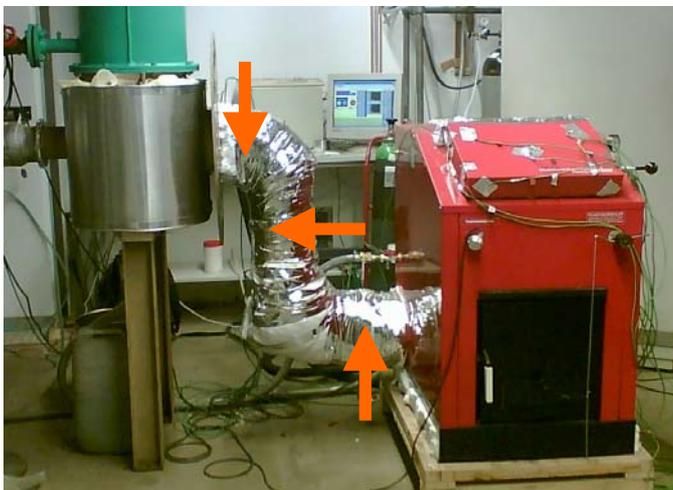


Abbildung 6-11: Messstellen für die Rauchgastemperaturen

Die Rauchgastemperaturen wurden ursprünglich an 3 Stellen am Verbindungsrohr zwischen Kessel und Kondensator gemessen: direkt nach dem Kessel, ca. in der Mitte des Rohrs – auf halbem Weg zwischen Kessel und Kondensator und direkt vor dem Kondensator, wobei letzterer Wert nicht miteinbezogen wurde, da er – wahrscheinlich durch ungünstige Strömungsdynamik so nahe am Kondensator – durch die Bank deutlich niedrigere Werte lieferte ( $\sim 10$  °C weniger) als die beiden anderen Thermoelemente (die im Gegensatz dazu nahezu gleiche Temperaturen anzeigten), obwohl durch die dicke Steinwolle-Dämmung auf der gesamten Rohrlänge kaum Abstrahlungswärme messbar war. Weiters wurde mit einem 4. Thermoelement die Temperatur des Rauchgases nach dem Kondensator online erfasst.

Die Messung der Abstrahlungswärme wurde bei 3 Versuchen durchgeführt – nur 3, da der apparative Aufwand ungleich größer ist: Man benötigt Oberflächen-Thermoelemente und einen weiteren PC zur Messdatenerfassung. Zum Zweck der Quantifizierung der Abstrahlungswärme wurden nun 13 Oberflächen-Thermoelemente auf der Fülltüre des Kessels befestigt, da sich diese zuvor schon als größte Schwachstelle bezüglich der Wärmedämmung herausstellte (obwohl mit Steinwolle zusätzlich isoliert worden war).

3 Oberflächen-Thermoelemente wurden an der Fülltüre befestigt und bei jedem Versuch kontinuierlich mitgemessen (am Deckel links-mittig, am Deckrand rechts-oben und am Deckelrand oben).



Abbildung 6-12: Messstellen für die Oberflächen-Thermoelemente an der Fülltüre des Kessels

Zur Messung der Kühlwassertemperaturen mit Pt-100-Widerstandsthermometern:

Der Kühlwasserkreislauf sah so aus, dass das Kühlwasser zuerst durch den Kondensator, von dort weiter durch den Feststoffkessel und anschließend zurück zur Rückkühlanlage gepumpt wurde, wo das Wasser wieder auf ca. 14 - 15 °C abgekühlt und erneut zum Kondensator geleitet wurde.

Die Messung der Wassertemperaturen erfolgte an 4 Stellen: am Kondensatoreintritt, am Kesseleintritt = Kondensatoraustritt, im Kessel an der von der Erzeugerfirma dafür vorgesehenen Stelle (vorne links oben) und am Kesselaustritt.

Die genaue Beschreibung der Funktionsweise von Thermoelementen (TE) und Widerstandsthermometern (Pt-100) findet sich im Anhang C.

#### **6.1.3.4 Messung der Brennstoff- und Kondensatmasse**

Für die Brennstoff- und Kondensatauswagen wurde eine Waage der Firma Satorius mit einer Auflösung von 0,5 g verwendet (Fehlergrenze: 5 g).

#### **6.1.3.5 Messdatenerfassung**

Zur Messdatenerfassung wurden Fieldpoint Module der Firma National Instruments verwendet.

Die Auswertung und Visualisierung erfolgte auf einem Pentium-Computer mit 133 MHz. Als Software diente das Paket LabTech / LabView der Firma Notebook. Für die Aufnahme der Daten wurde eine Abtastrate von 10 Sekunden gewählt. Sämtliche Messungen der Rauchgaszusammensetzung und der Temperatur erfolgten online und somit kontinuierlich.



Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14: Messdatenerfassung

### 6.1.3.6 Überblick über die gemessenen Parameter

Folgende Daten wurden im Sekundenintervall gemessen und alle 10 Sekunden ein arithmetischer Mittelwert gebildet, elektronisch gespeichert und für die Berechnung herangezogen:

Zeit			[s]
Kühlwasser	Temperaturen	am Kondensatoreintritt	[°C]
		am Kesseleintritt = Kondensatoraustritt	[°C]
		im Kessel	[°C]
		am Kondensatoraustritt	[°C]
Rauchgas	Temperaturen	am Kesseleintritt	[°C]
		zwischen Kessel und Kondensator	[°C]
		am Kondensatoreintritt	[°C]
		am Kondensatoraustritt	[°C]
	Konzentrationen	O <sub>2</sub> -Konzentration	[Vol%]
		CO <sub>2</sub> -Konzentration	[Vol%]
		CO-Konzentration	[ppm] bzw. [Vol%] für höhere CO-Konz.
		CxHy-Konzentration	[ppm]
Umgebungs- bedingungen	Raumtemperatur		[°C]

Tabelle 6-1: Überblick über die (online) gemessenen Parameter

Folgende Daten wurden vor bzw. nach der Messung im Datenblatt eingetragen:

Brennstoffeinwaage	[kg]
Ascheauswaage	[kg]
Kondensatmenge	[kg]
Kühlwassermenge + Zeit	[l] → [l/s]

Tabelle 6-2: Überblick über die (offline) gemessenen Parameter

Die Luftfeuchtigkeit wurde der Homepage des ZAMG (ZentralAnstalt für Meteorologie und Geodynamik) entnommen (Messungen 3 x täglich auf der Hohen Warte).

## **6.2 Durchführung der Versuche**

Für alle Abbrandversuche wurde Buchen-Scheitholz in Mengen zwischen 5 und 10 kg verwendet.

Der Brenn- und Heizwert und der Wassergehalt des verwendeten Holzes wurden im Bombenkalorimeter (1-g-Proben) und mittels Xylol-Destillation und im Trockenschrank bestimmt (Kapitel 5.2.2).

Insgesamt wurden 18 Versuche durchgeführt, die in den folgenden Kapiteln (6.3 Auswertung der Versuche) beschrieben werden soll.

Zuerst aber soll der chronologische Ablauf einer Messung inkl. Vor- und Nachbereitung dargestellt werden.

### **6.2.1 Vorbereitung**

- Computer hochfahren und das Programm LabView starten  
(Die Messgeräte blieben über Nacht eingeschaltet.)
- Kühlwasserdurchfluss (von der Rückkühlanlage kommend) aktivieren (öffnen)  
(Damit am Beginn der Messung die Temperatur im Kühlwassersystem bereits konstant ist.)
- Brennstoff-Korb und Aschelade tarieren (gegebenenfalls vorher von Rückständen der vorhergehenden Messung befreien)
- Scheit-Holz abwiegen und aufgeben
- Kondensatauffangbehälter tarieren
- Kalibrierung der Messgeräte:  
Glaswolle in die – den Messgeräten vorgeschaltete – Filterbombe einfüllen (dient der Vorreinigung des Rauchgases von Russpartikeln).  
Mit Kalibriergasen bzw. mit Luft (20,8 % O<sub>2</sub>) und Stickstoff (Nullpunkt bezüglich aller anderen gemessenen Parameter) die O<sub>2</sub>-, (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>-), CO<sub>2</sub>- und CO-Messgeräte kalibrieren.
- Zählerstand der Wasseruhr + genaue Uhrzeit notieren [→ l/s]

### 6.2.2 **Messung**

- Start = Start der Datenaufzeichnung und Anzünden des Holzes  
Die Diskussion des genauen Endpunktes einer Messung wird sich etwas komplexer gestalten als angenommen (siehe Kapitel 6.3.2).
- Abbrand überwachen – Messwerte (Temperaturen; Konzentrationen im Rauchgas) beobachten

### 6.2.3 **Nachbereitung**

- erneute Kalibrierung der Messgeräte (Justierung) – gleiche Vorgangsweise wie bei der Vorbereitung zur Messung
- Kühlwasserdurchfluss (von der Rückkühlanlage kommend) stoppen (schließen)  
Zählerstand der Wasseruhr + genaue Uhrzeit notieren [ $\rightarrow$  l/s]
- Aschelade und ggf. Brennstoff-Korb abwiegen
- Kondensatauffangbehälter abwiegen
- Das Programm LabView schließen und den Computer herunterfahren  
(Die Messgeräte blieben über Nacht eingeschaltet.)

### **6.3 Auswertung der Versuche**

Das Ziel war auszutesten, inwieweit die im Brennstoff enthaltene Energiemenge über die Kühlwassertemperaturen ermittelt werden kann, d. h. ob die Wärmemenge, die bei der Verbrennung des Holzes entsteht, quantitativ auf das Kühlwasser übergeht. Die dabei auftretenden Verluste sollten gefunden und quantifiziert werden. Als Verluste verstehen sich hier die „Verluste bezüglich dieser Fragestellung“ – also die Energiemenge, die nicht auf das Kühlwasser übergeht.

Wenn nachfolgend von einem „Wirkungsgrad bezogen auf das (Kühl-)Wasser“ gesprochen wird, ist damit jener Wirkungsgrad gemeint, der ausschließlich auf jene Energiemenge bezogen wird, die bei der Verbrennung (und in der Zeit der darauffolgenden Abkühlung) auf das Kühlwasser übergeht. (Die Energie aus der Kondensation des Wassers aus den Rauchgasen wird dabei stets bei der Berechnung miteinbezogen.)

Dieser „Wirkungsgrad bezogen auf das Kühlwasser“ ist von großer Bedeutung, da die grundsätzliche Fragestellung dieser Arbeit war herauszufinden, wie groß dieser ist.

Alle Versuche wurden nach den Gleichungen in Kapitel 6.3.1 (und 5.1.2) ausgewertet.

Ein wichtiger Bestandteil der Untersuchungen war es, potentielle Fehlerquellen in der Versuchsanordnung zu finden und nach Möglichkeit zu beseitigen sowie sensible Punkte in Hinblick auf die Verwendung als Bestimmungsmethode zu identifizieren.

Es wurden 18 Versuche durchgeführt, welche im Folgenden überblicksmäßig beschrieben werden:

- Die ersten 10 Versuche (Kapitel 6.3.3 „Vorversuche“), bei denen die Verbrennung des Buchenholzes nicht die erwarteten Rauchgastemperaturen lieferte und Kondensat bzw. Pyrolyseöl am Boden des Kessels austrat.

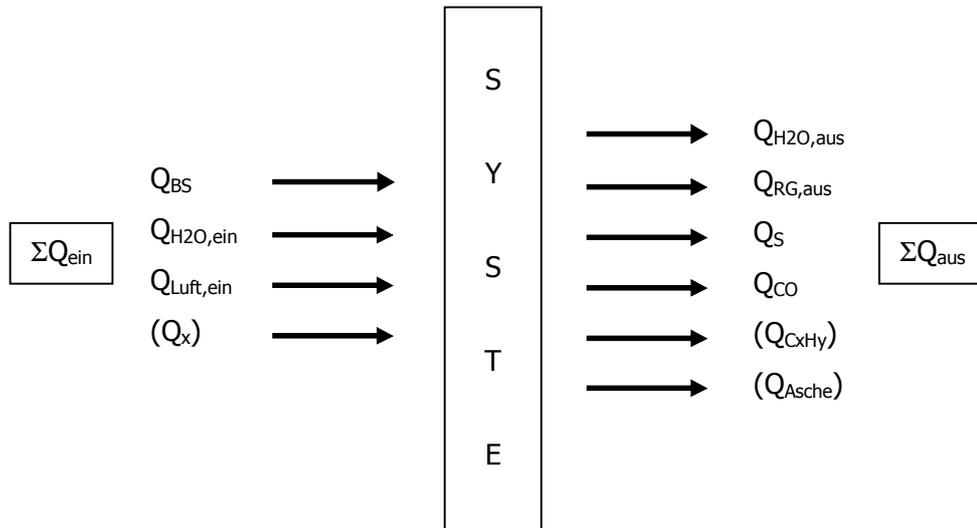
Unter diesen 10 Versuchen waren auch 3, die mit 13 Oberflächen-Thermoelementen zur Messung der Abstrahlungswärme auf der Fülltüre des Kessels durchgeführt wurden.

Anschließend musste das System ca. 10 Mal mit größeren Mengen (> 10 kg) Fichtenholz, das schneller abbrennt und höhere Verbrennungstemperaturen erzeugt, zu Reinigungszwecken „durchgeheizt“ werden, um die störenden Verunreinigungen (Kondensat und Russ) im Kessel abzubrennen und so zu entfernen.

- Darauf folgten 8 weitere Versuche (Kapitel 6.3.4 „Versuche“), bei denen die anfänglichen Probleme behoben werden konnten, von denen aber wiederum nur 5 sinnvoll ausgewertet werden konnten, da sich andere apparative Probleme (hauptsächlich fehlender Unterdruck).

### 6.3.1 Auswertungsgleichungen

#### 6.3.1.1 Energiebilanz



$\Sigma Q_{\text{ein}}$	Summe der in das System eingebrachten Energiemengen	[kJ]
$Q_{\text{BS}}$	Energiemenge, die mit dem Brennstoff in das System geht	[kJ]
$Q_{\text{W,ein}}$	Wärmemenge, die mit dem Kühlwasser in das System geht	[kJ]
$Q_{\text{L,ein}}$	Wärmemenge, die mit der Verbrennungsluft in das System geht	[kJ]
$Q_x$	Wärmemenge, die mit der Luftfeuchtigkeit in das System geht (Kondensationswärme)	[kJ]
$\Sigma Q_{\text{aus}}$	Summe der aus dem System ausgebrachten Energiemengen	[kJ]
$Q_{\text{W,aus}}$	Wärmemenge, die mit dem Kühlwasser aus dem System geht	[kJ]
$Q_{\text{RG,aus}}$	Wärmemenge, die mit dem Rauchgas aus dem System geht	[kJ]
$Q_S$	Wärmemenge, die durch Abstrahlung aus dem System geht	[kJ]
$Q_{\text{CO}}$	Energie, die durch unverbranntes Kohlenmonoxid aus dem System geht	[kJ]
$Q_{\text{CxHy}}$	Energie, die durch unverbrannte Kohlenwasserstoffe aus dem System geht	[kJ]
$Q_A$	Energie, die durch Unverbranntes in der Asche aus dem System geht	[kJ]

### 6.3.1.2 Energie im Brennstoff

$$\dot{Q}_{BS} = H_{o\ BS} \cdot m_{BS} / t \quad [\text{kJ/s}]$$

$\dot{Q}_{BS}$	Wärmemengenstrom, der mit dem Brennstoff in das System gelangt	[kJ/s]
$H_{o\ BS}$	Brennwert des Brennstoffes	[kJ/kg]
$m_{BS}$	Masse des Brennstoffes	[kg]
$t$	Auswertungszeitraum	[s]

### 6.3.1.3 Wärmemengenstrom, der auf das Kühlwasser übergeht

#### 6.3.1.3.1 Wärmemengenstrom im eintretenden Kühlwasser (bezogen auf Kessel + Kondensator)

$$\dot{Q}_{W,\text{ein}} = \dot{V}_{W,\text{ein}} \cdot \rho_{W,\text{ein}} \cdot c_{p\ W,\text{ein}} \cdot T_{W,\text{ein}} \quad [\text{kJ/s}]$$

$\dot{Q}_{W,\text{ein}}$	Wärmemengenstrom, der mit dem Kühlwasser in das System (Kessel + Kondensator) gefördert wird	[kJ/s]
$\dot{V}_W$	Volumenstrom des Kühlwassers	[m <sup>3</sup> /s]
$\rho_{W,\text{ein}}$	Dichte des Wassers beim Eintritt in den Kondensator	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_{p\ W,\text{ein}}$	spezifische Wärmekapazität des Wassers beim Eintritt in den Kondensator	[kJ/(kg.K)]
$T_{W,\text{ein}}$	Temperatur des Kühlwassers beim Eintritt in den Kondensator	[K]

#### 6.3.1.3.2 Wärmemengenstrom im austretenden Kühlwasser (bezogen auf Kessel + Kondensator)

$$\dot{Q}_{W,\text{aus}} = \dot{V}_{W,\text{aus}} \cdot \rho_{W,\text{aus}} \cdot c_{p\ W,\text{aus}} \cdot T_{W,\text{aus}} \quad [\text{kJ/s}]$$

$\dot{Q}_{W,\text{aus}}$	Wärmemengenstrom, der mit dem Kühlwasser aus dem System (Kessel + Kondensator) gefördert wird	[kJ/s]
$\dot{V}_W$	Volumenstrom des Kühlwassers	[m <sup>3</sup> /s]
$\rho_{W,\text{aus}}$	Dichte des Wassers beim Austritt aus dem Kessel	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_{p\ W,\text{aus}}$	spezifische Wärmekapazität des Wassers beim Austritt aus dem Kessel	[kJ/(kg.K)]
$T_{W,\text{aus}}$	Temperatur des Kühlwassers beim Austritt aus dem Kessel	[K]

**6.3.1.3.3 Wärmemengenstrom, der auf das Kühlwasser übergeht**

$$\dot{Q}_W = \dot{Q}_{W,aus} - \dot{Q}_{W,ein} = \dot{V}_W \cdot \rho_{W,m} \cdot c_{pm\ W} \cdot \Delta T_W \quad [\text{kJ/s}]$$

$\dot{Q}_W$  Wärmemengenstrom, der auf das Kühlwasser übergeht [kJ/s]

$\dot{Q}_{W,aus}$  Wärmemengenstrom, der mit dem Kühlwasser aus dem System (Kessel + Kondensator) gefördert wird [kJ/s]

$\dot{Q}_{W,ein}$  Wärmemengenstrom, der mit dem Kühlwasser in das System (Kessel + Kondensator) gefördert wird [kJ/s]

$V_W$  Volumenstrom des Kühlwassers [m<sup>3</sup>/s]

$\rho_{W,m}$  mittlere Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]

$$\rho_{W,aus} \sim \rho_{W,ein}$$

$c_{pm\ W}$  mittlere spezifische Wärmekapazität des Wassers [kJ/(kg.K)]

$$c_{p\ W,aus} \sim c_{p\ W,ein}$$

$\Delta T_W$  Differenz der Temperaturen des Kühlwassers beim Austritt aus dem Kessel und beim Eintritt in den Kessel [K]

$$\Delta T_W = ( T_{W,aus} - T_{W,ein} )$$

**6.3.1.4 Wärmemengenstrom im Kondensat**

$$\dot{Q}_K = H_{W,verd} \cdot m_K / t \quad [\text{kJ/s}]$$

$\dot{Q}_K$  Wärmemengenstrom, der mit dem Kondensat aus dem System entweicht [kJ/s]

$H_{W,verd}$  Verdampfungsenthalpie des Wassers [kJ/kg]

$m_K$  Masse des Kondensats [kg]

$t$  Auswertungszeitraum [s]

### **6.3.1.5 Wirkungsgrad bezogen auf das Kühlwasser**

Unter „Wirkungsgrad bezogen auf das (Kühl-)Wasser“ versteht sich hier jener Wirkungsgrad, der ausschließlich auf jene Energiemenge bezogen wird, die während der Verbrennung (und in der Zeit der darauffolgenden Abkühlung) auf das Kühlwasser übergeht. (Die Energie aus der Kondensation des Wassers aus den Rauchgasen wird dabei stets bei der Berechnung miteinbezogen.)

Dieser „Wirkungsgrad bezogen auf das Kühlwasser“ ist von großer Bedeutung, da die grundsätzliche Fragestellung dieser Arbeit war herauszufinden, wie groß dieser ist. – Das Ziel war ja auszutesten, inwieweit die im Brennstoff enthaltene Energiemenge über die Kühlwassertemperaturen ermittelt werden kann, d. h. ob die Wärmemenge, die bei der Verbrennung des Holzes entsteht, quantitativ auf das Kühlwasser übergeht.

$$\eta_w = (\dot{Q}_w + \dot{Q}_k) / \dot{Q}_{BS} \cdot 100 \quad [\%]$$

$\eta_w$  Wirkungsgrad bezogen auf das Kühlwasser [%]

$\dot{Q}_w$  Wärmemengenstrom, der auf das Kühlwasser übergeht [kJ/s]

$\dot{Q}_k$  Wärmemengenstrom, der mit dem Kondensat aus dem System entweicht [kJ/s]

$\dot{Q}_{BS}$  Wärmemengenstrom, der durch den Brennstoff in das System gelangt [kJ/s]

### **6.3.1.6 Verluste bezüglich dieser Versuchsanordnung**

Die Energiemenge, die nicht auf das Kühlwasser übergeht, stellt hier die „Verluste bezüglich dieser Fragestellung“ bzw. die „Verluste bezüglich dieser Versuchsanordnung“ dar, da das Ziel war, dass die Wärmemenge, die während der Verbrennung des Holzes entsteht, möglichst quantitativ auf das Kühlwasser übergeht. Die dabei auftretenden Verluste (Kapitel 6.3.1.6.1 – 6.3.1.6.4) sollten gefunden und nach Möglichkeit quantifiziert werden.

Diese „Verluste bezüglich dieser Versuchsanordnung“ setzen sich zusammen aus:

- Wärme in der Verbrennungsluft und im Rauchgas (6.3.1.6.1)
- Energie in unverbrannten Gase (6.3.1.6.2)
- Abstrahlungswärme (6.3.1.6.3)
- Energie in unverbrannten Bestandteilen in der Asche (6.3.1.6.4)

Da (wie u. a. auch in den Kapiteln 6.3.1.6.1, 6.3.2 und 7.2 beschrieben) bei den durchgeführten Versuchen keine Gasvolumenströme gemessen wurden, muss die tatsächliche Luftmenge ( $L$ ) und damit der tatsächliche Luftüberschuss ( $\lambda$ ) nach folgender Formel abgeschätzt werden (vgl. dazu Kapitel 5.1.2.3):

$$\lambda = ( 1 + \text{CO}_{2\text{max}} / \text{CO}_2 - 1 ) \cdot V_{\text{tr,min}} / L_{\text{min}}$$

Daraus kann die – in 6.3.1.6.1 und 6.3.1.6.2 benötigte – trockene Rauchgasmenge ( $V_{\text{tr}}$ ) berechnet werden (siehe Kapitel 5.1.2.4):

$$V_{\text{tr}} = 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + ( \lambda - 0,21 ) \cdot L_{\text{min}} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

Analog dazu erhält man die feuchte Rauchgasmenge ( $V_{\text{f}}$ ) (siehe Kapitel 5.1.2.6):

$$V_{\text{f}} = V_{\text{tr}} + W \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

$$V_{\text{f}} = 1,867 \cdot c + 0,7 \cdot s + ( \lambda - 0,21 ) \cdot L_{\text{min}} + 11,2 \cdot h + 1,24 \cdot w \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

### 6.3.1.6.1 Wärme in der Verbrennungsluft und im Rauchgas

#### 6.3.1.6.1.1 Wärme in der Verbrennungsluft

$$Q_{L,\text{ein}} = \{ V_{\text{tr}} \cdot c_{\text{pm RG,tr}} + [ ( V_{\text{f}} - V_{\text{tr}} ) - m_{\text{K}} / \rho_{\text{WD}} ] \cdot c_{\text{pm W}} \} \cdot T_{\text{L}} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$Q_{L,\text{ein}}$	Wärmemenge, die mit der Verbrennungsluft in das System geht	[kJ/kg]
$V_{\text{tr}}$	trockene Rauchgasmenge (aus der Verbrennungsrechnung bei Normalbedingungen)	[Nm <sup>3</sup> /kg]
	(vgl. dazu Kapitel 6.3.1.6 und 5.1.2.4)	
$c_{\text{pm RG,tr}}$	mittlere spezifische Wärme der trockenen Abgase (unter Normalbedingungen)	[kJ/(Nm <sup>3</sup> .K)]
$V_{\text{f}}$	feuchte Rauchgasmenge (aus der Verbrennungsrechnung bei Normalbedingungen)	[Nm <sup>3</sup> /kg]
	(vgl. dazu Kapitel 6.3.1.6 und 5.1.2.6)	
$m_{\text{K}}$	Masse Kondensat	[kg/kg]
$\rho_{\text{WD}}$	Dichte des Wasserdampfes	[kg/Nm <sup>3</sup> ]
$c_{\text{pm W}}$	mittlere spezifische Wärme des Wassers (unter Normalbedingungen)	[kJ/(Nm <sup>3</sup> .K)]
$T_{\text{L}}$	Temperatur der Umgebungsluft (= Verbrennungsluft)	[K]

Die Energie, die durch die Luftfeuchtigkeit und deren anschließende Kondensation im Rauchgaskondensator eingebracht wird, kann hier nicht quantifiziert werden, da weder ein Gasvolumenstrom noch die Kondensatmasse kontinuierlich gemessen wurde.

**6.3.1.6.1.2 Wärme im Rauchgas**

$$Q_{\text{RG,aus}} = \{ V_{\text{tr}} \cdot c_{\text{pm RG,tr}} + [ ( V_{\text{f}} - V_{\text{tr}} ) - m_{\text{K}} / \rho_{\text{WD}} ] \cdot c_{\text{pm W}} \} \cdot T_{\text{RG}} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$Q_{\text{RG,aus}}$	Wärmemenge, die mit dem Rauchgas aus dem System geht	[kJ/kg]
$V_{\text{tr}}$	minimale trockene Rauchgasmenge (aus der Verbrennungsrechnung bei Normalbedingungen)	[Nm <sup>3</sup> /kg] (vgl. dazu Kapitel 6.3.1.6 und 5.1.2.4)
$c_{\text{pm RG,tr}}$	mittlere spezifische Wärme der trockenen Abgase (unter Normalbedingungen)	[kJ/(Nm <sup>3</sup> .K)]
$V_{\text{f}}$	feuchte Rauchgasmenge (aus der Verbrennungsrechnung bei Normalbedingungen)	[Nm <sup>3</sup> /kg] (vgl. dazu Kapitel 6.3.1.6 und 5.1.2.6)
$m_{\text{K}}$	Masse Kondensat	[kg/kg Brennstoff]
$\rho_{\text{WD}}$	Dichte des Wasserdampfes	[kg/Nm <sup>3</sup> ]
$c_{\text{pm W}}$	spezifische Wärme des Wassers (unter Normalbedingungen)	[kJ/(Nm <sup>3</sup> .K)]
$T_{\text{RG}}$	Rauchgastemperatur. nach dem Kondensator	[K]

### 6.3.1.6.1.3 „Wärmegewinn“ aus der Verbrennungsluft

Da das Rauchgas im Kondensator unter die Temperatur der Umgebungsluft (= Temperatur der Verbrennungsluft) gekühlt wird, handelt es sich hier in Bezug auf die Fragestellung nicht um einen Wärmeverlust, sondern um einen „Wärmegewinn“, der wie ein negativer Verlust berücksichtigt wird.

$$Q_{L-RG} = ( Q_{L,ein} - Q_{RG,aus} ) / H_{u BS} \quad [\%]$$

$$Q_{L-RG} = \{ V_{tr} \cdot c_{pm RG,tr} + [ ( V_f - V_{tr} ) - m_K / \rho_{WD} ] \cdot c_{pm W} \} \cdot ( T_L - T_{RG} ) / H_{u BS} \cdot 100$$

$Q_{L-RG}$  „Wärmegewinn“ dadurch, dass die Umgebungsluft (= Verbrennungsluft) kälter ist als die Rauchgase nach dem Kondensator (bezogen auf den Heizwert) [%]

$Q_{L,ein}$  Wärmemenge, die mit der Verbrennungsluft in das System geht [kJ/kg]

$Q_{RG,aus}$  Wärmemenge, die mit dem Rauchgas aus dem System geht [kJ/kg]

$H_{u BS}$  Heizwert des Brennstoffes [kJ/kg]

$V_{tr}$  minimale trockene Rauchgasmenge (aus der Verbrennungsrechnung bei Normalbedingungen) [Nm<sup>3</sup>/kg]  
(vgl. dazu Kapitel 6.3.1.6 und 5.1.2.4)

$c_{pm RG,tr}$  mittlere spezifische Wärme der trockenen Abgase (unter Normalbedingungen) [kJ/(Nm<sup>3</sup>.K)]

$V_f$  feuchte Rauchgasmenge (aus der Verbrennungsrechnung bei Normalbedingungen) [Nm<sup>3</sup>/kg]  
(vgl. dazu Kapitel 6.3.1.6 und 5.1.2.6)

$m_K$  Masse Kondensat [kg/kg Brennstoff]

$\rho_{WD}$  Dichte des Wasserdampfes [kg/Nm<sup>3</sup>]

$c_{pm W}$  spezifische Wärme des Wassers (unter Normalbedingungen) [kJ/(Nm<sup>3</sup>.K)]

$T_L$  Temperatur der Umgebungsluft (= Verbrennungsluft) [K]

$T_{RG}$  Rauchgastemperatur. nach dem Kondensator [K]

### 6.3.1.6.2 Energie in unverbrannten Gasen

Hier kann nur das nicht vollständig verbrannte Kohlenmonoxid (CO) berücksichtigt werden, da – wie bereits in den Kapiteln 6.1 und 6.1.3.1 beschrieben – die unverbrannten Kohlenwasserstoffe (CxHy) im Rauchgas wegen eines Defekts des Messgerätes nicht bei allen Versuchen gemessen und daher nicht in die Auswertungen miteinbezogen werden konnten.

#### 6.3.1.6.2.1 Energie in unverbranntem Kohlenmonoxid

$$Q_{CO} = CO_m \cdot V_{tr} \cdot H_{u\ CO} / H_{u\ BS} \quad [\%] \quad \text{oder}$$

$$Q_{CO} = H_{u\ CO} \cdot CO \cdot c / [ 0,536 \cdot ( CO_{2m} + CO_m ) ] / H_{u\ BS} \quad [\%]$$

$Q_{CO}$	Anteil der Energiemenge, die durch unverbranntes CO aus dem System geht	[%]
$CO_m$	mittlere (gemessene) CO-Konzentration	[%]
$CO_{2m}$	mittlere (gemessene) CO <sub>2</sub> -Konzentration	[%]
$c$	Gehalt an Kohlenstoff (aus der Elementaranalyse)	[kg/kg]
$V_{tr}$	trockene Rauchgasmenge (aus der Verbrennungsrechnung bei Normalbedingungen)	[Nm <sup>3</sup> /kg]
	(vgl. dazu Kapitel 6.3.1.6 und 5.1.2.4)	
$H_{u\ CO} = H_{o\ CO}$	Heizwert = Brennwert von CO	[kJ/m <sup>3</sup> ] (= 12.640 kJ/Nm <sup>3</sup> )
$H_{u\ BS}$	Heizwert des Brennstoffes	[kJ/kg]

### 6.3.1.6.3 Abstrahlungswärme

$$Q_S = \sum \dot{Q}_x / \dot{Q}_{BS} \cdot 100 \quad [\%] \quad \dot{Q}_x = F_x \cdot \alpha \cdot (T_m - T_L) \cdot 1000 \quad [\text{kW}]$$

$Q_S$	Anteil der Wärmemenge, die durch Abstrahlung nach außen geht	[%]
$\dot{Q}_{BS}$	Wärmemengenstrom, der durch den Brennstoff in das System gelangt	[kJ/s]
$\dot{Q}_x$	Wärmeabgabe einer Teilfläche	[kW]
$F_x$	Teilfläche	[m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Wärmeübergangszahl	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$T_m$	mittlere Oberflächentemperatur der Teilfläche	[°C]
$T_L$	Temperatur der Umgebungsluft (= Verbrennungsluft)	[°C]

Diese Abstrahlungswärmemengen wurden für die Fülltüre des Kessels (oben auf der Fülltüre und an den seitlichen Flächen) berechnet. Die dort vorherrschenden Temperaturen wurden mit Oberflächen-Thermoelementen auf der Fülltüre kontinuierlich mitgemessen (am Deckel links-mittig, am Deckrand rechts-oben und am Deckelrand oben).

### 6.3.1.6.4 Energie in unverbrannten Bestandteilen in der Asche

Die Energie durch unverbrannte Bestandteile in der Asche ( $Q_A$ ) ist vernachlässigbar, da sich durch Vergleich mit Stoffdatenbanken für Buchenholz ergibt, dass die Ascheauswaagen in etwa dem theoretischen Aschegehalt entsprechen. (Der diesbezügliche Anteil an Energie [Energie durch unverbrannte Bestandteile in der Asche] liegt im Bereich von max. 0,5 % bezogen auf den Heizwert [ $H_U$ ] des Holzes.)

Auch die in der Asche eventuell noch verbleibende Restwärme ist minimal und damit vernachlässigbar.

### 6.3.2 Auswahl eines optimalen Auswertungszeitraumes

Folgende Parameter zur Festlegung eines Endpunktes wurden in Betracht gezogen:

- Temperatur des Kühlwassers
- Emissionen

Prinzipiell müssen am Ende einer Messung bzw. eines Auswertungszeitraumes die Kühlwasseraustritts- und die Kühlwassereintrittstemperatur am Kessel gleich sein, da dies bedeutet, dass keine Restwärme mehr vom Brennraum bzw. Rauchgas an das Kühlwasser abgegeben wird.

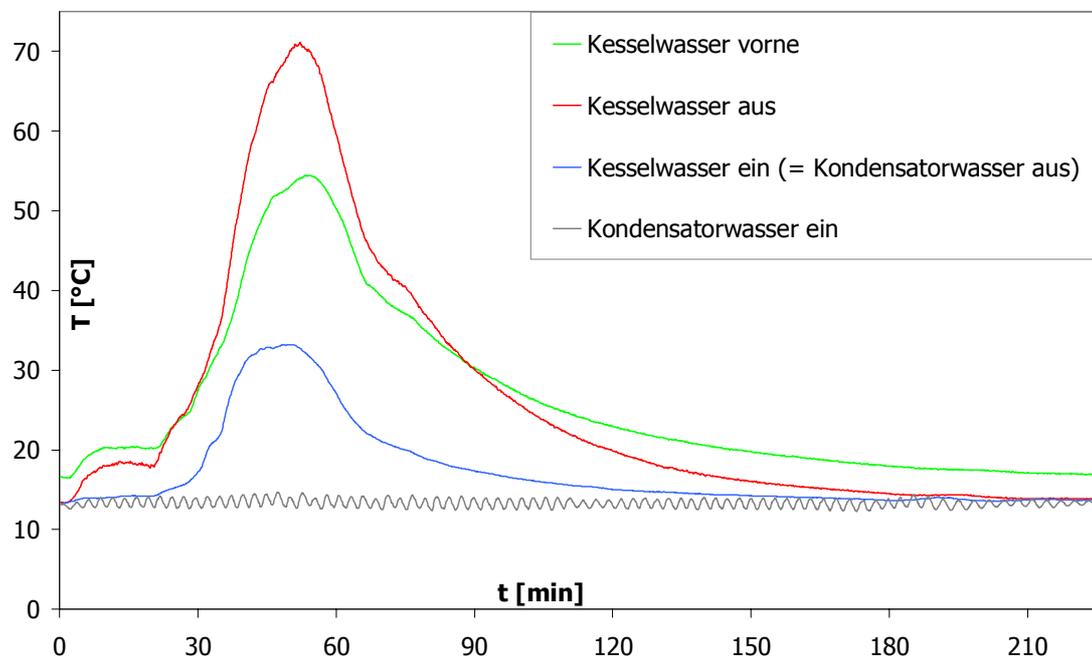


Abbildung 6-15: Verlauf der 4 gemessenen Kühlwassertemperaturen beim Versuch am 02.08.2005

Als erstes Kriterium für den Endpunkt des Auswertungszeitraumes wurde festgesetzt, dass das  $\Delta T$  zwischen Kühlwasserein- und -austritt am Kessel  $< 1 \text{ }^\circ\text{C}$  sein muss.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 6-3) sind die Wirkungsgrade für verschiedene  $\Delta T$  dargestellt. Man sieht, dass sich Schwankungen innerhalb des festgelegten Toleranzfensters deutlich auf das Ergebnis auswirken.

Um einen reproduzierbaren, auf alle Messungen anwendbaren, fixen Endpunkt zu definieren, wurde auch angedacht, die Messungen – in Anlehnung an die Auswertung einer genormten Kachelofenprüfung – bis zu dem Zeitpunkt auszuwerten, an dem die CO-Konzentration unter 10 ppm gefallen ist. Da dieser Zeitpunkt hier allerdings sehr willkürlich erscheint, wurde dieses Kriterium wieder verworfen.

Datum	02.08.2005				
Versuchsdauer (Auswertung)	+24 min länger	bis 10 ppm CO	- 24 min kürzer	- 48 min noch kürzer	
	225	201	177	153	min
<b><math>\Delta T</math> Kühlwasser Kessel aus – Kessel ein</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>1,6</b>	<b>°C</b>
Wirkungsgrad (Kühlwasser)	90,5	90,0	89,2	87,8	%
„Verluste“ durch $\Delta T$ Raumtemp. – Rauchgas nach Kond.	-1,7	-1,4	-1,2	-0,9	%
Verluste durch unverbranntes CO	1,6	1,6	1,6	1,6	%
Verluste durch Abstrahlung	1,4	1,3	1,2	1,1	%
$\Sigma$ Verluste	1,3	1,5	1,6	1,8	%
Wirkungsgrad Kühlwasser + Verluste	91,8	91,5	90,8	89,6	%

Tabelle 6-3: Gegenüberstellung verschiedener Auswertungszeiträume am Beispiel des Versuchs vom 02.08.2005

Am sinnvollsten erscheint es, ein  $\Delta T$  zwischen Kühlwasserein- und -austritt am Kessel von 0,1 °C als Endpunkt der Auswertung festzusetzen.

Da aber die Auswertung von den arithmetischen Mittelwerten über die gesamte Mess- bzw. Auswertungsdauer ausgeht, ist diese Vorgehensweise – dass nach der Maximaltemperatur der Verbrennung (die am Beispiel des Versuches vom 02.08.2005 nach ~ 50 Minuten bei ~ 410 °C Rauchgastemperatur liegt) noch eine vergleichsweise sehr lange Auskühlphase (in diesem Fall 2 ½ Stunden), in der nur noch Luft durch das System strömt, in die Berechnung miteinbezogen wird – als problematisch einzuschätzen. Es stellt sich hier die Frage, ob die Verbrennungsrechnung auf eine sehr lange Versuchsdauer angewendet werden kann, wenn es sich beim Großteil der zugrundeliegenden Messwerte nicht um eine Verbrennung, sondern um einen Abkühlvorgang handelt, und alle 10-Sekunden-Mittelwerte gleichermaßen in die Berechnung miteingehen.

Da die Auswertung hier auch auf der Verbrennungsrechnung auf Basis der gemessenen Temperaturen des Kühlwassers (inkl. der berücksichtigten Verluste im Rauchgas und der gemessenen Abstrahlungswärme) beruht, werden daraus Volumina errechnet, die sich auf einen reinen Verbrennungsvorgang beziehen.

Hier wäre es sinnvoll, einerseits den Unterdruck und optional oder additiv einen Volumenstrom (entweder der Verbrennungsluft beim Eintritt in den Brennraum oder des Rauchgases nach dem Kondensator) zu messen, um die tatsächlichen Volumina zu kennen. (Anhand dessen könnte auch entschieden werden, ob eventuell ein Gebläse für die Verbrennungsluft notwendig bzw. hilfreich ist.)

Zusammen mit einem bekannten Gasvolumenstrom könnte angedacht werden, einen gewichteten Mittelwert für die Berechnung heranzuziehen.

In Ermangelung eines geeigneten Druckmessgerätes zur kontinuierlichen Online-Messung oder einer Online-Volumenstrommessung konnte dem geschilderten Gedankenexperiment nicht weiter nachgegangen werden und es wurde als Endpunkt für die Auswertung ein  $\Delta T$  (Kühlwassereintrittstemperatur – Kühlwasseraustrittstemperatur am Kessel) von  $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  festgesetzt, da zu dem Zeitpunkt zumindest sichergestellt ist, dass praktisch keine Restwärme von der Verbrennung mehr im Brennraum sein kann.

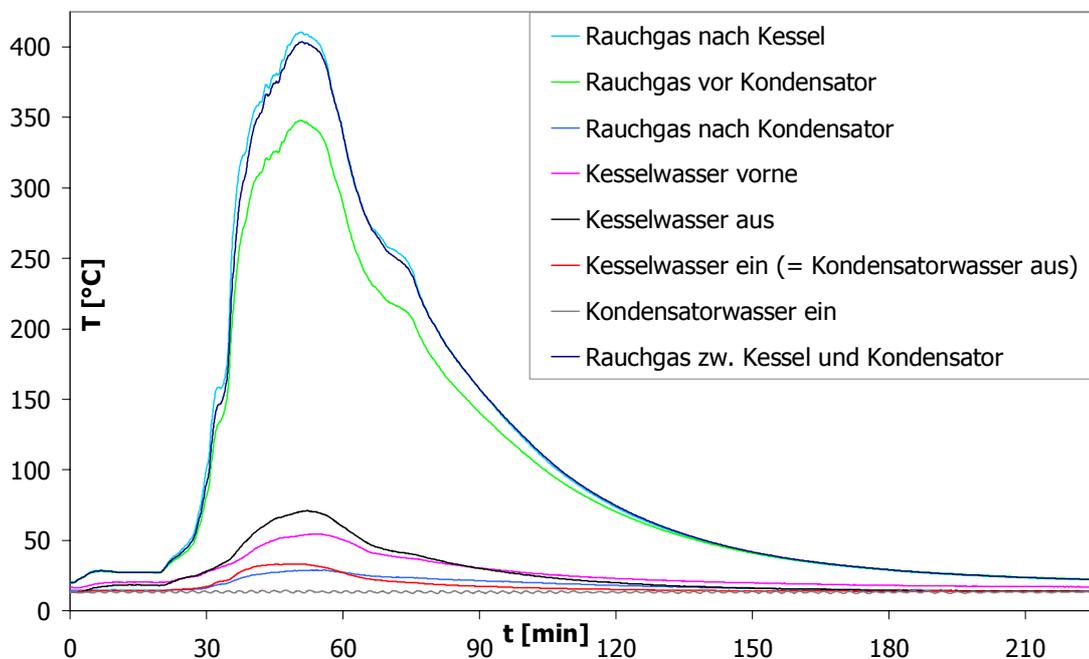


Abbildung 6-16: Verlauf der gemessenen Kühlwasser- und Rauchgastemperaturen (jeweils 4) beim Versuch am 02.08.2005

### 6.3.3 Vorversuche

Es gibt 2 Gründe, warum die ersten 10 Versuche nicht in Hinblick auf die gestellte Problematik ausgewertet werden konnten und als Vorversuche zu bewerten sind:

- Bei allen 10 Versuchen trat Kondensat (bzw. Pyrolyseöl) am Boden des Kessels aus, was einerseits auf Undichtheit des Kesselbodens bezüglich Flüssigkeiten schließen lässt, andererseits die Vermutung einer unterstöchiometrischen Verbrennung bzw. einer teilweisen Pyrolyse nahelegt, wenn es sich bei der ausgetretenen dunklen, öligen Flüssigkeit um Pyrolyseöl handelt. – Dafür spricht, dass dieses Phänomen bei späteren Versuchen, bei denen die Luftzufuhr in den Brennraum verbessert werden konnte, nicht mehr auftrat (siehe 6.3.3.1 und 6.3.4).
- Weiters ergab sich während dieser Messungen die Notwendigkeit, einen Brennstoff-Korb aus Lochblech in den Brennraum einzupassen (vgl. Kapitel 6.1.1), damit bei der späteren Verwendung als Müllkalorimeter auch klein-stückiger Müll verbrannt werden kann, der sonst durch den 4-teiligen Rost in die Aschelade fallen würde. Da diese 10 Versuche aber noch ohne diesen Brennstoff-Korb durchgeführt wurden, sind sie auch insofern als Vorversuche zu bewerten, als die Bedingungen im Brennraum anders waren und sie daher mit den nachfolgenden Versuchen nicht 1:1 vergleichbar sind.

Um die Pyrolyse bzw. unterstöchiometrische Verbrennung auszuschalten und eine möglichst (über)stöchiometrische Verbrennung zu ermöglichen, wurden hier zuerst verschiedene Parameter variiert: einerseits die Brennstoffmenge, andererseits wurde ein Teil der Holzscheite durch Hackschnitzel ersetzt (um den Anfang des Abbrandes zu beschleunigen) und der Kühlwasserdurchsatz wurde verändert – all das verhinderte nicht die Bildung des – hochkalorischen – Pyrolyseöls.

Erst bei den späteren Versuchen mit dem Brennstoff-Korb konnte eine Pyrolyse ausgeschaltet werden, indem speziell darauf geachtet wurde, dass das Holz locker in den Brennstoff-Korb geschichtet wurde (siehe 6.3.3.1). – Rückblickend konnte festgestellt werden, dass die Ursache für die Bildung des – energiereichen – Pyrolyseöls hier – bei den Vorversuchen – war, dass nicht genügend Luft von unten durch den Rost zum Ort der Verbrennung gelangen konnte, da ein zu großer Teil der Öffnungen des Rostes durch die darauf gestapelten Holzscheite blockiert war.

Da diese Vorversuche nicht zur endgültigen Auswertung herangezogen wurden, wird hier nur überblicksweise der Wirkungsgrad, also die ins Kühlwasser übergegangene Wärme bezogen auf die Energie im Brennstoff, angegeben:

Datum		<b>23.03.</b>	<b>24.03.</b>	<b>31.03.</b>	<b>01.04.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		99	97	84	87	%
Rauchgas nach Kessel	∅	103	111	73	95	°C
	max.	281	327	110	267	°C

Datum		<b>13.04.</b>	<b>15.04.</b>	<b>18.04.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		88	85	89	%
Rauchgas nach Kessel	∅	84	53	68	°C
	max.	299	203	155	°C

Tabellen 6-4: Überblick über die Vorversuche

### **6.3.3.1 Versuche mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme**

Zu Beginn wurden die 13 Oberflächen-Thermoelemente an verschiedenen Stellen des Kessels platziert und der Temperaturverlauf beobachtet, um so möglichst die gesamten Abstrahlungsverluste erfassen und quantifizieren zu können. Wie sich herausstellte, ist die Fülltüre des Kessels die einzige Schwachstelle bezüglich der Wärmedämmung (obwohl schon mit Steinwolle zusätzlich gedämmt worden war).

Da bei diesen 3 Versuchen zum 1. Mal der Brennstoff-Korb (im Brennraum) zum Einsatz kam, zeigten sich hier unerwartete und zunächst nicht klar zuordenbare Probleme. Diese Probleme äußerten sich darin, dass einerseits die maximalen Verbrennungstemperaturen im Schnitt deutlich niedriger waren als bei den späteren, zur Endauswertung herangezogenen Versuchen, andererseits ließ auch der Wirkungsgrad bezogen auf das Kühlwasser sehr zu wünschen übrig – es wurden bei diesen 3 Versuchen jeweils nur 80 %, 73 % und 68 % der Energie des Buchenholzes auf das Kühlwasser übertragen.

Wie sich durch weitere gezielte Versuche herausstellte, lag das Hauptproblem hier in der Schichtung des Scheitholzes. – Dieses darf keinesfalls dicht geschichtet werden, da in diesem Fall die Verbrennungsluft nicht durch das Lochblech hindurch in den Brennstoff-Korb eindringt, sondern am Weg des geringsten Widerstandes daneben vorbeistreicht und so nur das Rauchgas verdünnt. Die Art der Schichtung, die sich im Folgenden bewährt hat, sieht so aus, dass die Holzscheite aufeinanderfolgender Lagen um 90° in der horizontalen Ebene gedreht aufeinander geschichtet werden. Dadurch wird die Schichtung lockerer und durchlässig für die Verbrennungsluft, die durch das Holz hindurchströmen und so zum Ort der Verbrennung gelangen kann.

Nach diesen 3 Versuchen musste die Apparatur zu Reinigungszwecken ca. 10 Mal mit Fichtenholz, das schneller abbrennt, und größeren Mengen Holz, um höhere Temperaturen zu erzeugen, „durchgeheizt“ werden, um so die entstandenen Verunreinigungen (Kondensat und Russ) im Kessel abzubrennen und zu entfernen.

Datum		<b>31.05.</b>	<b>13.06.</b>	<b>14.06.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		80	73	68	%
Kondensat- bzw. Pyrolyseölaustritt *		~ 120	~ 60	~ 170	g
Rauchgas nach Kessel	Ø	51	50	58	°C
	max.	91	144	129	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	14	13	13	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	17	16	17	°C
	max.	20	21	22	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	29	27	29	°C
	max.	43	45	45	°C
Raumtemp.	Ø	25	23	24	°C
ΔT ( Raumtemp. – Kond. aus )	Ø	9	8	8	°C
O <sub>2</sub>	Ø	18,9	18,7	18,5	vol%
CO	Ø	1130	1032	1194	ppm
	max.	1897	1859	1862	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	1,7	1,8	2,0	vol%
	max.	4,1	6,1	4,9	vol%
CxHy	Ø	203	190	- - -	ppm
	max.	1911	1275	- - -	ppm
λ	Ø	11,6	11,4	10,2	
Temp. am Deckel (links-mittig) **	Ø	50	42	47	°C
	max.	70	53	56	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben) **	Ø	70	69	71	°C
	max.	91	92	94	°C
Temp. am Deckelrand oben **	Ø	46	41	43	°C
	max.	65	58	56	°C
Brennstoff		6,4	4,1	9,8	kg
		5360	8750	10810	W
Versuchsdauer (Auswertung)		3,7	2,4	4,5	h
Wassermenge		367	395	388	l/h
Kondensat		1,9	1,1	3,0	kg
		350	330	460	W
Asche		0,08	0,08	0,15	kg
Asche theort.		0,07	0,04	0,10	kg

\* Die hier angeführte Menge an Pyrolyseöl / Kondensat versteht sich als diejenige Menge, die am Kesselboden ausgetreten ist, dort aufgefangen und anschließend gewogen werden konnte. Ob und wie viel Pyrolyseöl / Kondensat noch zusätzlich im Kessel entstanden sein könnte, lässt sich nicht abschätzen.

\*\* Hier handelt es sich um Mittelwerte aus den 13 Einzelwerten, die an der Fülltüre = „Deckel“ des Kessels gemessen wurden.

Tabelle 6-5: Eckdaten der Versuche mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme (mit 13 Oberflächen-Thermoelementen)

In den beiden nachfolgenden Tabellen wurden aus den 13 Messwerten der Oberflächentemperaturen 3 Mittelwerte gebildet. So kann gezeigt werden, dass diese Messwerte, wenn auch die Messungen nicht wie geplant verlaufen sind (siehe oben), durchaus mit den zur Endauswertung herangezogenen Messungen vergleichbar sind, da zwar die Verbrennungs- bzw. Rauchgastemperaturen hier deutlich niedriger waren, die Außentemperaturen an der Fülltüre jedoch durchaus vergleichbar sind mit denen bei Messungen, bei denen aufgrund einer besseren Luftzufuhr ein besserer Abbrand des Buchenholzes stattfand und die Verbrennungswärme näherungsweise quantitativ auf das Kühlwasser übergang.

Messungen mit 13 Oberflächen-Thermoelementen(TE)					
Datum		<b>31.05.</b>	<b>13.06.</b>	<b>14.06.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		80	73	68	%
Rauchgas nach Kessel	∅	51	50	58	°C
	max.	91	144	129	°C
Temp. am Deckel (links-mittig) **	∅	50	42	47	°C
	max.	70	53	56	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben) **	∅	70	69	71	°C
	max.	91	92	94	°C
Temp. am Deckelrand oben **	∅	46	41	43	°C
	max.	65	58	56	°C

Messungen, die zur Endauswertung herangezogen wurden							
Datum		<b>02.08.</b>	<b>22.07.</b>	<b>21.07.</b>	<b>20.07.</b>	<b>18.07.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		90,1	90,4	95,6	93,2	91,2	%
Rauchgas nach Kessel	∅	122	75	93	78	90	°C
	max.	411	170	259	186	216	°C
Temp. am Deckel (links-mittig) **	∅	---	---	54	57	50	°C
	max.	---	---	74	83	66	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben) **	∅	70	66	63	61	66	°C
	max.	101	93	88	89	92	°C
Temp. am Deckelrand oben **	∅	---	62	62	54	59	°C
	max.	---	101	105	92	96	°C

Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7: Gegenüberstellung der Oberflächentemperaturen der Fülltüre des Kessels bei den 3 Versuchen mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme mit 13 Oberflächen-Thermoelementen und bei den Versuchen, die zur Endauswertung herangezogen wurden

### 6.3.4 Versuche

Durch geeignete Schichtung der Holzscheite im Brennraum bzw. Brennstoff-Korb – wie in Kapitel 6.3.3.1 beschrieben – konnte eine ausreichende Luftzufuhr gewährleistet werden, sodass das Problem der (teilweisen) Pyrolyse behoben werden konnte und bei den darauffolgenden 8 Versuchen eine unterstöchiometrische Verbrennung nicht mehr auftrat.

Hier sind die Versuche nach dem Vorhandensein oder Fehlen eines ausreichend großen Unterdrucks nach dem Kondensator in 2 Gruppen einzuteilen:

- Bei 3 Versuchen war der notwendige Unterdruck im Abzug nicht vorhanden und Rauchgas trat an der Fülltüre des Kessels aus.
- Bei 5 weiteren Versuchen war der Unterdruck ausreichend groß. – Diese wurden zur „Endauswertung“ herangezogen.

Bei den in der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 6-8) charakterisierten 3 Versuchen war der Unterdruck im Abzug, in den das Rauchgas nach dem Kondensator geleitet wurde, zu klein, was einerseits durch Messungen im Verbindungsrohr vom Kondensator zum Abzug (allerdings nicht online!) und andererseits dadurch belegbar ist, dass ganz offensichtlich Rauchgas am Kessel austrat – und zwar am Rand der (geschlossenen) Fülltüre und am daran befestigten Griff, wie auf folgenden Fotos zu erkennen ist:



Abbildung 6-17: Dokumentation des Rauchgasaustrittes an der Fülltüre des Kessels

Der zu geringe Unterdruck war einerseits auf jeden Fall zurückzuführen auf Probleme des Saugzuggebläses im Abzug, in den das Rauchgas eingeleitet wurde. – Obwohl alle Öffnungen des Abzugs bis auf eine geschlossen waren, wurde Asche, die in die Nähe dieser Öffnung gebracht wurde, nicht eingesaugt, und eine direkt davor platzierte Flamme (Feuerzeug-Probe) ging nicht aus.

Andererseits wurde der hier verwendete Kondensator (Kapitel 6.1.2) nach diesen Kalorimeter-Versuchen einem Kachelofen-Versuch nachgeschaltet, bei dem auch der Unterdruck im Kamin zu gering war, solange das Rauchgas vom Kachelofen über den Kondensator in den Kamin geführt wurde. – Es scheint also auch der Kondensator – wahrscheinlich durch Ablagerungen und Inkrustationen – einen erhöhten Widerstand darzustellen.

Datum		<b>26.07.</b>	<b>03.08.</b>	<b>04.08.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		88	79	81	%
Unterdruck anfangs		7,5	9	4,5	Pa
Rauchgas nach Kessel	Ø	130	89	85	°C
	max.	362	219	259	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	13	13	14	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	16	17	21	°C
	max.	25	24	42	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	24	28	49	°C
	max.	49	52	115	°C
Raumtemp.	Ø	26	27	25	°C
ΔT Raumtemp. - Kond. aus	Ø	8	11	8	°C
O <sub>2</sub>	Ø	15,9	17,4	16,0	vol%
CO	Ø	1147	1104	994	ppm
	max.	1897	1855	1877	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	4,0	2,9	4,3	vol%
	max.	16,6	10,9	18,0	vol%
CxHy	Ø	---	---	---	ppm
	max.	---	---	---	ppm
λ	Ø	5,0	7,0	4,7	
Temp. am Deckel (links-mittig)	Ø	---	---	46	°C
	max.	---	---	69	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben)	Ø	69	73	61	°C
	max.	99	108	98	°C
Temp. am Deckelrand oben	Ø	49	---	55	°C
	max.	78	---	102	°C
Brennstoff		9,9	10,3	10,4	kg
		17580	11970	9940	W
Versuchsdauer (Auswertung)		2,8	4,3	5,2	h
Wassermenge		1141	522	184	l/h
Kondensat		4,9	4,7	4,3	kg
		1200	760	570	W
Asche		0,115	0,159	0,13	kg
Asche theort.		0,100	0,104	0,105	kg

Tabelle 6-8: Eckdaten der 3 Versuche mit zu geringem Unterdruck im Abzug

### 6.3.4.1 Versuche zur „Endauswertung“

Diese 5 Versuche wurden genau so durchgeführt wie die zuvor im Kapitel 6.3.4 beschriebenen, mit dem einzigen Unterschied, dass der geforderte Unterdruck im Abzug groß genug war (bei einem Versuch 8 Pa, bei 4 weiteren Versuchen 10 – 11,5 Pa); somit kam es auch zu keinem Rauchgasaustritt an der Kessel-Fülltüre.

Diese Versuchsanordnung wurde unter sehr ähnlichen Bedingungen (1 Mal wurde anstatt der sonst eingesetzten 5 kg Buchenholz 10 kg verwendet) 5 Mal durchgeführt, um eine ausreichende Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wenn die folgenden Punkte geben sind bzw. eingehalten werden:

- Der erforderliche Unterdruck nach dem Kondensator muss gegeben sein.
- Das Holz muss wie schon beschrieben (Kapitel 6.3.3.1) locker in den Brennraum (bzw. Brennstoff-Korb) geschichtet werden.

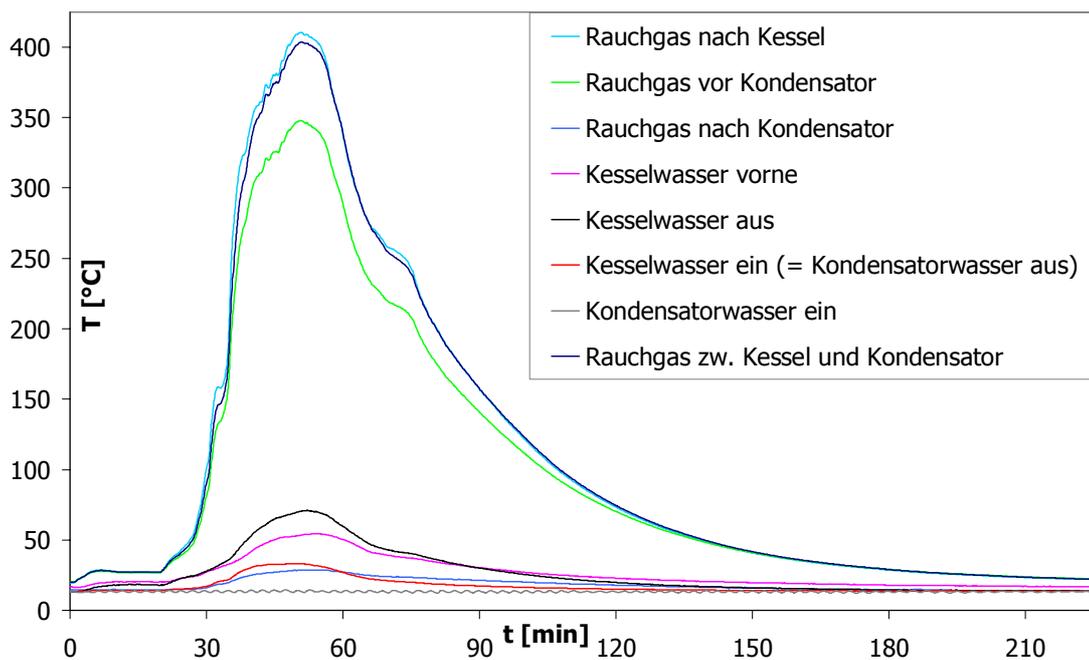


Abbildung 6-18: Abbrandkurve des Versuchs vom 02.08.2005

Datum		18.07.	20.07.	21.07.	22.07.	02.08.	
<b>Wirkungsgrad (Wasser)</b>		<b>91,2</b>	<b>93,2</b>	<b>95,6</b>	<b>90,4</b>	<b>90,1</b>	<b>%</b>
Unterdruck (anfangs)		11,5	10	8	11,5	10	Pa
Rauchgas nach Kessel	Ø	90	78	93	75	122	°C
	max.	216	186	259	170	411	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	14	14	14	15	13	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	22	23	25	26	18	°C
	max.	36	36	43	40	33	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	41	42	52	52	27	°C
	max.	81	84	102	95	71	°C
Raumtemp.	Ø	26	25	25	25	27	°C
ΔT Raumtemp. - Kond. aus	Ø	7	7	5	5	9	°C
O <sub>2</sub>	Ø	18,2	18,6	18,1	18,7	16,8	vol%
CO	Ø	985	865	898	1009	970	ppm
	max.	1847	1831	1811	1837	1800	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	2,3	1,9	2,4	1,8	3,7	vol%
	max.	9,5	7,9	12,8	6,1	17,8	vol%
CxHy	Ø	---	---	---	---	---	ppm
	max.	---	---	---	---	---	ppm
λ	Ø	8,8	10,6	8,4	11,2	5,5	
Temp. am Deckel (links-mittig)	Ø	50	57	54	---	---	°C
	max.	66	83	74	---	---	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben)	Ø	66	61	63	66	70	°C
	max.	92	89	88	93	101	°C
Temp. am Deckelrand oben	Ø	59	54	62	62	---	°C
	max.	96	92	105	101	---	°C
Brennstoff		5,4	5,4	5,2	5,2	10,1	kg
		10420	7820	8650	7660	15100	W
Versuchsdauer (Auswertung)		2,6	3,5	3,0	3,4	3,3	h
Wassermenge		279	214	174	155	772	l/h
Kondensat		2,4	1,9	2,0	1,9	4,6	kg
		640	380	460	390	950	W
Asche		0,077	0,074	0,079	0,076	0,108	kg
Asche theort.		0,054	0,055	0,052	0,052	0,102	kg

Tabelle 6-9: Eckdaten der 5 Versuche, die zur Endauswertung herangezogen wurden

Da die im Kapitel 7.2 („Ausblick“) noch bestehenden Schwierigkeiten mit Sicherheit größere Fehlerspannen beinhalten als die, die sich aus den apparativen Fehlergrenzen ergeben, wurde auf eine solche Fehlerbetrachtung hier bewusst verzichtet, da sie keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern könnte.

## **7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

### **7.1 Zusammenfassung**

Ziel des Projektes „Müllkalorimeter“ ist die Entwicklung einer Messapparatur im Technikumsmaßstab zur Bestimmung des Brennwertes von heterogenen Materialien in einem Bereich von 4.000 kJ/kg bis 10.000 kJ/kg für Abfallstoffe und bis 18.000 kJ/kg für biogene Referenzmaterialien.

Ziel dieser Arbeit im Speziellen war es, anhand der Verbrennung von Buchenholz mit bekanntem Brennwert eine Energiebilanz über die gesamte Messapparatur aufzustellen, in der dann künftig die Bestimmung des (dann unbekanntes) Brennwertes von anderen Materialien stattfinden soll.

Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung und des hohen Inertstoffanteils der Abfallmaterialien erschien eine Probeneinsatzmenge von ca. 5 – 10 kg (anstelle von 1-g-Proben im Bombenkalorimeter) sinnvoll und zielführend.

Zu diesem Zweck wurde der Feststoffkessel EKH 30 der Firma EDER GmbH in Verbindung mit einem nachgeschalteten Rauchgaskondensator, durch den die kondensierbaren Anteile der entstandenen Rauchgase mittels Abkühlung auf annähernd Raumtemperatur auskondensiert und gesammelt wurden, verwendet.

Sämtliche Messungen wurden mit Buchenscheitholz (mit Rinde) mit bekanntem Brennwert und Wassergehalt durchgeführt.

Die Temperaturen des Rauchgases und des Kühlwassers wurden an verschiedenen Stellen der Apparatur gemessen, elektronisch registriert und aufgezeichnet.

Eine Energiebilanz über die gesamte Anlage sollte den (bekannten) Brennwert der eingesetzten Brennstoffprobe (Buchenholz) liefern. Den Hauptbilanzierungsanteil bildete die durch das Kühlwasser abgeführte Wärmemenge. Die weiteren Bilanzierungsanteile, die bezüglich dieser Versuchsanordnung die Verluste darstellten, sollten lokalisiert und nach Möglichkeit quantifiziert werden (Abgasverluste durch unvollständige Verbrennung, Strahlungsverluste etc...).

Um die (Un-)Vollständigkeit der Verbrennung nachvollziehen zu können, wurden mittels einer Rauchgasanalyse die im Rauchgas aufgetretenen Anteile an  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $(\text{C}_x\text{H}_y)$  und  $\text{O}_2$  registriert. Auch die Wärmeverluste durch Abstrahlung wurden gemessen und quantifiziert.

Es war zu berücksichtigen, dass der messtechnische und vor allem der zeitliche Aufwand für eine Messung so gering wie möglich gehalten werden sollten.

Primäres Ziel der Auswertung war es zu bestimmen, inwieweit die während der Verbrennung von Buchenholz frei werdende Wärmemenge auf das Kühlwasser übergeht. Da dies durchschnittlich zu  $\sim 92\%$  der Fall war (siehe 6.3.4.1 „Versuche zur „Endauswertung“), sollte von einer Auswertung NUR auf Basis der Kühlwassertemperaturen Abstand genommen werden.

Einerseits konnten Verluste (bezüglich dieser Versuchsanordnung) abgeschätzt werden, andererseits wurden mögliche weiterführende Verbesserungen der durchgeführten Messungen im Sinne der Weiterentwicklung zu einer Bestimmungsmethode entworfen, die im folgenden Kapitel 7.2 („Ausblick“) erörtert werden.

Eine Zusammenstellung der Versuche (sowohl tabellarisch als auch in Form der Abbrandkurven) findet sich in ANHANG B (ab Seite 94).

## **7.2 Ausblick**

Wie sich im Zuge der zahlreichen durchgeführten Versuche herausstellte, sind noch einige Verbesserungen erforderlich, um einerseits eine vollständige Energiebilanz aufstellen zu können, und andererseits die bei der Verbrennung frei werdende Wärmemenge möglichst quantitativ auf das Kühlwasser zu transferieren. Einiges könnte auch vereinfacht werden. Die im Zuge dieser Arbeit gefundenen möglichen Verbesserungen werden im Folgenden beschrieben.

Durch die Berücksichtigung der folgenden Punkte (7.2.1 – 7.2.5) kann der „Wirkungsgrad bezogen auf das Kühlwasser“ (vgl. Kapitel 6.3) in Hinkunft noch verbessert bzw. die Energiebilanz vervollständigt werden.

### **7.2.1 Unterdruck im Abzug/Kamin**

Der notwendige Unterdruck nach dem Kondensator muss vorhanden sein!!

Der Unterdruck sollte kontinuierlich online mitgemessen werden.

### **7.2.2 Messung eines Gasvolumenstroms**

Ein Gasvolumenstrom (entweder die Verbrennungsluft oder das Rauchgas nach dem Kondensator) sollte gemessen werden.

Durch die Messung eines solchen Volumenstroms wären die Abgasverluste durch unvollständige Verbrennung (und die „Wärme in der Verbrennungsluft und im Rauchgas“ [vgl. 6.3.1.6.1]) quantifizierbar.

Dafür würde auch sprechen, dass dann die Luftfeuchtigkeit, die zum Teil im Kondensator mitauskondensiert wird, quantifiziert werden könnte. (Eine diesbezügliche Abschätzung wäre auch möglich durch die Online-Messung der Kondensatmasse, da nach der Verbrennung nur mehr Wasser aus der Luft auskondensiert wird.)

### **7.2.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe**

Die Messung der Kohlenwasserstoffe ( $C_xH_y$ ) im Rauchgas würde es ermöglichen, die „unverbrannten Bestandteile“ und somit die Verluste im Rauchgas zu vervollständigen.

#### **7.2.4 Wärmeabstrahlung**

Die Fülltüre des Kessels muss gedämmt, besser noch Wasser-gekühlt werden.

So kann der mit Abstand allergrößte Anteil der Abstrahlungsverluste eliminiert werden. (Eine Messung mit Oberflächen-Thermoelementen ist dann nicht mehr notwendig.)

Im Fall der Wasserkühlung könnte das Kühlwasser für die Fülltüre in den schon bestehenden Kühlwasserkreislauf integriert und in die Auswertung des Kühlwasserkreislaufes miteinbezogen werden.

Eine solche Kühlung könnte mit einem „Aufsatz“ für die Fülltüre realisiert werden, in dem Kühlschlangen integriert sind. (Dieser Aufsatz muss abnehmbar sein, weil es möglich sein muss, die Fülltüre zu öffnen, um Brennstoff einbringen zu können.)

#### **7.2.5 Kühlwassertemperatur**

Es könnte eine Erleichterung darstellen, wenn die Kühlwassertemperatur reguliert werden könnte. – So würde die Differenz zwischen Raumtemperatur und Rauchgas-temperatur nach dem Kondensator kleiner werden oder sogar wegfallen.

Alternativ dazu könnte eine Kühlwassermengenmessung online geschaltet werden, wodurch je nach Verbrennungstemperatur der Durchfluss nachreguliert werden könnte.

## **8 LITERATUR**

[inkl. Normen]

Abfallwirtschaftsgesetz – AWG (Bundesgesetz über die Vermeidung und Behandlung von Abfällen), BGBl. Nr. 325/1990 idF BGBl. I Nr. 90/2000

Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002 (Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft), BGBl. I Nr. 102/2002

Anton Eder GmbH – <http://eder.leisach.com>

Prospekt Feststoffkessel EKH – <http://eder.leisach.com/data/PDF/EKH.pdf>

(Stand 02.2005 – 08.2007)

Bachmann G: Bestimmung des Heiz- und Brennwertes von heterogenen Materialien im Technikumsmaßstab, Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Wien, Dissertation, 2002

Biobib – A database for biofuels – <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib>

(Stand 02.2005 – 08.2007)

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft:

Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2006 – <http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at>

(Stand 06.2007)

CD Römpp Chemielexikon, Georg Thieme Verlag, 9. Auflage des Römpp Chemie Lexikons auf CD-ROM, Version 1.0, 1995

Deponieverordnung (Verordnung des Bundesministers für Umwelt über die Ablagerung von Abfällen), BGBl. Nr. 164/1996 ST0049

Ebert H.-P.: Heizen mit Holz, Ökobuch Verlag, 9. Auflage, 2004 [ISBN: 3-936896-03-8]

Ephy-Mess – Gesellschaft für Gesellschaft für Elektro-Physikalische Messgeräte mbH – <http://www.ephy-mess.de/> (Stand 06.2007)

Hackl A., Mauschitz G.: Klimarelevanz der Abfallwirtschaft (Studie im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie), Weitra/Wien, 1997

---

Handbook of Chemistry and Physics, The Chemical Rubber Co., 52<sup>nd</sup> Edition, 1971–72

Hofbauer H.: Auslegung von Feuerungsanlagen, Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Wien, Skriptum zur Vorlesung „Auslegung verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen IV – Verbrennungsanlagen“, 2000

Mawi-therm Temperatur-Prozesstechnik GmbH – <http://www.temperatursensoren.com>  
(Stand 06.2007)

Padouvas E.: Die Verbrennung – Verbrennungsrechnung, Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Wien, Skriptum zur Vorlesung „Brennstoff- und Energietechnologie“ (Hofbauer H.), 2002

Phyllis – A database for biomass and waste: <http://www.ecn.nl/phyllis>  
(Stand 02.2005 – 08.2007)

Pico Technology – <http://www.picotech.com/applications/elektronikjournal.pdf>  
(Stand 06.2007)

Pöckl G.: Bestimmung des oberen Heizwertes laut Deponieverordnung im Technikumsmaßstab an bereitgestellten mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Wien, Diplomarbeit, 2000

Recknagel H., Sprenger E., Schramek E.-H.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Verlag, 69. Auflage, 1999 [ISBN: 3-486-26215-7]

Säkaphen GmbH – <http://www.saekaphen.de/> (Stand 05.2007)

VDI-Wärmeatlas, VDI-Verlag, 7. Auflage, 1994 [ISBN: 3-18-401361-8]

Warnatz J., U. Maas, Dibble R. W.: Verbrennung, Springer Verlage, 3. Auflage, 2001 [ISBN: 3-540-42128-9]

ZAMG – ZentralAnstalt für Meteorologie und Geodynamik – <http://www.zamg.ac.at>  
Jahrbuch 2005 – <http://www.zamg.ac.at/fix/klima/jb2005/> (Stand 05.2007)

Verwendete Normen:

DIN 51900-1, 51900-2 und 51900-3:

Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes

Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren

Teil 2: Verfahren mit isoperibolem oder static-jacket Kalorimeter

Teil 3: Verfahren mit adiabatischem Mantel

DIN 51718:

Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes und der Analysenfeuchtigkeit

DIN 4702:

Heizkessel

Teil 1: Begriffe, Anforderungen, Prüfung; Kennzeichnung

Teil 2: Regeln für die heiztechnische Prüfung

ÖNORM EN 303-5:

Heizkessel

Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW (Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung)

ÖNORM EN 304:

Heizkessel – Prüfregeln für Heizkessel mit Ölzerstäubungsbrennern

ÖNORM B 8303:

Bemessung von Kachelöfen – Prüfungen

ÖNORM EN 12809:

Heizkessel für feste Brennstoffe – Nennwärmeleistung bis 50 kW (Anforderungen und Prüfungen (konsolidierte Fassung))

An dieser Stelle möchte ich mich noch bedanken bei Prof. Hermann Hofbauer für die Möglichkeit zu dieser Diplomarbeit und für seine Unterstützung, weiters bei Emmanuel Padouvas und vor allem bei Poldi Kleemann, der mir nicht nur eine große Hilfe beim Aufbau und der Durchführung der Versuche war, sondern ohne den das Ganze nie so viel Spaß gemacht hätte!

Mein besonderer Dank gilt Lisl Wopienka, die mir von Anfang bis Ende (des Studiums und der Diplomarbeit) mit Rat und Tat zur Seite stand!



## 9 ANHANG A

### 9.1 Verzeichnis der Formelzeichen

$\alpha$	Wärmeübergangszahl	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
c	Gehalt an Kohlenstoff	[kg/kg]
CO <sub>m</sub>	mittlere (gemessene) CO-Konzentration	[%]
CO <sub>2m</sub>	mittlere (gemessene) CO <sub>2</sub> -Konzentration	[%]
c <sub>pm RG,tr</sub>	mittlere spezifische Wärmekapazität der trockenen Abgase (unter Normalbedingungen)	[kJ/(Nm <sup>3</sup> .K)]
c <sub>p W,aus</sub>	spezifische Wärmekapazität des Wassers beim Austritt aus dem Kessel	[kJ/(kg.K)]
c <sub>p W,ein</sub>	spezifische Wärmekapazität des Wassers beim Eintritt in den Kondensator	[kJ/(kg.K)]
c <sub>pm W</sub>	mittlere spezifische Wärme des Wassers	(kJ/(kg.K))
c <sub>pm W</sub>	mittlere spezifische Wärme des Wassers (unter Normalbedingungen)	(kJ/(Nm <sup>3</sup> .K))
F <sub>x</sub>	Teilfläche	[m <sup>2</sup> ]
h	Gehalt an Wasserstoff	[kg/kg]
H <sub>o</sub>	Brennwert (früher „oberer Heizwert“)	[kJ/kg]
H <sub>o CO</sub>	Brennwert von CO = Heizwert von CO = 12.640 kJ/Nm <sup>3</sup>	[kJ/m <sup>3</sup> ]
H <sub>o BS</sub>	Brennwert des Brennstoffes	[kJ/kg]
H <sub>u</sub>	Heizwert (früher „unterer Heizwert“)	[kJ/kg]
H <sub>u CO</sub>	Heizwert von CO = Brennwert von CO = 12.640 kJ/Nm <sup>3</sup>	[kJ/m <sup>3</sup> ]
H <sub>u BS</sub>	Heizwert des Brennstoffes	[kJ/kg]
H <sub>W,verd</sub>	Verdampfungsenthalpie des Wassers	[kJ/kg]
η <sub>W</sub>	Wirkungsgrad bezogen auf das Kühlwasser	[%]
L	Luftbedarf	[Nm <sup>3</sup> /kg]
L <sub>min</sub>	minimaler Luftbedarf	[Nm <sup>3</sup> /kg]
λ	Luftüberschuss(zahl), Luftverhältniszahl oder Luftzahl	[-]
m <sub>BS</sub>	Masse des Brennstoffes	[kg]
m <sub>K</sub>	Masse des Kondensats	[kg]
m <sub>K</sub>	Masse des Kondensats	[kg/kg]

$n$	Gehalt an Stickstoff	[kg/kg]
$o$	Gehalt an Sauerstoff	[kg/kg]
$O_{2min}$	minimaler Sauerstoffbedarf	[kg/kg]
$O_{2min}$	minimaler Sauerstoffbedarf	[Nm <sup>3</sup> /kg]
$Q_A$	Energie, die durch Unverbranntes in der Asche aus dem System geht	[kJ]
$Q_{BS}$	Energiemenge, die mit dem Brennstoff in das System geht	[kJ]
$Q_{BS}$	Wärmemengenstrom, der mit dem Brennstoff in das System gelangt	[kJ/s]
$Q_{CO}$	Energie, die durch unverbranntes Kohlenmonoxid aus dem System geht	[kJ]
$Q_{CO}$	Anteil der Energiemenge, die durch unverbranntes CO aus dem System geht	[%]
$Q_{C_xH_y}$	Energie, die durch unverbrannte Kohlenwasserstoffe aus dem System geht	[kJ]
$Q_K$	Wärmemengenstrom, der mit dem Kondensat aus dem System entweicht	[kJ/s]
$Q_{L,ein}$	Wärmemenge, die mit der Verbrennungsluft in das System geht	[kJ]
$Q_{L-RG}$	„Wärmegewinn“ dadurch, dass die Umgebungsluft (= Verbrennungsluft) kälter ist als die Rauchgase nach dem Kondensator (bezogen auf den Heizwert)	[%]
$Q_{RG,aus}$	Wärmemenge, die mit dem Rauchgas aus dem System geht	[kJ]
$Q_S$	Wärmemenge, die durch Abstrahlung aus dem System geht	[kJ]
$Q_S$	Anteil der Wärmemenge, die durch Abstrahlung nach außen geht	[%]
$Q_W$	Wärmemengenstrom, der auf das Kühlwasser übergeht	[kJ/s]
$Q_{W,aus}$	Wärmemenge, die mit dem Kühlwasser aus dem System geht	[kJ]
$Q_{W,aus}$	Wärmemengenstrom, der mit dem Kühlwasser aus dem System (Kessel + Kondensator) gefördert wird	[kJ/s]
$Q_{W,ein}$	Wärmemenge, die mit dem Kühlwasser in das System geht	[kJ]
$Q_{W,ein}$	Wärmemengenstrom, der mit dem Kühlwasser in das System (Kessel + Kondensator) gefördert wird	[kJ/s]
$Q_x$	Wärmemenge, die mit der Luftfeuchtigkeit in das System geht (Kondensationswärme)	[kJ]
$Q_x$	Wärmeabgabe einer Teilfläche	[kW]
$\Sigma Q_{aus}$	Summe der aus dem System ausgebrachten Energiemengen	[kJ]
$\Sigma Q_{ein}$	Summe der in das System eingebrachten Energiemengen	[kJ]

---

$r$	Verdampfungsenthalpie des Wassers = 2.500 kJ/kg	[kJ/kg]
$\rho_L$	Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_W$	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{W,aus}$	Dichte des Wassers beim Austritt aus dem Kessel	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{W,ein}$	Dichte des Wassers beim Eintritt in den Kondensator	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{WD}$	Dichte des Wasserdampfes	[kg/Nm <sup>3</sup> ]
$s$	Gehalt an Schwefel	[kg/kg]
$t$	Auswertungszeitraum	[s]
$T_L$	Temperatur der Umgebungsluft (= Verbrennungsluft)	[K]
$T_m$	mittlere Oberflächentemperatur der Teilfläche	[°C]
$T_{RG}$	Rauchgastemperatur nach dem Kondensator	[K]
$T_{W,aus}$	Temperatur des Kühlwassers beim Austritt aus dem Kessel	[K]
$T_{W,ein}$	Temperatur des Kühlwassers beim Eintritt in den Kondensator	[K]
$\Delta T_W$	Differenz der Temperaturen des Kühlwassers beim Austritt aus dem Kessel und beim Eintritt in den Kessel	[K]
$V_f$	feuchte Rauchgasmenge	[Nm <sup>3</sup> /kg]
$V_{f,min}$	minimale feuchte Rauchgasmenge	[Nm <sup>3</sup> /kg]
$V_{tr}$	trockene Rauchgasmenge	[Nm <sup>3</sup> /kg]
$V_{tr,min}$	minimale trockene Rauchgasmenge	[Nm <sup>3</sup> /kg]
$\dot{V}_W$	Volumenstrom des Kühlwassers	[m <sup>3</sup> /s]
$w$	Gehalt an Wasser	[kg/kg]
$W$	Wasserdampfmenge im Rauchgas	[Nm <sup>3</sup> /kg]
$W'$	Wasserdampfmenge im Rauchgas	[Nm <sup>3</sup> /kg]
$x$	Luftfeuchtigkeit	[%]

## 9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Bundesweites Abfallaufkommen (Primär- und Sekundärabfälle).....	12
Abbildung 3-2: Entwicklung des Abfallaufkommens .....	15
Abbildung 3-3: Verwertungs- u. Beseitigungsanteile 2004 (100 % ~ 54 Mio. Tonnen). 15	
Abbildung 3-4: Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen im Jahr 2004, Teilfraktionen .....	17
Abbildung 3-5: Stofffluss von Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen, 2004.....	20
Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7: Verwertung und Beseitigung von Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen 1989 – 2004.....	21
Abbildung 3-8: Zusammensetzung des Restmülls im Jahr 2004 .....	22
Abbildung 3-9: Beseitigungsanteile von Restmüll 2004 (100 % ~ 1,38 Mio. Tonnen)...	23
Abbildung 3-10: Thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle) .....	26
Abbildung 3-11: Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle in Betrieb bzw. im Bau.....	27
Abbildung 3-12: Abgelagerte Massen 1998 – 2004 (Datenstand April 2006).....	30
Abbildung 3-13: Massenabfall- und Reststoffdeponien 2006.....	31
Abbildung 6-1: Gesamtanlage.....	41
Abbildung 6-2 und die folgenden Abbildungen 6-3, 6-4 und 6-5: Feststoffkessel EKH 30 der Firma EDER.....	42
Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7: Rauchgaskondensator .....	45
Abbildung 6-8: Kondensatsammelbehälter.....	46
Abbildung 6-9: CO <sub>2</sub> /CO- und O <sub>2</sub> -Messgerät .....	47
Abbildung 6-10: „Messturm“ .....	47
Abbildung 6-11: Messstellen für die Rauchgastemperaturen.....	49
Abbildung 6-12: Messstellen für die Oberflächen-Thermoelemente an der Fülltüre des Kessels .....	50

---

Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14: Messdatenerfassung.....	51
Abbildung 6-15: Verlauf der 4 gemessenen Kühlwassertemperaturen beim Versuch am 02.08.2005 .....	67
Abbildung 6-16: Verlauf der gemessenen Kühlwasser- und Rauchgastemperaturen (jeweils 4) beim Versuch am 02.08.2005 .....	69
Abbildung 6-17: Dokumentation des Rauchgasaustrittes an der Fülltüre des Kessels ...	75
Abbildung 6-18: Abbrandkurve des Versuchs vom 02.08.2005.....	77
Abbildung 10-1: Abbrandkurve zum Versuch vom 23.03.2005 .....	99
Abbildung 10-2: Abbrandkurve zum Versuch vom 24.03.2005 .....	100
Abbildung 10-3: Abbrandkurve zum Versuch vom 31.03.2005 .....	100
Abbildung 10-4: Abbrandkurve zum Versuch vom 01.04.2005 .....	101
Abbildung 10-5: Abbrandkurve zum Versuch vom 13.04.2005 .....	101
Abbildung 10-6: Abbrandkurve zum Versuch vom 15.04.2005 .....	102
Abbildung 10-7: Abbrandkurve zum Versuch vom 18.04.2005 .....	102
Abbildung 10-8: Abbrandkurve zum Versuch vom 31.05.2007 .....	103
Abbildung 10-9: Abbrandkurve zum Versuch vom 13.06.2005 .....	103
Abbildung 10-10: Abbrandkurve zum Versuch vom 14.06.2005 .....	104
Abbildung 10-11: Abbrandkurve zum Versuch vom 26.07.2005 .....	105
Abbildung 10-12: Abbrandkurve zum Versuch vom 03.08.2005 .....	105
Abbildung 10-13: Abbrandkurve zum Versuch vom 04.08.2005 .....	106
Abbildung 10-14: Abbrandkurve zum Versuch vom 18.07.2005 .....	107
Abbildung 10-15: Abbrandkurve zum Versuch vom 20.07.2005 .....	107
Abbildung 10-16: Abbrandkurve zum Versuch vom 21.07.2005 .....	108
Abbildung 10-17: Abbrandkurve zum Versuch vom 22.07.2005 .....	109
Abbildung 10-18: Abbrandkurve zum Versuch vom 02.08.2007 .....	109
Abbildung 11-1: Paramagnetisches Messprinzip.....	110

Abbildung 11-2: Messprinzip der IR-Messung .....	111
Abbildung 11-3: Aufbau von Thermoelementen .....	113
Abbildung 11-4: Systembild Pt-100 mit Anschlusskopf .....	115
Abbildung 11-5: Genauigkeitsklassen von Widerstandthermometern.....	115

### **9.3 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1: Jährliches bundesweites Abfallaufkommen 2004 für ausgewählte Abfallgruppen (Primär- und Sekundärabfälle).....	13
Tabelle 3-2: Abfallbehandlungsanlagen in Österreich (Datenstand April 2006) .....	16
Tabelle 3-3: Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen - Aufkommen nach Hauptfraktionen im Vergleich der Jahre 1999 und 2004.....	18
Tabelle 3-4: Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen Verwertung und Beseitigung im Vergleich der Jahre 1999 und 2004 (Erster Behandlungsschritt nach Splitting).....	19
Tabelle 3-5: Thermische Behandlungsanlagen (ohne Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle) (Datenstand April 2006) .....	25
Tabelle 3-6: Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen in Betrieben (Datenstand April 2006).....	27
Tabelle 3-7: Wesentliche deponierte Massen nach Abfallart im Jahr 2004 (Datenstand April 2006).....	30
Tabelle 3-8: Deponiebetriebermeldungen 2004 nach Deponietypen gemäß Deponieverordnung (Datenstand April 2006) .....	31
Tabelle 5-1: Verbrennungsgleichungen .....	36
Tabelle 6-1: Überblick über die (online) gemessenen Parameter .....	52
Tabelle 6-2: Überblick über die (offline) gemessenen Parameter .....	52

---

Tabelle 6-3: Gegenüberstellung verschiedener Auswertungszeiträume am Beispiel des Versuchs vom 02.08.2005.....	68
Tabellen 6-4: Überblick über die Vorversuche.....	71
Tabelle 6-5: Eckdaten der Versuche mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme (mit 13 Oberflächen-Thermoelementen).....	73
Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7: Gegenüberstellung der Oberflächentemperaturen der Fülltüre des Kessels bei den 3 Versuchen mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme mit 13 Oberflächen-Thermoelementen und bei den Versuchen, die zur Endauswertung herangezogen wurden.....	74
Tabelle 6-8: Eckdaten der 3 Versuche mit zu geringem Unterdruck im Abzug .....	76
Tabelle 6-9: Eckdaten der 5 Versuche, die zur Endauswertung herangezogen wurden.	78
Tabelle 10-1: Überblick über die Vorversuche (Teil 1).....	94
Tabelle 10-2: Überblick über die Vorversuche (Teil 2).....	95
Tabelle 10-3: Eckdaten der Versuche mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme (mit 13 Oberflächen-Thermoelementen).....	96
Tabelle 10-4: Eckdaten der 3 Versuche mit zu geringem Unterdruck im Abzug.....	97
Tabelle 10-5: Eckdaten der 5 Versuche, die zur Endauswertung herangezogen wurden	98

## 10 ANHANG B

### 10.1 Eckdaten der durchgeführten Versuche

#### 10.1.1 Vorversuche

Datum		23.03.	24.03.	31.03.	01.04.	
Wirkungsgrad (Kühlwasser)		99	97	84	87	%
Rauchgas nach Kessel	Ø	103	111	73	95	°C
	max.	281	327	110	267	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	13	13	13	13	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	16	16	14	15	°C
	max.	23	21	16	19	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	23	24	20	22	°C
	max.	42	41	28	42	°C
Raumtemp.	Ø	20	20	20	20	°C
O <sub>2</sub>	Ø	18,3	17,5	17,6	16,5	vol%
CO	Ø	1601	1573	2621	3344	ppm
	max.	4467	4222	5217	5410	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	2,4	2,8	3,1	2,5	vol%
	max.	10,4	11,6	6,8	13,8	vol%
CxHy	Ø	78	124	248	- - -	ppm
	max.	309	1083	1031	- - -	ppm
λ	Ø	8,4	7,1	6,5	8,0	
Brennstoff		5,1	5,6	5,0	6,1	kg
		11080	12440	9710	12050	W
Versuchsdauer (Auswertung)		2,3	2,2	2,5	2,5	h
Wassermenge		921	940	917	931	l/h
Kondensat		1,6	1,8	0,9	1,5	kg
		480	560	240	420	W
Asche		0,07	0,06	0,05	0,08	kg

Tabelle 10-1: Überblick über die Vorversuche (Teil 1)

Datum		<b>13.04.</b>	<b>15.04.</b>	<b>18.04.</b>	
Wirkungsgrad (Kühlwasser)		88	85	89	%
Rauchgas nach Kessel	Ø	84	53	68	°C
	max.	299	203	155	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	13	13	13	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	15	15	15	°C
	max.	24	19	19	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	25	20	23	°C
	max.	57	43	41	°C
Raumtemp.	Ø	20	21	21	°C
O <sub>2</sub>	Ø	17,3	18,7	19,5	vol%
CO	Ø	1888	1014	838	ppm
	max.	5032	2173	2182	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	2,1	1,8	1,2	vol%
	max.	9,1	11,6	6,3	vol%
CxHy	Ø	129	141	145	ppm
	max.	976	1025	1108	ppm
λ	Ø	9,7	11,0	17,5	
Brennstoff		5,3	4,4	5,3	kg
		9500	5580	8110	W
Versuchsdauer (Auswertung)		2,8	4,0	3,3	h
Wassermenge		596	597	597	l/h
Kondensat		1,6	1,6	1,4	kg
		390	280	300	W
Asche		0,07	0,09	0,08	kg

Tabelle 10-2: Überblick über die Vorversuche (Teil 2)

**10.1.1.1 Versuche mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme**

Datum		<b>31.05.</b>	<b>13.06.</b>	<b>14.06.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		80	73	68	%
Kondensat- bzw. Pyrolyseölaustritt *		~ 120	~ 60	~ 170	g
Rauchgas nach Kessel	Ø	51	50	58	°C
	max.	91	144	129	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	14	13	13	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	17	16	17	°C
	max.	20	21	22	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	29	27	29	°C
	max.	43	45	45	°C
Raumtemp.	Ø	25	23	24	°C
ΔT ( Raumtemp. – Kond. aus )	Ø	9	8	8	°C
O <sub>2</sub>	Ø	18,9	18,7	18,5	vol%
CO	Ø	1130	1032	1194	ppm
	max.	1897	1859	1862	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	1,7	1,8	2,0	vol%
	max.	4,1	6,1	4,9	vol%
CxHy	Ø	203	190	- - -	ppm
	max.	1911	1275	- - -	ppm
λ	Ø	11,6	11,4	10,2	
Temp. am Deckel (links-mittig) **	Ø	50	42	47	°C
	max.	70	53	56	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben) **	Ø	70	69	71	°C
	max.	91	92	94	°C
Temp. am Deckelrand oben **	Ø	46	41	43	°C
	max.	65	58	56	°C
Brennstoff		6,4	4,1	9,8	kg
		5360	8750	10810	W
Versuchsdauer (Auswertung)		3,7	2,4	4,5	h
Wassermenge		367	395	388	l/h
Kondensat		1,9	1,1	3,0	kg
		350	330	460	W
Asche		0,08	0,08	0,15	kg
Asche theort.		0,07	0,04	0,10	kg

\* Die hier angeführte Menge an Pyrolyseöl / Kondensat versteht sich als diejenige Menge, die am Kesselboden ausgetreten ist, dort aufgefangen und anschließend gewogen werden konnte. Ob und wie viel Pyrolyseöl / Kondensat noch zusätzlich im Kessel entstanden sein könnte, lässt sich nicht abschätzen.

\*\* Hier handelt es sich um Mittelwerte aus den 13 Einzelwerten, die an der Fülltüre = „Deckel“ des Kessels gemessen wurden.

Tabelle 10-3: Eckdaten der Versuche mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme (mit 13 Oberflächen-Thermoelementen)

**10.1.2 Versuche**

Datum		<b>26.07.</b>	<b>03.08.</b>	<b>04.08.</b>	
Wirkungsgrad (Wasser)		88	79	81	%
Unterdruck anfangs		7,5	9	4,5	Pa
Rauchgas nach Kessel	Ø	130	89	85	°C
	max.	362	219	259	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	13	13	14	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	16	17	21	°C
	max.	25	24	42	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	24	28	49	°C
	max.	49	52	115	°C
Raumtemp.	Ø	26	27	25	°C
ΔT Raumtemp. - Kond. aus	Ø	8	11	8	°C
O <sub>2</sub>	Ø	15,9	17,4	16,0	vol%
CO	Ø	1147	1104	994	ppm
	max.	1897	1855	1877	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	4,0	2,9	4,3	vol%
	max.	16,6	10,9	18,0	vol%
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Ø	---	---	---	ppm
	max.	---	---	---	ppm
λ	Ø	5,0	7,0	4,7	
Temp. am Deckel (links-mittig)	Ø	---	---	46	°C
	max.	---	---	69	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben)	Ø	69	73	61	°C
	max.	99	108	98	°C
Temp. am Deckelrand oben	Ø	49	---	55	°C
	max.	78	---	102	°C
Brennstoff		9,9	10,3	10,4	kg
		17580	11970	9940	W
Versuchsdauer (Auswertung)		2,8	4,3	5,2	h
Wassermenge		1141	522	184	l/h
Kondensat		4,9	4,7	4,3	kg
		1200	760	570	W
Asche		0,115	0,159	0,13	kg
Asche theort.		0,100	0,104	0,105	kg

Tabelle 10-4: Eckdaten der 3 Versuche mit zu geringem Unterdruck im Abzug

**10.1.2.1 Versuche zur „Endauswertung“**

Datum		<b>18.07.</b>	<b>20.07.</b>	<b>21.07.</b>	<b>22.07.</b>	<b>02.08.</b>	
<b>Wirkungsgrad (Wasser)</b>		<b>91,2</b>	<b>93,2</b>	<b>95,6</b>	<b>90,4</b>	<b>90,1</b>	<b>%</b>
Unterdruck (anfangs)		11,5	10	8	11,5	10	Pa
Rauchgas nach Kessel	Ø	90	78	93	75	122	°C
	max.	216	186	259	170	411	°C
H <sub>2</sub> O Kond. ein	Ø	14	14	14	15	13	°C
H <sub>2</sub> O Kond. aus = Kessel ein	Ø	22	23	25	26	18	°C
	max.	36	36	43	40	33	°C
H <sub>2</sub> O Kessel aus	Ø	41	42	52	52	27	°C
	max.	81	84	102	95	71	°C
Raumtemp.	Ø	26	25	25	25	27	°C
ΔT Raumtemp. - Kond. aus	Ø	7	7	5	5	9	°C
O <sub>2</sub>	Ø	18,2	18,6	18,1	18,7	16,8	vol%
CO	Ø	985	865	898	1009	970	ppm
	max.	1847	1831	1811	1837	1800	ppm
CO <sub>2</sub>	Ø	2,3	1,9	2,4	1,8	3,7	vol%
	max.	9,5	7,9	12,8	6,1	17,8	vol%
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	Ø	---	---	---	---	---	ppm
	max.	---	---	---	---	---	ppm
λ	Ø	8,8	10,6	8,4	11,2	5,5	
Temp. am Deckel (links-mittig)	Ø	50	57	54	---	---	°C
	max.	66	83	74	---	---	°C
Temp. am Deckelrand (rechts-oben)	Ø	66	61	63	66	70	°C
	max.	92	89	88	93	101	°C
Temp. am Deckelrand oben	Ø	59	54	62	62	---	°C
	max.	96	92	105	101	---	°C
Brennstoff		5,4	5,4	5,2	5,2	10,1	kg
		10420	7820	8650	7660	15100	W
Versuchsdauer (Auswertung)		2,6	3,5	3,0	3,4	3,3	h
Wassermenge		279	214	174	155	772	l/h
Kondensat		2,4	1,9	2,0	1,9	4,6	kg
		640	380	460	390	950	W
Asche		0,077	0,074	0,079	0,076	0,108	kg
Asche theort.		0,054	0,055	0,052	0,052	0,102	kg

Tabelle 10-5: Eckdaten der 5 Versuche, die zur Endauswertung herangezogen wurden

## 10.2 Abbrandkurven der durchgeführten Versuche

### 10.2.1 Vorversuche

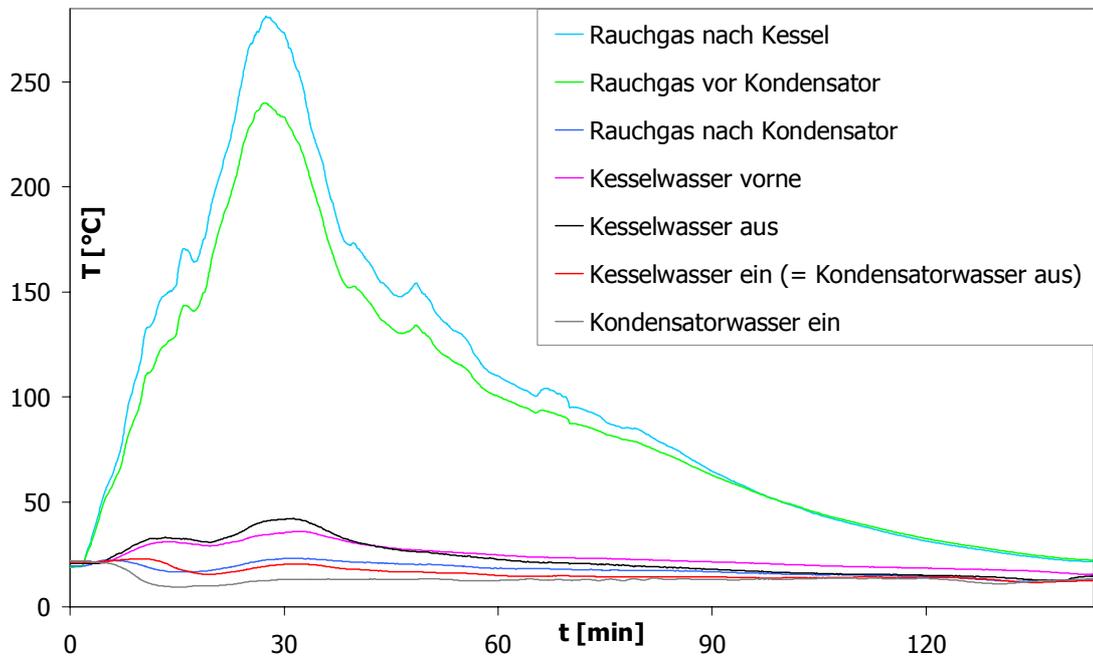


Abbildung 10-1: Abbrandkurve zum Versuch vom 23.03.2005

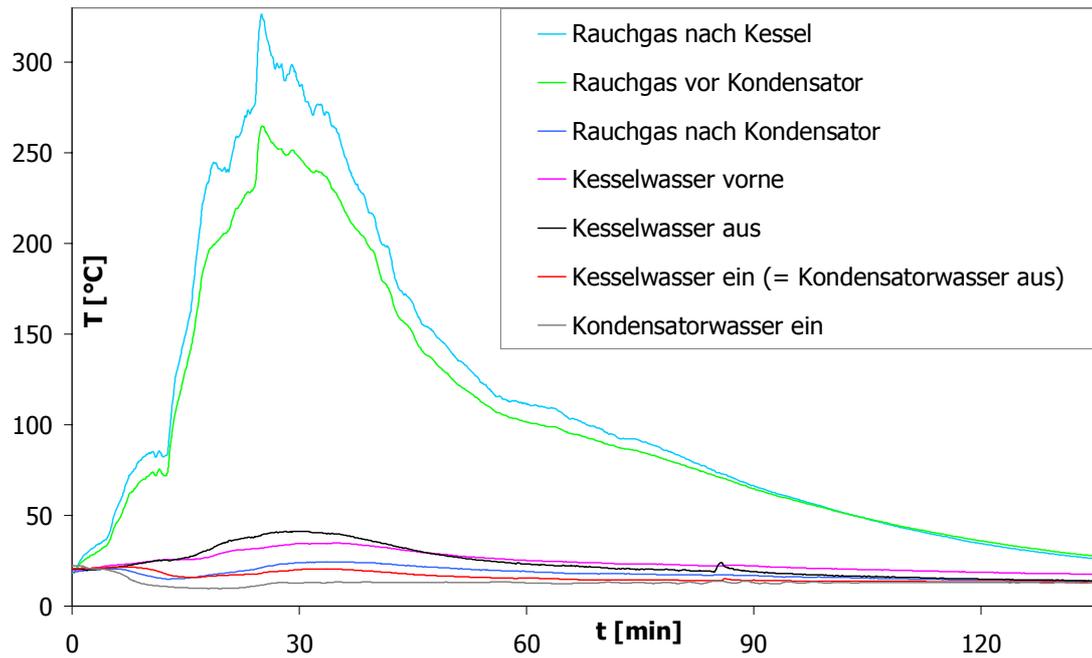


Abbildung 10-2: Abbrandkurve zum Versuch vom 24.03.2005

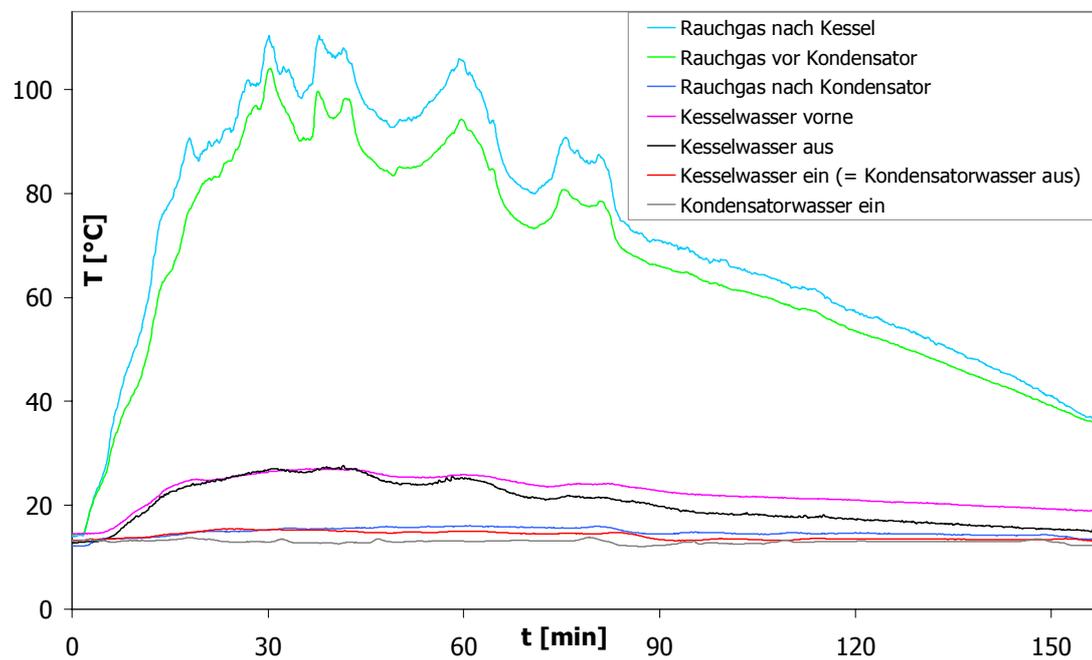


Abbildung 10-3: Abbrandkurve zum Versuch vom 31.03.2005

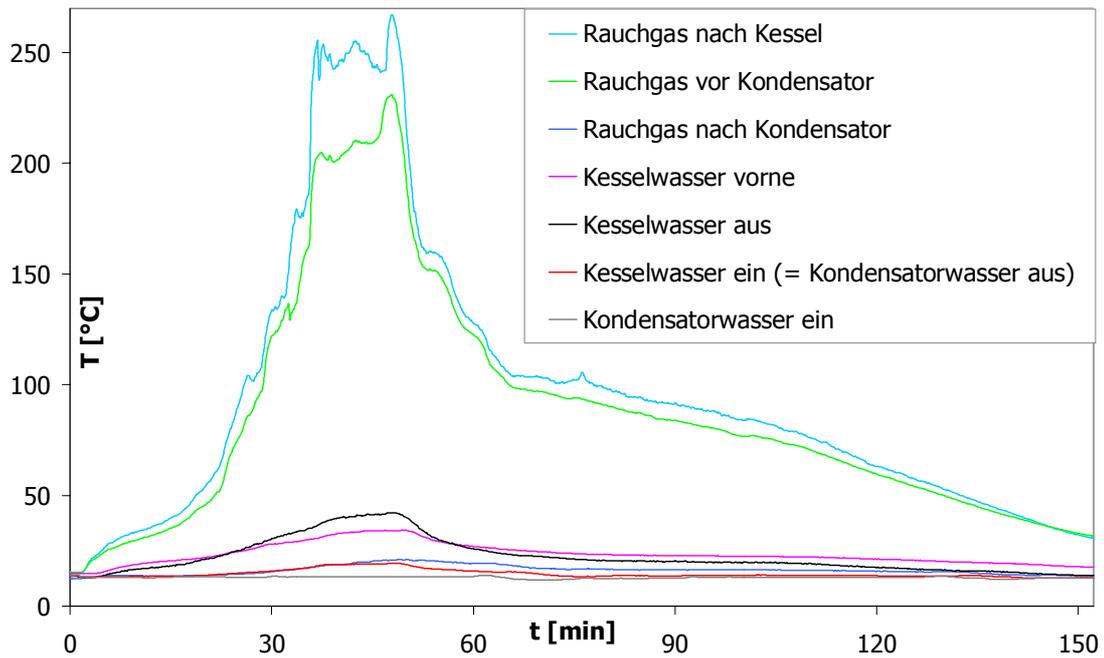


Abbildung 10-4: Abbrandkurve zum Versuch vom 01.04.2005

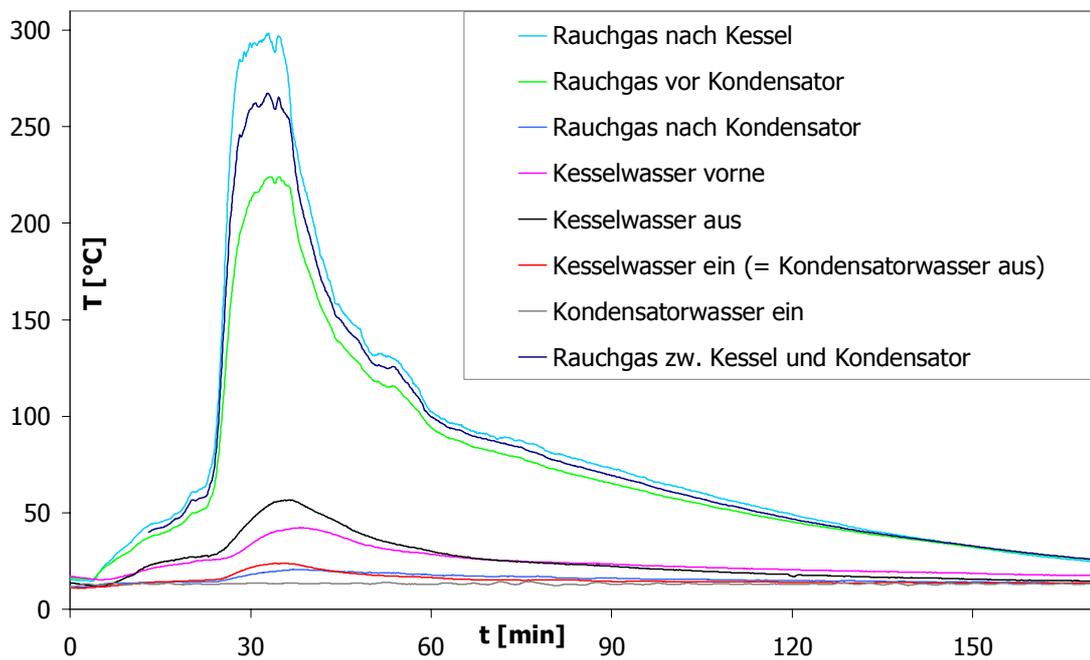


Abbildung 10-5: Abbrandkurve zum Versuch vom 13.04.2005

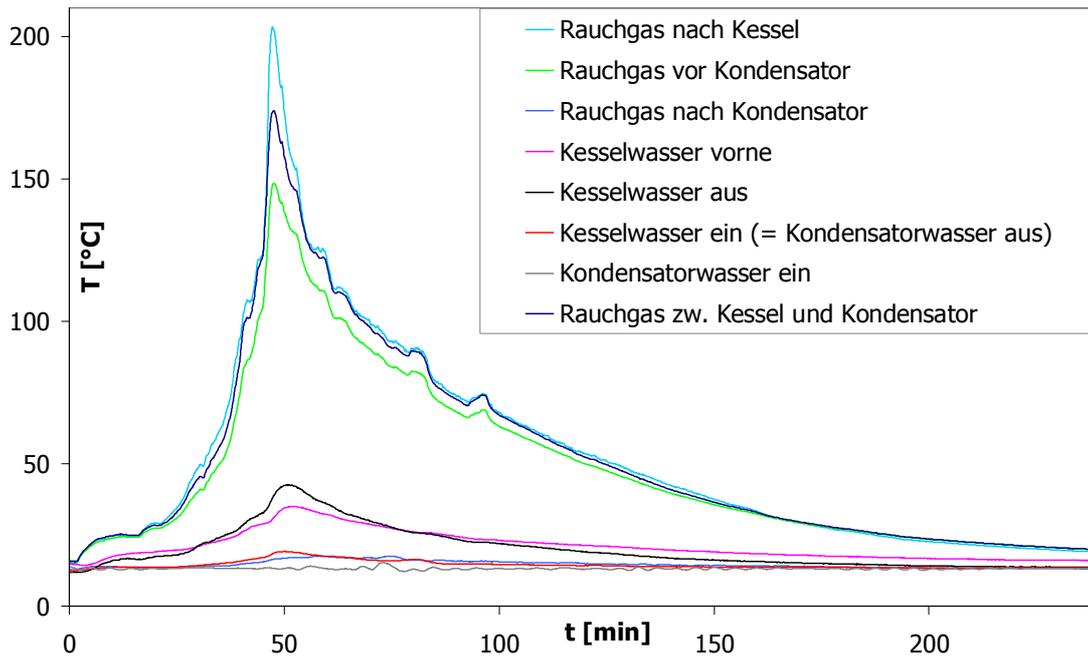


Abbildung 10-6: Abbrandkurve zum Versuch vom 15.04.2005

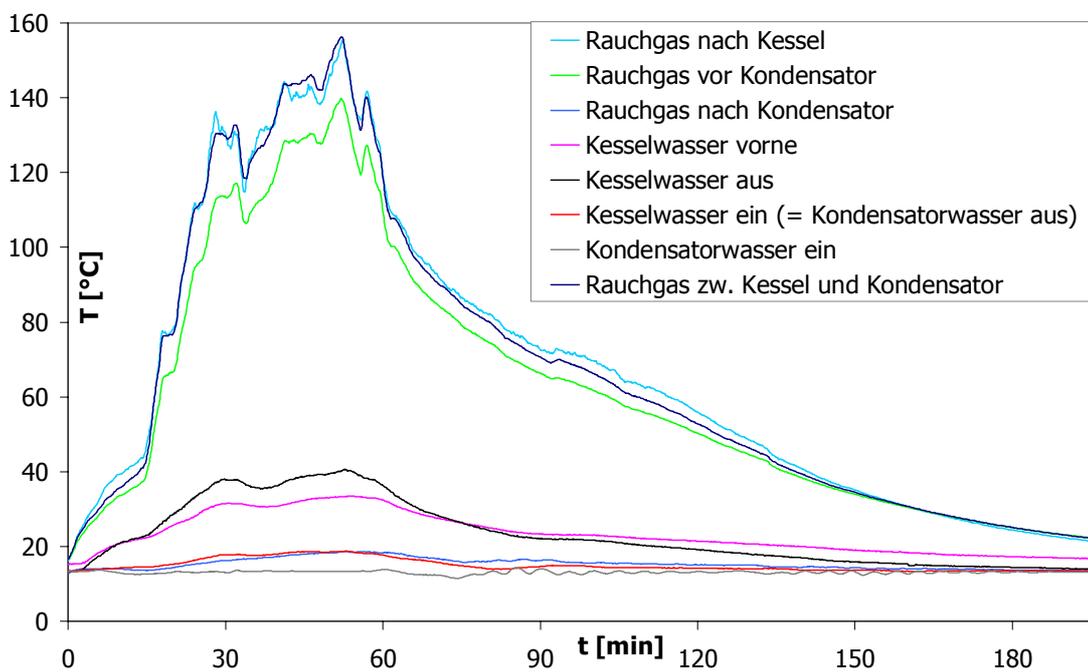


Abbildung 10-7: Abbrandkurve zum Versuch vom 18.04.2005

### 10.2.1.1 Versuche mit zusätzlicher Messung der Abstrahlungswärme

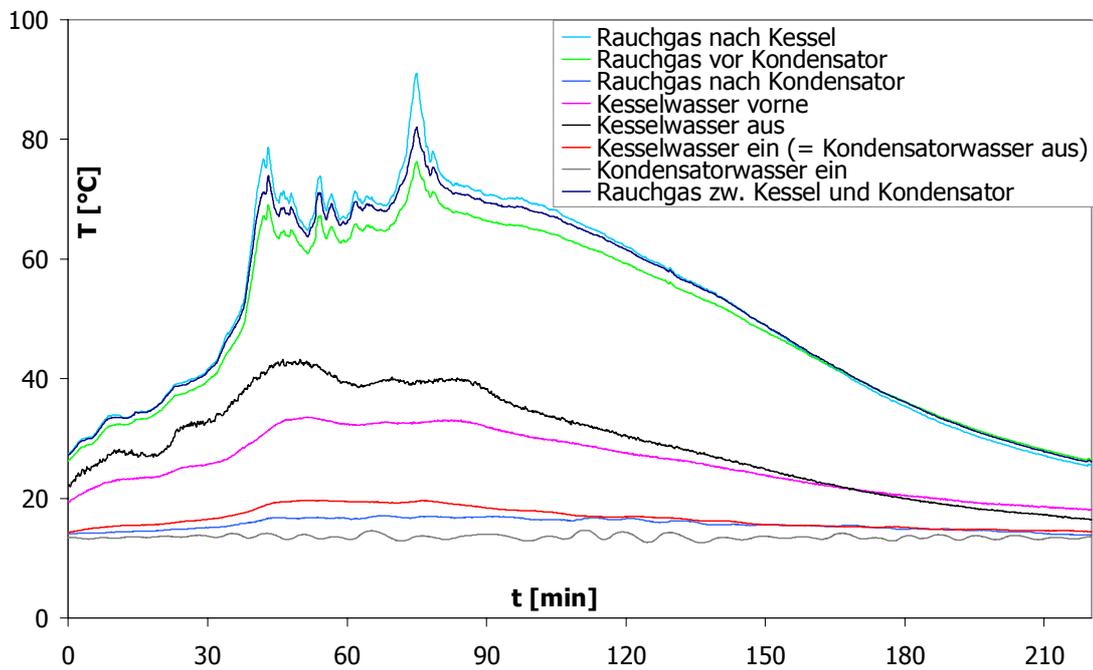


Abbildung 10-8: Abbrandkurve zum Versuch vom 31.05.2007

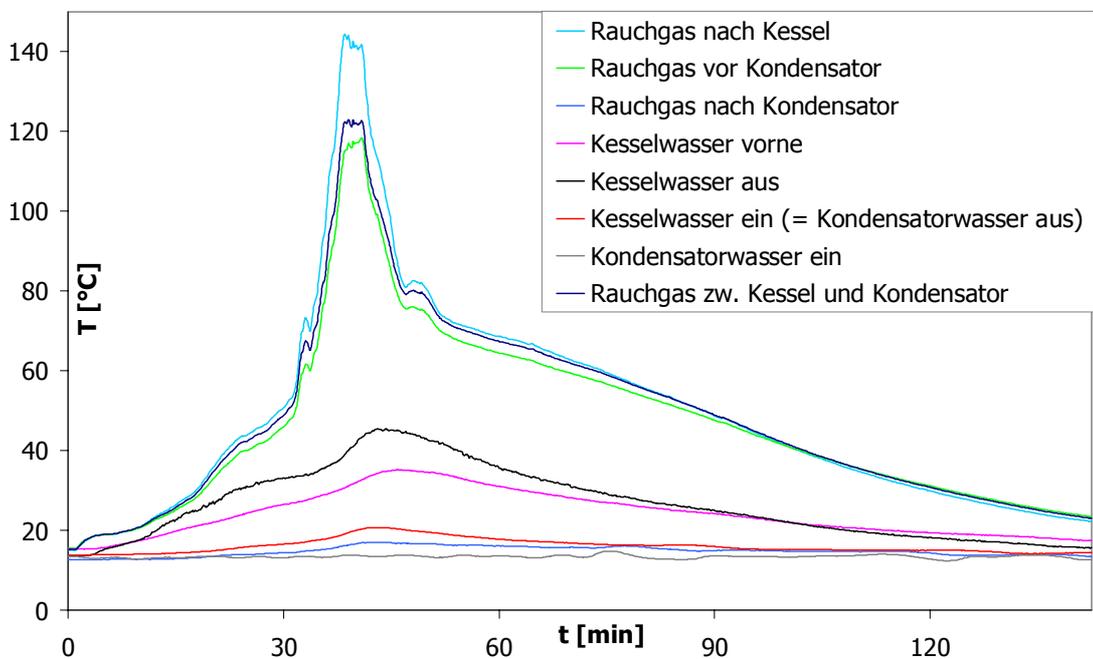


Abbildung 10-9: Abbrandkurve zum Versuch vom 13.06.2005

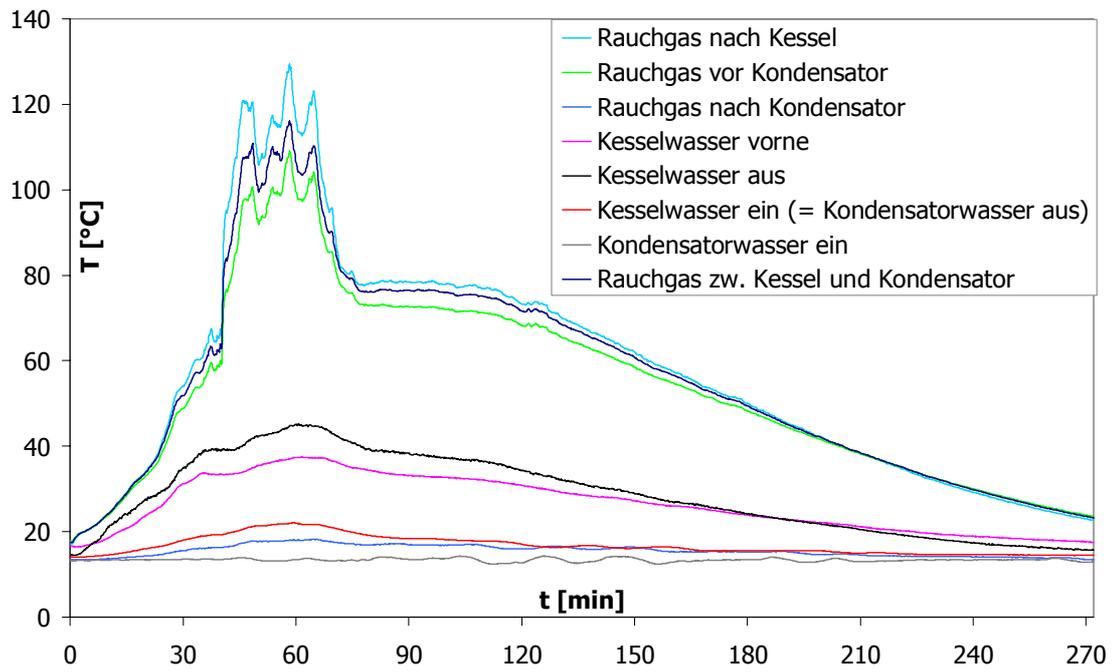


Abbildung 10-10: Abbrandkurve zum Versuch vom 14.06.2005

### 10.2.2 Versuche

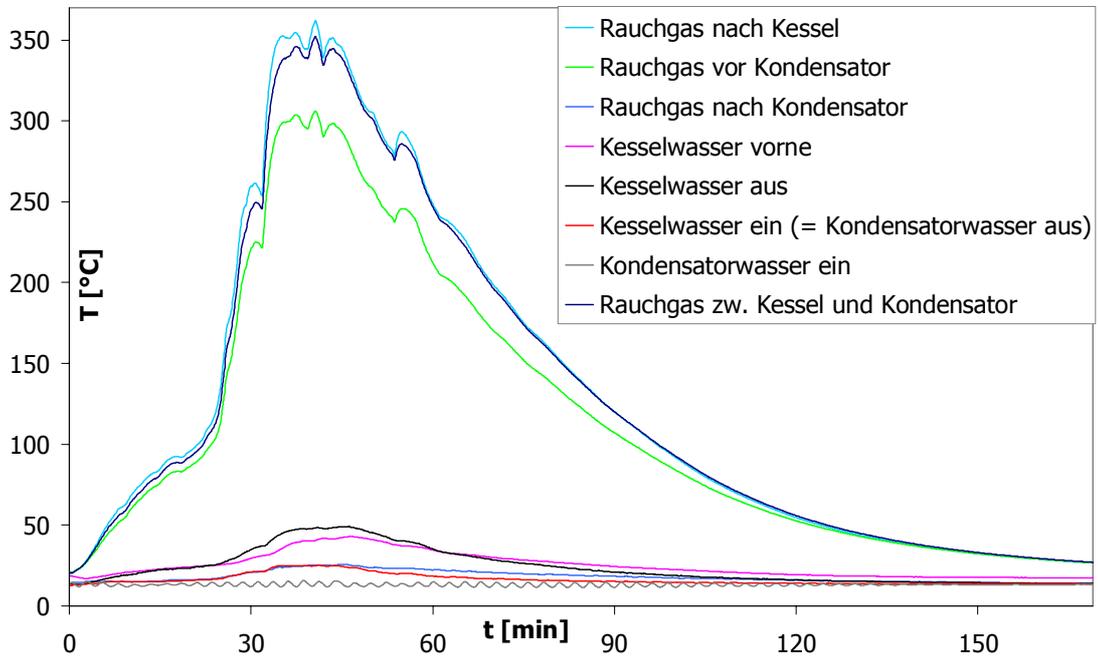


Abbildung 10-11: Abbrandkurve zum Versuch vom 26.07.2005

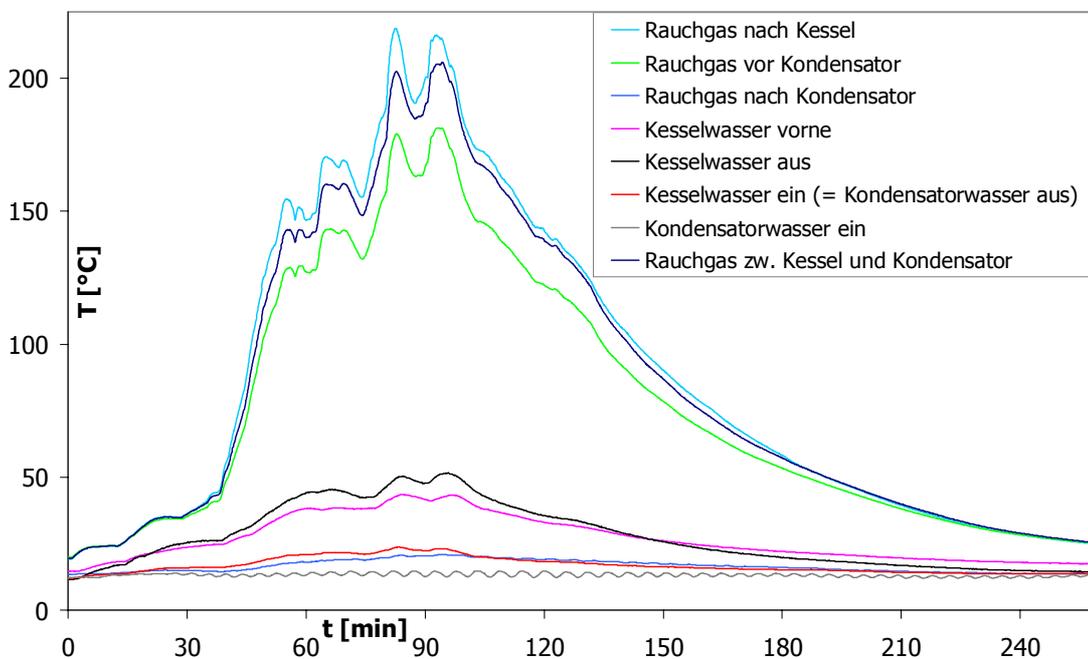


Abbildung 10-12: Abbrandkurve zum Versuch vom 03.08.2005

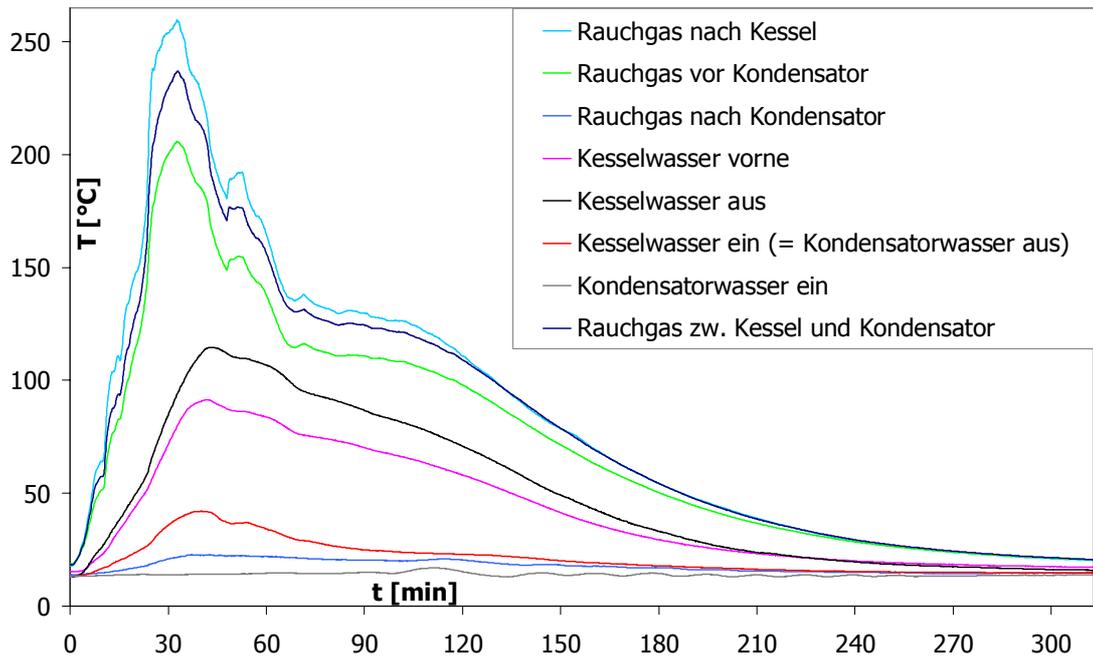


Abbildung 10-13: Abbrandkurve zum Versuch vom 04.08.2005

### 10.2.2.1 Versuche zur „Endauswertung“

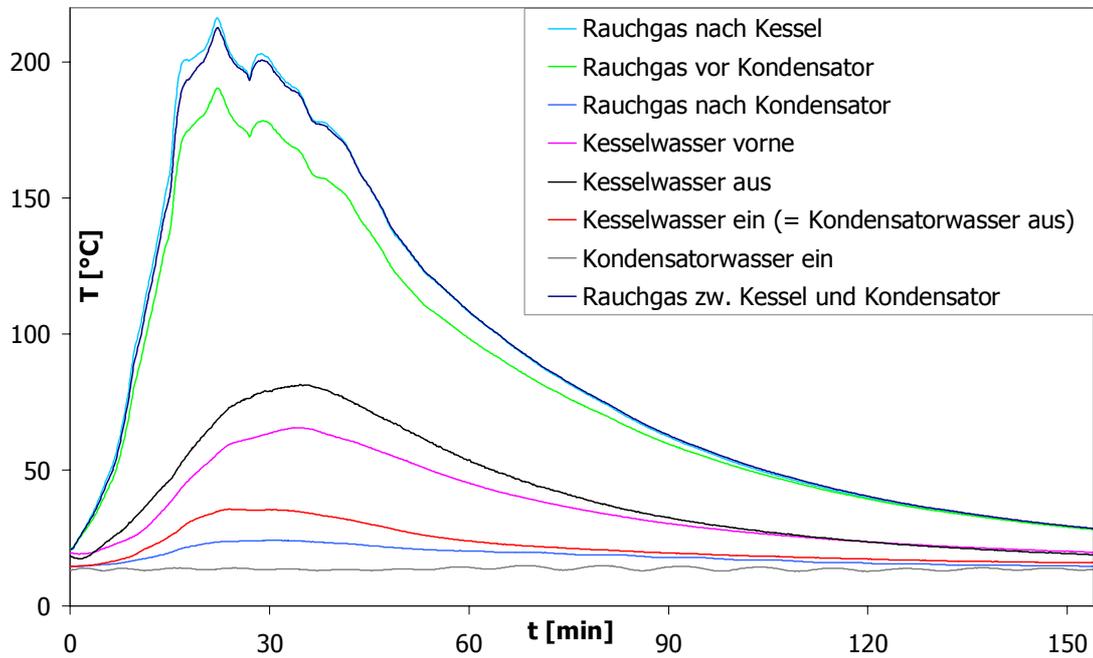


Abbildung 10-14: Abbrandkurve zum Versuch vom 18.07.2005

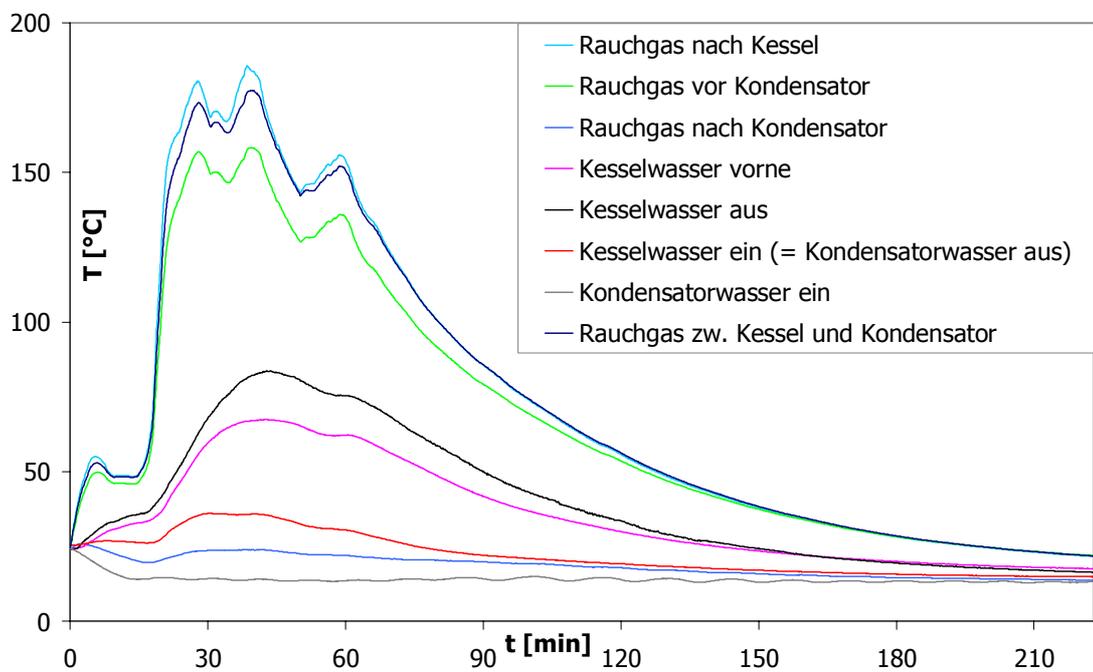


Abbildung 10-15: Abbrandkurve zum Versuch vom 20.07.2005

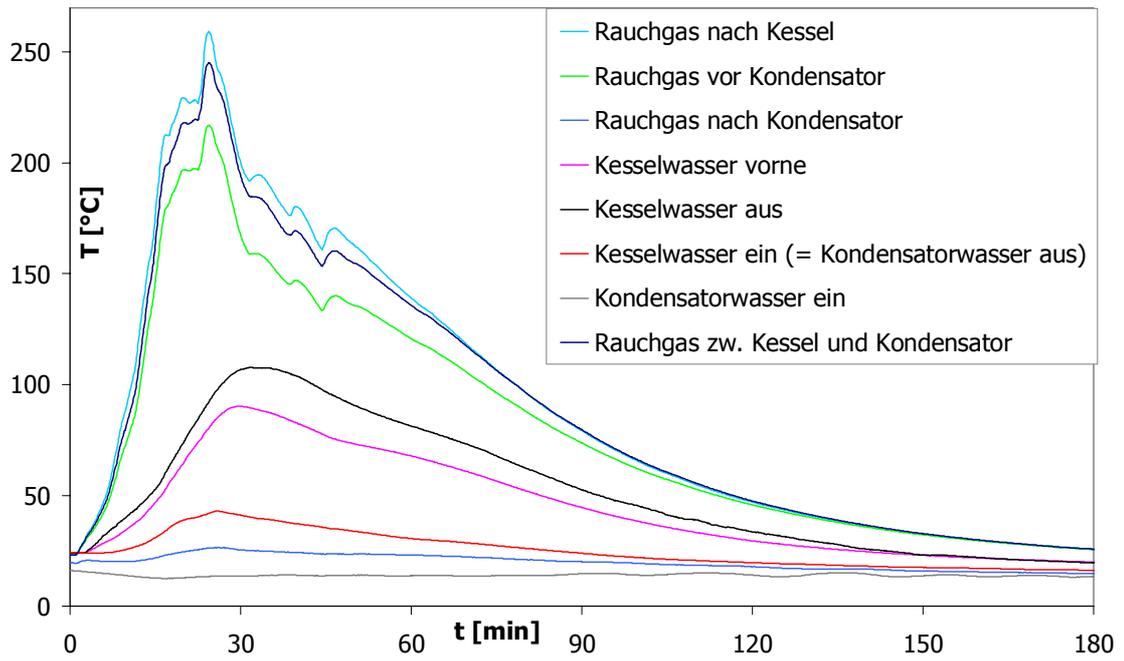


Abbildung 10-16: Abbrandkurve zum Versuch vom 21.07.2005

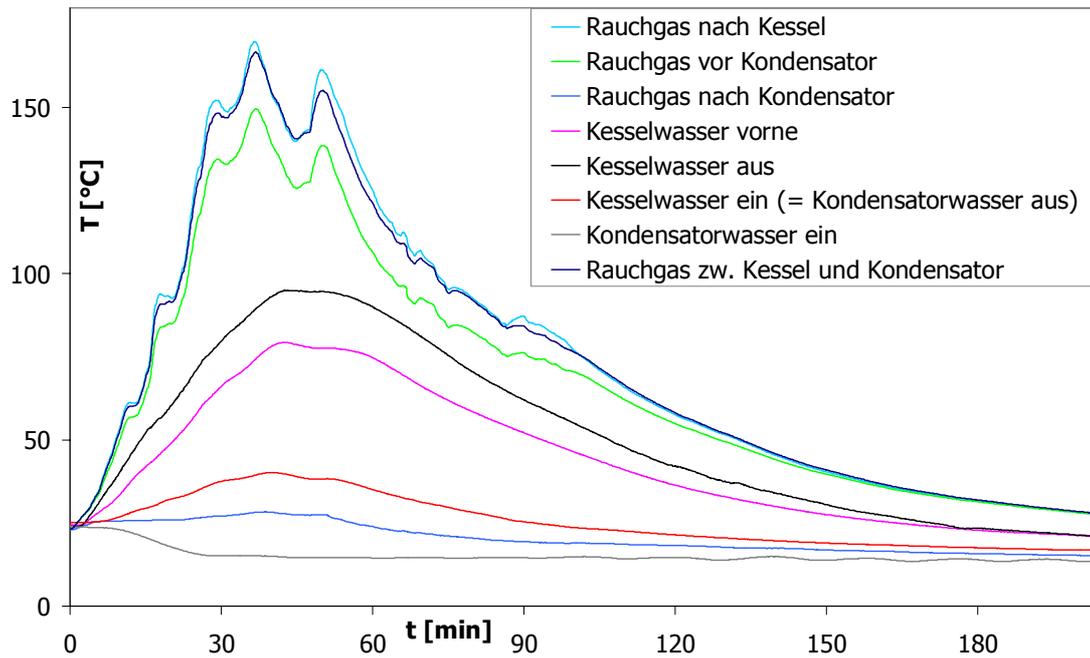


Abbildung 10-17: Abbrandkurve zum Versuch vom 22.07.2005

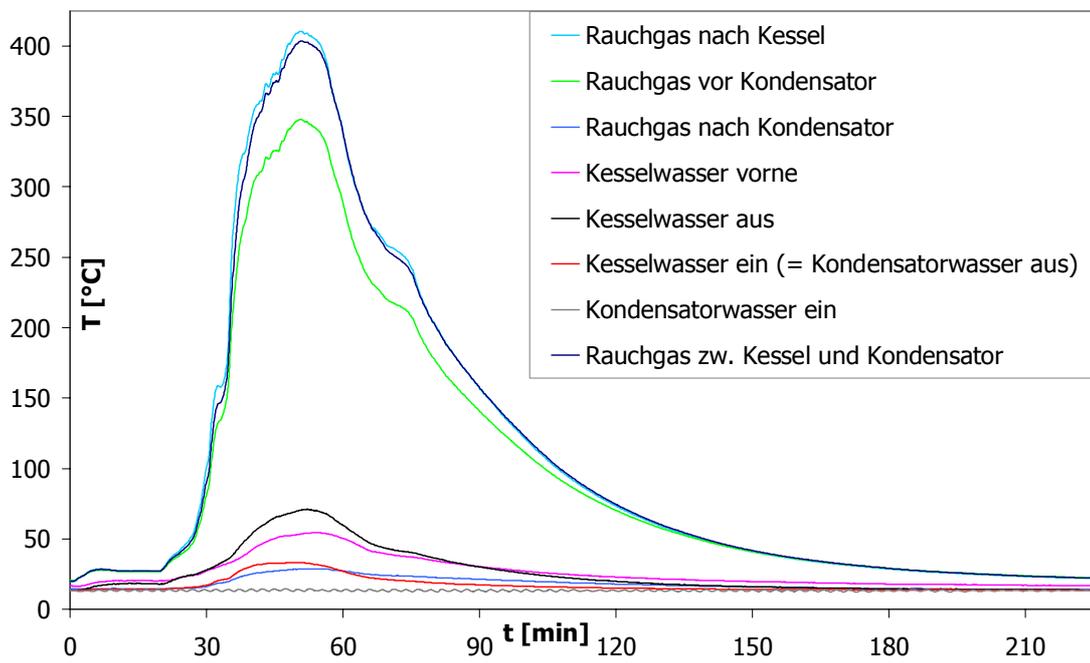


Abbildung 10-18: Abbrandkurve zum Versuch vom 02.08.2007

## 11 ANHANG C

### 11.1 Funktionsweise verschiedener Messgeräte

#### 11.1.1 O<sub>2</sub>-Messung

Messprinzip:

2 mit Stickstoff gefüllte Quarzkugeln (N<sub>2</sub> ist diamagnetisch) sind hantelförmig und im Inneren leicht drehbar angeordnet. Außerhalb der Messzelle erzeugt ein starker Permanentmagnet ein inhomogenes Magnetfeld. Gelangen nun Sauerstoffmoleküle in die Messzelle, wird eine Kraft auf die beiden mit Stickstoff gefüllten Kügelchen ausgeübt und es entsteht ein Drehmoment. Durch Anlegen einer Spannung und den daraus resultierenden Strom entsteht ein Magnetfeld, welches der Drehbewegung entgegenwirkt. Dieser Strom ist ein direktes Maß für die Sauerstoffkonzentration.

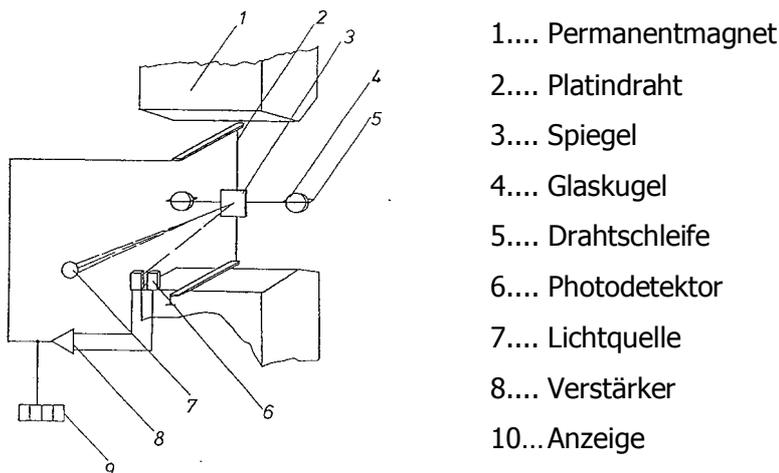


Abbildung 11-1: Paramagnetisches Messprinzip

Hersteller: Fa. Rosemount

Typ: OXYNOS 1C

Messbereich: 0 - 5 Vol%  
 0 - 25 Vol%  
 0 - 50 Vol%  
 0 - 100 Vol%

Genauigkeit: Untere Nachweisgrenze 1 % vom Messbereichsendwert  
 Fehlergrenze 1 % vom Messbereichsendwert

### 11.1.2 CO<sub>2</sub>/CO-Messung

Messprinzip:

Das in einem Strahler erzeugte Infrarotlicht gelangt, in 2 Strahlenbündel gleicher Intensität geteilt, durch die aus einer Vergleichs- und Messseite bestehende Messküvette in den Strahlungsempfänger. Eine vorgeschaltete Modulationsebene lässt die beiden Strahlen alternierend passieren. Der Empfänger ist auf die zu messende Komponente sensibilisiert. Er besteht aus einer Absorptions- und einer Ausgleichskammer, die miteinander verbunden sind. Beide Kammern sind dem IR-Licht ausgesetzt. Durch Änderung der IR-Intensität entsteht eine Temperatur- und somit eine Druckänderung in den Kammern. Als Folge strömt Gas zwischen den beiden Kammern. Ein Strömungsfühler formt sie in elektronische Signale um.

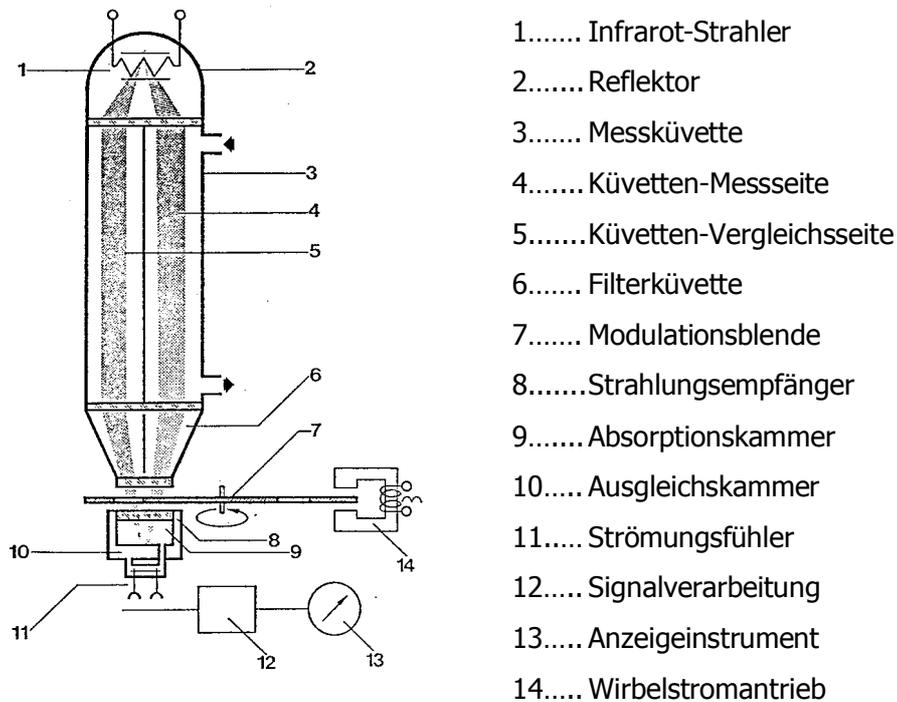


Abbildung 11-2: Messprinzip der IR-Messung

---

Hersteller:	Fa. Leybold-Heraeus
Typ:	BINOS 1.1
Messkomponente:	Kohlendioxid, Kohlenmonoxid
Messbereich:	CO <sub>2</sub> : 0 – 30 % CO: 0 - 2000 ppm
Messgasmenge:	ca. 70 l/h
Genauigkeit:	Untere Nachweisgrenze 1 % vom Messbereichsendwert Fehlergrenze 1 % vom Messbereichsendwert

### **11.1.3 Temperaturmessung**

Ob ein Thermoelement oder ein Widerstandsthermometer als Sensor verwendet wird, bestimmt die gestellte Messaufgabe. Es gibt Temperaturfühler verschiedener Messbereiche, Genauigkeiten, Ansprechzeiten, Verträglichkeit mit dem Messmedium, Bauformen und Abmessungen.

Grundsätzlich kann man sagen, dass Thermoelemente schneller als Pt-100-Widerstandsthermometer die Messstellentemperatur erfassen. Dafür sind mit Pt-100-Widerstandsthermometer in der Regel genauere Messungen möglich.

Es werden hier Thermoelemente für die Rauchgasmessungen, Oberflächen-Thermoelemente für die Abstrahlungswärme am Feststoffkessel und Pt-100-Widerstandsthermometer für die Kühlwassertemperaturen verwendet.

#### **11.1.3.1 Thermoelemente (TE)**

Die Temperaturmessungen für gasförmige Medien – es wurden hier ausschließlich Rauchgastemperaturen gemessen – erfolgten mittels Thermoelementen.

Funktionsweise:

Die Temperaturmessung mit Thermoelementen basiert auf einer Temperatur-Vergleichsmessung zwischen der Messstelle und einer Vergleichsstelle.

Ein Thermoelement besteht aus 2 punktförmig verschweißten Drähten verschiedener Materialien bzw. Metalllegierungen. Erwärmt man diese Messstelle, so entsteht an den freien Enden eine elektrische Thermospannung – die elektromotorische Kraft (EMK).

Diese EMK ist von der Höhe und Richtung des Temperaturgradienten (Verbindungsstelle – freies Ende) sowie von der Differenz der Thermokräfte der beiden Metalle abhängig. Entsteht z. B. bei einem steigenden Temperaturgradienten eine positive EMK, so entsteht bei fallendem eine negative EMK. Die Höhe der resultierenden EMK ist somit von der Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende des Leiters abhängig.

Das Thermopaar besteht aus 2 unterschiedlichen metallischen Leitern mit möglichst stark unterschiedlicher Thermokraft (unterschiedliche Seebeck-Koeffizienten) – den sog. Thermoschenkeln, die an der Messstelle miteinander verbunden sind.

Die Ausgleichsleitungen bilden die Verlängerung des Thermopaars. Sie verbinden die freien Enden des Thermopaars mit der Vergleichsstelle (Zone bekannter und konstanter Temperatur). Ausgleichsleitungen besitzen bis zu einer Temperatur von 200°C die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften wie das Thermoelement selbst, sodass keine zusätzliche Spannung erzeugt wird.

Aus der Vielzahl der möglichen Thermopaare sind nur einige Materialkombinationen für die Herstellung von Thermoelementen für die Mess- und Regeltechnik geeignet.

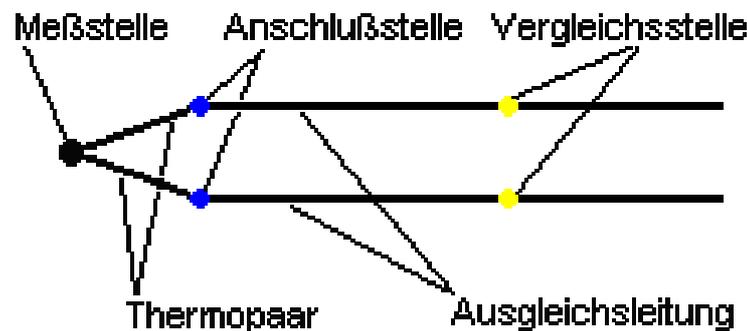


Abbildung 11-3: Aufbau von Thermoelementen

Die gebräuchlichsten Thermoelementtypen sind in der EN 60 584 und in der DIN 43 710 festgelegt, das am weitesten verbreitete Thermoelement ist das hier verwendete NiCr-Ni (Typ K). „Typ K“ bedeutet einen Arbeitsbereich von -200 – 1260 °C und eine gute Beständigkeit gegenüber oxidierender Umgebung, nicht geeignet für reduzierende Umgebungen wie z. B. Schwefel, Cyanid, Kohlenstoff und Nässe und die Grenzabweichung beträgt je nach Toleranzklasse (1 – 3) 1,5 – 2,5 °C.

Im konkreten Fall handelt sich um Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 2,5 mm, die biegsam, erschütterungsfest und für Temperaturen bis max. 1300 °C einsetzbar sind.

### **11.1.3.2 Widerstandsthermometer (Pt-100)**

Für die Temperaturmessung in flüssigen Medien – es handelt sich hier ausschließlich um Kühlwassertemperaturen (im Feststoffkessel und Kondensator) – wurden Pt-100-Widerstandsthermometer mit Messumformer und Anschlusskopf verwendet.

Funktionsweise:

Die Temperaturmessung mit Metall-Widerstandsthermometern beruht auf der temperaturabhängigen Widerstandsänderung von Metallen und Halbleitern – der Ohmsche Widerstand eines metallischen Leiters erhöht sich in bekannter Gesetzmäßigkeit mit der Temperatur. Da Metallfühler (Pt-100) besitzen einen positiven Temperaturkoeffizienten, steigt der elektrische Widerstand von Metallen bei höheren Temperaturen. Der Messwiderstand wird mit einem konstanten Strom gespeist und der Spannungsabfall am Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen.

Als Kennwert für die Widerstandsänderung wird die relative Änderung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur definiert und als Temperaturbeiwert bezeichnet. Dieser Temperaturbeiwert ist als Mittelwert zwischen 0 und 100 °C angegeben. Werkstoffe mit einem hohen Temperaturbeiwert und großem spezifischen Widerstand eignen sich am besten für Widerstandsthermometer. Platin und Nickel erfüllen diese Anforderungen, ihr Widerstand ist gut reproduzierbar. Durch künstliche Alterung wird eine hohe Langzeitstabilität erreicht. Durch den hohen spezifischen Widerstand von Platin und Nickel ist es möglich, den Widerstandsdraht auf kleinstem Raum aufzubringen.

Um eine Austauschbarkeit zu gewährleisten, wurden in der DIN EN60751 bzw. IEC 751 je eine Grundwertreihe (Widerstand-Temperatur-Tabelle) für Platin- und in der DIN 43760 für Nickel-Messwiderstände genormt. In diesen Normen sind außerdem die zulässigen Toleranzen der Widerstandswerte und damit die zulässigen Abweichungen von der Soll-Temperatur definiert.

Allgemein zeichnen sich Widerstandsthermometer dadurch aus, dass man in einem Temperaturbereich von -220 bis 850°C sehr hohe Messgenauigkeiten (bis 0,001 K) erzielen kann.

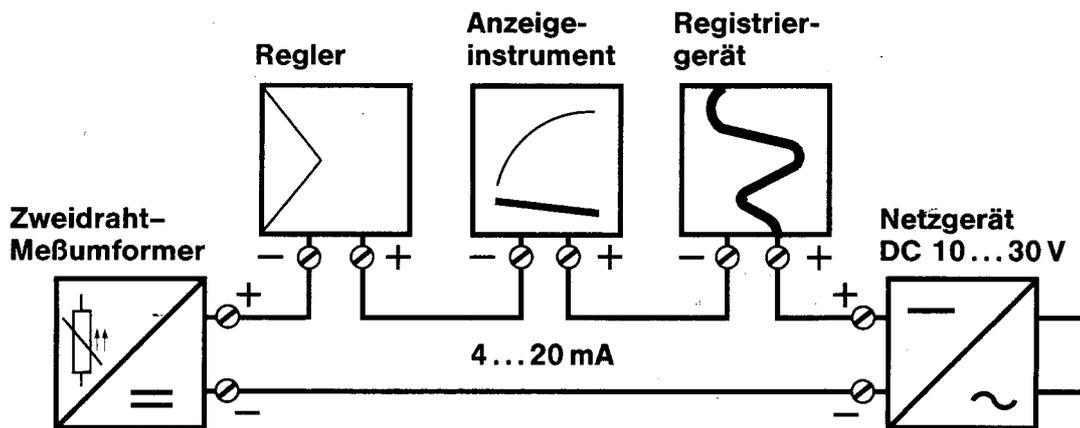


Abbildung 11-4: Systembild Pt-100 mit Anschlusskopf

Das bekannteste Metall-Widerstandsthermometer ist das hier verwendete Pt-100. Wie der Name schon sagt, dient Platin hier als Sensormaterial. „100“ bedeutet, dass die Drähte so gearbeitet sind, dass ihr Widerstand bei 0 °C 100 Ω beträgt.

Pt-100-Widerstandsthermometer sind nach ihrer Grenzabweichung in 2 Klassen eingeteilt. Diese Toleranzklassen geben an, um welchen Betrag der Widerstandswert eines Pt-100-Widerstandes bei der jeweiligen Temperatur vom Sollwert abweichen darf. In der technischen Temperaturmessung ist die Klasse B als Standardtoleranz eingeführt. Zahlenreihen für Temperatur-koeffizienten sind in der DIN 4367 angegeben und berücksichtigen auch wegen der Nichtlinearität der Kennlinien Koeffizienten höherer Ordnung.

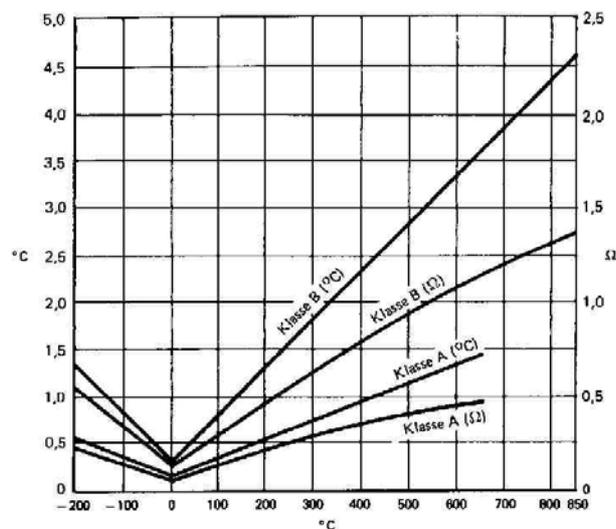


Abbildung 11-5: Genauigkeitsklassen von Widerstandsthermometern