



# PROTOKOLL UMWELTECHNIK

## V1 - Thermische Abfallbehandlung

Gruppe 1.2 (BCUT3)

### Teilnehmer:

Christoph Hecht  
Willy Messerschmidt  
Roman-Luca Zank

**Protokollführer:**

Roman oder Willy  
email@stud.hs-merseburg.de

**Datum der Versuchsdurchführung:**

05.11.2019 & 19.11.2019

**Abgabedatum:**

00.00.2019

Merseburg den 11. Januar 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>4</b>
<b>2 Geräte und Chemikalien</b>	<b>5</b>
<b>3 Durchführung</b>	<b>6</b>
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>8</b>
4.1 Bestimmung der totalen Kohlenstoffgehalte . . . . .	9
4.1.1 Bestimmung des Carbonat- und des TIC-Gehaltes . . . . .	9
4.1.2 Bestimmung des TC . . . . .	14
4.1.3 Bestimmung des TOC . . . . .	14
4.2 Bestimmung von Brenn- und Heizwert . . . . .	15
<b>5 Diskussion</b>	<b>17</b>
<b>6 Fehlerbetrachtung</b>	<b>22</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>
<b>Anhang</b>	<b>24</b>

# Abbildungsverzeichnis

4.1	Daten zum TIC . . . . .	11
4.2	Messkurve 1 für Kalibrierung mit $\text{CaCO}_3$ . . . . .	11
4.3	Messkurve 2 für Kalibrierung mit $\text{CaCO}_3$ . . . . .	12
4.4	Messkurve für Müllprobe 1 . . . . .	12
4.5	Messkurve für Müllprobe 2 . . . . .	12
4.6	Kalibrierkurve zur Bestimmung des Carbonatgehaltes der Müllprobe II	13
4.7	TC der Blindprobe, der originalen und der vorbehandelten Abfallprobe	14
4.8	Daten zu den Kohlenstoffgehalten der originalen Abfallprobe II . . . .	14
5.1	Darstellung eines Hausmülls durch unterschiedliche Stoffgruppen und deren Aufteilung auf die Komponenten Wasser, Inertstoff, Kunststoff und sonstigen organischen Komponenten . . . . .	19

# Tabellenverzeichnis

4.1	Messwerttabelle für den Praktikumsversuch Thermische Abfallbehandlung - Grundlagen . . . . .	8
4.2	Daten zu Trockensubstanz, Wassergehalt, Glühverlust und Inertstoffgehalt der Müllprobe II . . . . .	16
5.1	Elementgehalte von Restabfall und ausgewählter Fraktionen . . . . .	18
5.2	Tabellenausschnitt mit Heizwerten üblicher Brennstoffe . . . . .	20

# 1 Aufgabenstellung

Im Versuch 1 „Thermische Abfallbehandlung“ wird eine der vorliegenden Abfallproben gewählt und nach Asche-, Chlor- und insbesondere Kohlenstoffgehalt charakterisiert.

Der gesamte Versuch teilt sich dabei in zwei Teilversuche. Im ersten Versuchsteil erfolgt die Kalibrierung des TIC-Moduls und die Bestimmung des Carbonatgehaltes in der Probe. Im zweiten Versuchsteil wird dann über Totalverbrennung in einer Brennkammer der thermisch vollständig zersetzte Abfall bilanziert.

Im Fokus dieses Versuches stehen insbesondere die Plausibilität der Messwerte, deren Interpretation, sowie die Fehleranfälligkeit und Eignung der einzelnen Messmethoden.

## 2 Geräte und Chemikalien

### Geräte:

- TIC-Modul
- $CO_2$ -Detektor
- PC mit Detektorsoftware
- Magnetrührer mit Heizplatte
- Analysewaage
- Trockenschrank
- Brennkammer (EA4000 Analytik Jena AG)
- Erlenmeyerkolben (min. 50 mL, Schliff NS/29)
- Muffelofen
- Keramiktiegel (25 mL und 50 mL)
- Löffelspatel

### Proben/Chemikalien:

- Müllprobe: Müll I
- destilliertes Wasser
- Schliff fett
- 30-40%ige Phosphorsäure
- Natronlauge ( $c_{NaOH} = 11 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$ )
- Calciumcarbonat
- Calciumoxid

### 3 Durchführung

Der Versuch 1 teilt sich in zwei Versuchsabschnitte bei denen eine Müllprobe anhand von Chlor-, Asche- und Kohlenstoffgehalt charakterisiert wird.

In diesem Versuch wurde „Müll I“ als Abfallprobe gewählt.

Der erste Versuchsteil erfolgt am Arbeitsplatz des TIC-Moduls. Er beschäftigt sich lediglich mit der Kalibrierung des TIC-Moduls, sowie der Bestimmung des Carbonatgehaltes in der jeweiligen Müllprobe.

In diesem Versuchsabschnitt wird ca. 1g der Müllprobe im Erlenmeyerkolben abgewogen. Da die Probe „Müll I“ sehr grobes und trockenes Material enthält, wird das Substrat mit destilliertem Wasser benetzt, um eine bessere Durchmischbarkeit der Probe zu bewirken. Infolgedessen wird der Rührfisch zugegeben und die Innenseite des Erlenmeyerkolbenschliffes mit etwas Schliff fett versehen. Ist dies erfolgt, so kann der Erlenmeyerkolben in das TIC-Modul eingespannt werden. Der Kolben steht dann auf einer auf 80 °C vorgewärmten Rührheizplatte. Das Schliff fett sollte an diesem Punkt ein entweichen des zugeführten Trägergases verhindern. Trägergas ist in diesem Versuch Sauerstoff, welcher einen konstanten Trägerfluss von  $16 \frac{\text{L}}{\text{h}}$  einzuhalten hat. Spätestens an diesem Punkt werden der mit dem Computer verbundene CO<sub>2</sub>-Detektor und Rührer eingeschaltet.

Nach diesen Vorbereitungen kann die Messung mittels CO<sub>2</sub>-Detektor über die Software am Computer gestartet werden. Es wird dabei den Anweisungen der Software Folge geleistet. Nach die Basislinie vom Programm gefunden wurde, wird die Säure zum Austreiben des CO<sub>2</sub> aus den Carbonaten zugesetzt. Dies erfolgt mit einer Hand-Dosier-Pumpe, welche über ein zwischengeschaltetes Ventil und einem Schlauch mit dem Erlenmeyerkolben und dem Phosphorsäurebehälter verbunden ist. Nach der Dosierung von zwei mal 5 mL Säure, wird das zum Erlenmeyerkolben geöffnete Ventil sofort wieder geschlossen. Ab diesem Punkt wird nun gewartet bis die Software ihre Messung beendet und die Fläche unter dem erzeugten Graphen integriert hat. Start- und Endpunkt der Integration müssen möglicherweise manuell korrigiert werden.

Diese Vorgehensweise bleibt für jegliche Müll- und Carbonatproben gleich. Mit den erzeugten Ergebnissen können dann Rückschlüsse auf den TIC-Gehalt in den jeweiligen Müllproben gezogen werden. In diesem Fall erfolgte lediglich eine Zweifachbestimmung der reinen Carbonatproben. Bereits der zweite Messwert lag nah genug am gemessenen Wert der Abfallprobe.

Im Nachhinein wird die verbliebene Phosphorsäure in der TIC-Abfallprobe mittels 15 mL Natronlauge neutralisiert.

Dem folgend wird das Leergewicht zweier Keramiktiegel bestimmt. Die zuvor analysierte Abfallprobe wird mitsamt der der Flüssigkeit in einen der beiden Keramiktiegel umgefüllt. In den anderen Tiegel werden ca. 3g der originalen Abfallprobe eingewogen. Beide Tiegel werden beschriftet und anschließend für 14 Tage in den Trockenschrank gestellt.

Der zweite Versuchsteil beginnt mit der Vorbereitung der Probenträger für das Verbrennungssystem EA4000. Die Kermikschiffchen werden einzeln gewogen und mit etwas Calciumoxid bedeckt, um das Anhaften der Asche oder Schlacke beim Glühen zu unterbinden.

Im Anschluss werden die mit Calciumoxid beschichteten Schiffchen gewogen. Nach dem Bestücken mit einer originalen und der für die TIC-Analyse behandelten Probe werden die Massen erneut bestimmt. Ein Schiffchen bleibt dabei als Blindkorrektur unbestückt und enthält lediglich Calciumoxid. Es stehen jetzt 3 fertige Probenträger zur Analyse bereit. Zur Vorbehandlung des Abgases werden zwei Waschflaschen mit je 80 mL einer 0,1 molaren Salpetersäure befüllt und an die Apparatur angeschlossen. Es ist auf den Dichtsitz der Schraubdeckel Obacht zu geben.

Als erste Probe ist das Schiffchen mit dem gebrannten Kalk zur Blindwertkorrektur in das Probenrack einzulegen und die Messung am Computer zu starten. Die Waschflüssigkeit muss nach diesem Durchgang nicht getauscht werden, weil dem reinen Kalk kein Schwefel oder Chlor entweichen sein kann. Es folgt der zweite Durchgang mit einer Abfallprobe. Nach dieser sind die Waschflaschen in ein gemeinsames Gefäß zu entleeren und das Gefäß zur weiteren Analyse beschriftet zur Seite zu stellen. Die Waschflaschen werden wie beim ersten Mal mit je 80 mL einer 0,1 molaren Salpetersäure befüllt und wieder korrekt angeschlossen. Die letzte Abfallprobe kann dem Verbrennungssystem jetzt zugeführt werden. Die Messung wird gestartet und deren Verlauf abgewartet. Die Waschflüssigkeit wird wiederum entnommen. Sobald die Probenträger erkaltet sind kann das darauf befindliche Material entsorgt werden.

Anschließend erfolgt die Bestimmung über den Chlorgehalt argentometrisch aus den belasteten Waschflaschen mittels Titrationsautomaten. Dafür werden die Inhalte der Waschflaschen vermischt und 80 mL, sprich die Hälfte der Probe, in das Vorlagegefäß des Automaten gegeben. Nach weiterer Vorbereitung des Rührers ist die Messung mittels Knopfdruck zu starten.



## 4 Ergebnisse

Tab. 4.1: Messwerttabelle für den Praktikumsversuch Thermische Abfallbehandlung  
- Grundlagen

Daten	Einheit	Vorher	Nachher
Masse Tiegel (TIC-Probe)	g	45,717	53,0574
Masse TIC-Probe	g	38,717	7,340
Masse Tiegel (original Abfall)	g	28,4613	29,0690
Masse original Abfall (zur Trocknung)	g	2,976	2,878
Trockensubstanz original Abfall	Ma.-%	96,71%	
Masse org. Abfall (zur Verbrennung)	g	2,878	2,203
org. Trockensubstanz original Abfall	Ma.-%	20,16%	
Messung TIC		Masse [g]	Messergebnis $\left[\frac{\mu V}{min}\right]$
Abfallprobe 1 für TIC-Messung		0,994	40329,7
Kalibrierpunkt 1 ( $CaCO_3$ )		0,0618	33472,8
Kalibrierpunkt 2 ( $CaCO_3$ )		0,073	37642,8
Abfallprobe 2 für TIC-Messung		0,999	55644,0
Messung TC & Cl		Masse [g]	Messergebnis $\left[\frac{g}{kg}\right]$
TC Blindwert (z.B. gebrannter Kalk)		0,2343	4,11
TC orig. Abfall (nach Trocknung)		0,0790	274,26
TC TIC-Mischprobe (nach Trocknung)		0,4749	43,85
Chlorgehalt orig. Abfall (80 mL aus 160 mL)		-	$2 \cdot 0,855 = 1,71$ (0,17 Ma%)

## 4.1 Bestimmung der totalen Kohlenstoffgehalte

### 4.1.1 Bestimmung des Carbonat- und des TIC-Gehaltes

Im folgenden Abschnitt sind die Messwerte für die Massen der Müll- und der Carbonatproben aufgeführt, sowie deren per Software berechnetes Messergebnis  $\left[\frac{\mu\text{V}}{\text{min}}\right]$ . Alle Werte für den TIC-Gehalt in Tabelle 4.1 wurden vor der Trocknung der Proben aufgenommen.

#### Bestimmung des Carbonatgehaltes $\chi$ für Probe 1

$$m_{\text{Blindprobe1,Carbonat}} = \frac{M_{\text{CO}_3}}{M_{\text{CaCO}_3}} \cdot m_{\text{Blindprobe1}} \quad (4.1)$$

$$= \frac{60 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{100 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 0,0618 \text{ g} \quad (4.2)$$

$$= \underline{37,08 \text{ mg}} \quad (4.3)$$

$$\frac{m_{\text{Probe 1,Carbonat}}}{e_{\text{Probe 1,Carbonat}}} = \frac{m_{\text{Blindprobe 1, Carbonat}}}{e_{\text{Blindprobe 1, Carbonat}}} \quad (4.4)$$

$$m_{\text{Probe 1, Carbonat}} = \frac{e_{\text{Probe 1, Carbonat}}}{e_{\text{Blindprobe 1, Carbonat}}} \cdot m_{\text{Blindprobe 1, Carbonat}} \quad (4.5)$$

$$m_{\text{Probe 1, Carbonat}} = \frac{40\,329,7 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}}{33\,472,8 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}} \cdot 37,08 \text{ mg} \quad (4.6)$$

$$m_{\text{Probe 1, Carbonat}} = \underline{44,68 \text{ mg}} \quad (4.7)$$

$$\chi_{\text{Probe 1, Carbonat}} = \frac{m_{\text{Probe 1, Carbonat}}}{m_{\text{Probe 1}}} = \frac{44,68 \text{ mg}}{994 \text{ mg}} \quad (4.8)$$

$$\chi_{\text{Probe 1, Carbonat}} = \underline{\underline{0,04495 \approx 4,5 \text{ Ma}\%}} \quad (4.9)$$

## Bestimmung des Carbonatgehaltes $\chi$ für Probe 2

$$m_{Blindprobe1,Carbonat} = \frac{M_{CO_3}}{M_{CaCO_3}} \cdot m_{Blindprobe1} \quad (4.10)$$

$$= \frac{60 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{100 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 0,0618 \text{ g} \quad (4.11)$$

$$= \underline{37,08 \text{ mg}} \quad (4.12)$$

$$\frac{m_{Probe\ 2,Carbonat}}{e_{Probe\ 2,Carbonat}} = \frac{m_{Blindprobe\ 1}}{e_{Blindprobe\ 1}} \quad (4.13)$$

$$m_{Probe\ 2,Carbonat} = \frac{e_{Probe\ 2,Carbonat}}{e_{Blindprobe\ 1}} \cdot m_{Blindprobe\ 1} \quad (4.14)$$

$$m_{Probe\ 2,Carbonat} = \frac{55\,644,0 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}}{33\,472,8 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}} \cdot 37,08 \text{ mg} \quad (4.15)$$

$$m_{Probe\ 2,Carbonat} = \underline{61,64 \text{ mg}} \quad (4.16)$$

$$\chi_{Probe\ 2,Carbonat} = \frac{m_{Probe\ 2,Carbonat}}{m_{Probe\ 2}} = \frac{61,64 \text{ mg}}{999 \text{ mg}} \quad (4.17)$$

$$\chi_{Probe\ 2,Carbonat} = \underline{\underline{0,0617 \approx 6,2 \text{ Ma}\%}} \quad (4.18)$$

## Bestimmung des TIC für Probe 1

$$m_{C,Blindprobe1} = m_{Blindprobe1} \cdot \frac{M_C}{M_{CaCO_3}} \quad (4.19)$$

$$= 0,0618 \text{ g} \cdot \frac{12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{100 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \quad (4.20)$$

$$= 0,0618 \text{ g} \cdot 12 \text{ Ma}\% \quad (4.21)$$

$$= \underline{0,0074 \text{ g}} \quad (4.22)$$

$$m_{C,Probe1} = m_{C,Blindprobe1} \cdot \frac{e_{Probe1}}{e_{CaCO_3,Blindprobe1}} \quad (4.23)$$

$$= 7,4 \text{ mg} \cdot \frac{40\,329,7 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}}{33\,472,8 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}} \quad (4.24)$$

$$= \underline{8,95 \text{ mg}} \quad (4.25)$$

$$TIC_{Probe1} = \frac{m_{C,Probe1}}{m_{Probe1}} \quad (4.26)$$

$$= \frac{8,95 \text{ mg}}{994,00 \text{ mg}} \quad (4.27)$$

$$\approx 0,9 \text{ Ma}\% = \underline{\underline{9 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}} \quad (4.28)$$

## Bestimmung des TIC für Probe 2

$$m_{C,Blindprobe1} = m_{Blindprobe1} \cdot \frac{M_C}{M_{CaCO_3}} \quad (4.29)$$

$$= 0,0618 \text{ g} \cdot \frac{12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{100 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \quad (4.30)$$

$$= 0,0618 \text{ g} \cdot 12 \text{ Ma}\% \quad (4.31)$$

$$= \underline{0,0074 \text{ g}} \quad (4.32)$$

$$m_{C,Probe2} = m_{C,Blindprobe1} \cdot \frac{e_{Probe2}}{e_{CaCO_3,Blindprobe1}} \quad (4.33)$$

$$= 7,4 \text{ mg} \cdot \frac{55\,644,0 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}}{33\,472,8 \frac{\mu\text{V}}{\text{min}}} \quad (4.34)$$

$$= \underline{12,33 \text{ mg}} \quad (4.35)$$

$$TIC_{Probe2} = \frac{m_{C,Probe2}}{m_{Probe2}} \quad (4.36)$$

$$= \frac{12,33 \text{ mg}}{999,00 \text{ mg}} \quad (4.37)$$

$$\approx 1,2 \text{ Ma}\% = \underline{\underline{12,3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}} \quad (4.38)$$

Abb. 4.1: Daten zum TIC

	Probe 1	Probe 2	Mittelwert
Carbonatgehalt	4,5 Ma%	6,2 Ma%	5,3 Ma%
TIC	9 $\frac{\text{g}}{\text{kg}}$	12,3 $\frac{\text{g}}{\text{kg}}$	10,7 $\frac{\text{g}}{\text{kg}}$

Die aufgenommenen Messergebnisse mit den zugehörigen Graphen des Computerprogramms lassen sich in den Abbildungen 4.2 bis 4.5 nachvollziehen.

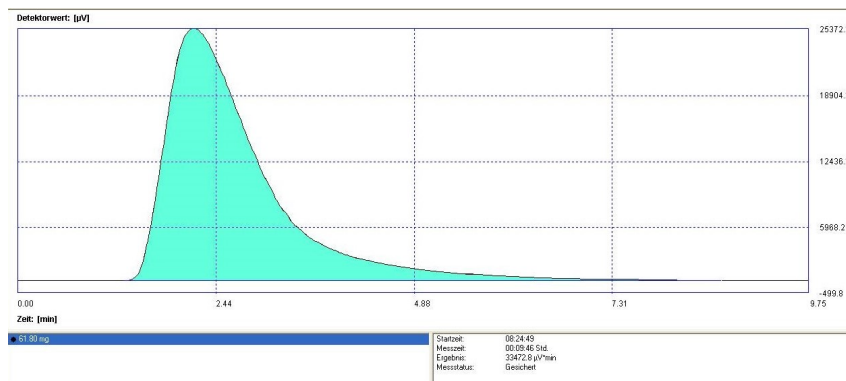


Abb. 4.2: Messkurve 1 für Kalibrierung mit  $\text{CaCO}_3$

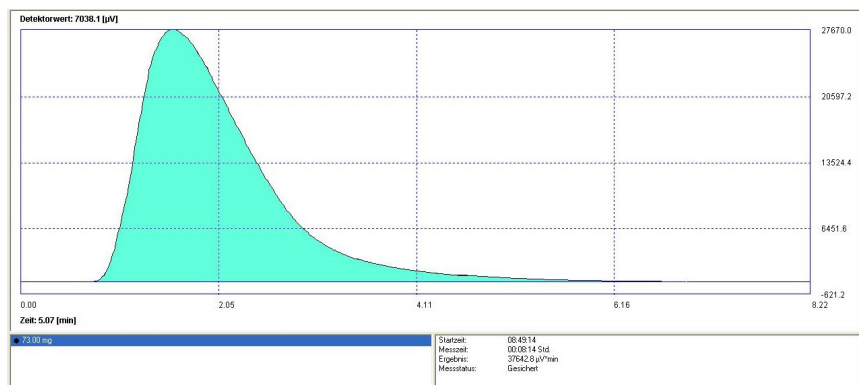


Abb. 4.3: Messkurve 2 für Kalibrierung mit  $\text{CaCO}_3$

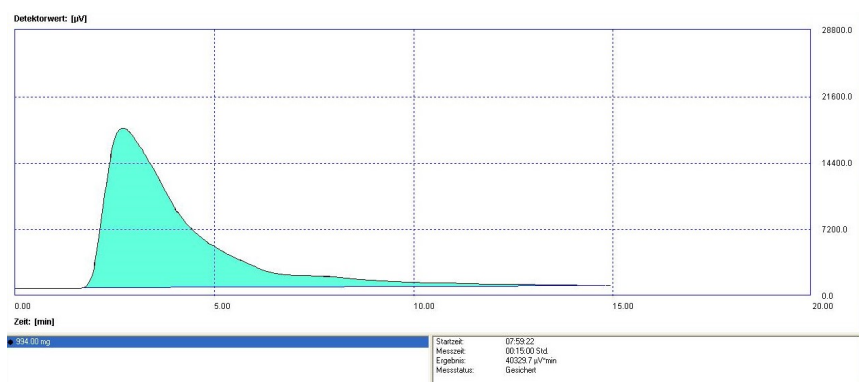


Abb. 4.4: Messkurve für Müllprobe 1

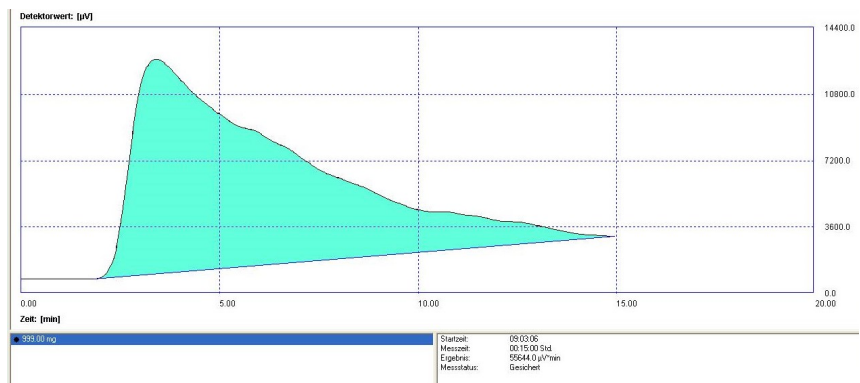


Abb. 4.5: Messkurve für Müllprobe 2

Um die Messwerte im Vergleich zu den Blindproben beurteilen zu können sind diese im Diagramm 4.6 aufgezeigt und werden mittels Abweichungsrechnung ab Gleichung 4.39 weiter analysiert.

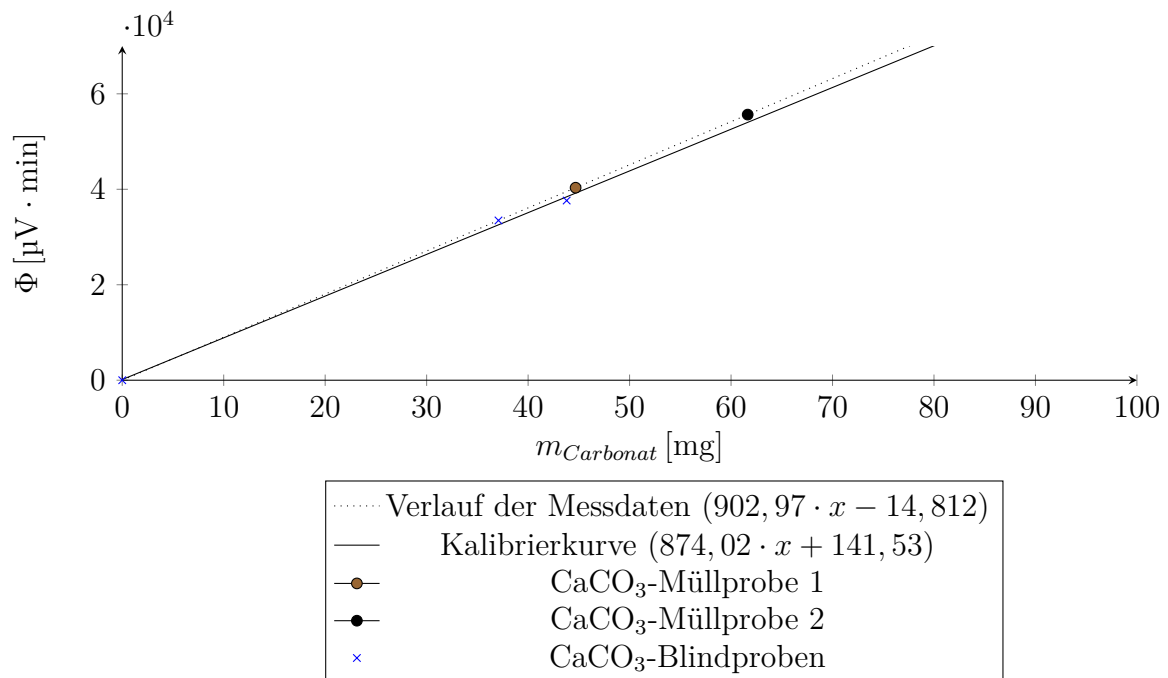


Abb. 4.6: Kalibrierkurve zur Bestimmung des Carbonatgehaltes der Müllprobe II

#### Abweichung von Kalibrierkurve

$$a = \frac{\Phi_{\text{Mess}} - \Phi_{\text{Kali}}}{\Phi_{\text{Kali}}} \quad (4.39)$$

$$a_1 = \frac{40\,329,7 \mu\text{V} \cdot \text{min} - 39\,192,74 \mu\text{V} \cdot \text{min}}{39\,192,74 \mu\text{V} \cdot \text{min}} = \underline{\underline{2,9\%}} \quad (4.40)$$

$$a_2 = \frac{55\,644,0 \mu\text{V} \cdot \text{min} - 54\,016,12 \mu\text{V} \cdot \text{min}}{54\,016,12 \mu\text{V} \cdot \text{min}} = \underline{\underline{3,0\%}} \quad (4.41)$$

### 4.1.2 Bestimmung des TC

Die Bestimmung des  $TC$ -Gehaltes erfolgt mittels Analytik-Brennkammer und ergibt einen Wert von  $274,26 \frac{g}{kg}$  der originalen Müllprobe II. Parallel erfolgte ebenfalls eine Bestimmung des  $TC$ s für eine Blindprobe mit Calciumoxid und der via  $TIC$ -Bestimmung vorbehandelten Probe. Die Messwerte für alle drei Proben sind in Tab. 4.7 aufgeführt.

Abb. 4.7: TC der Blindprobe, der originalen und der vorbehandelten Abfallprobe

Probe	Probenmenge	Messwert	Massenanteile
Blindprobe	234,3 mg	$4,11 \frac{g}{kg}$	0,41 Ma%
Original	79,0 mg	$274,26 \frac{g}{kg}$	27,43 Ma%
Vorbehandelt mit TIC	474,9 mg	$43,85 \frac{g}{kg}$	4,39 Ma%

### 4.1.3 Bestimmung des TOC

An dieser Stelle wird ergänzend die Bestimmung des  $TOC$  aufgezeigt. Dies erfolgt via Berechnung der Differenzen des  $TC$  und des  $TIC$ , dargestellt in den Gleichungen 4.42 bis 4.45. Falls der  $TOC$  für eine Auswertung wirklich relevant sollte, ist eine Bestimmung mittels einer extra Messmethode zu empfehlen, da durchaus in den Messungen des  $TC$  oder des  $TIC$  Fehler hätten auftreten können. Die hier aufgeführte, simple Methodik der  $TOC$  Bestimmung könnte dann zur Plausibilitätsprüfung genutzt werden.

$$TC = TIC + TOC \quad (4.42)$$

$$TOC = TC - TIC \quad (4.43)$$

$$= 27,43 \text{ Ma\%} - 1,1 \text{ Ma\%} \quad (4.44)$$

$$= \underline{\underline{26,33 \text{ Ma\%} \approx 26 \text{ Ma\%}}} \quad (4.45)$$

Abb. 4.8: Daten zu den Kohlenstoffgehalten der originalen Abfallprobe II

Kohlenstofftyp	Messwert	Berechnet	Approximiert
TC	27,43 Ma%	-	$\approx 27 \text{ Ma\%}$
TIC	1,1 Ma%	-	$\approx 1 \text{ Ma\%}$
TOC	-	26,33 Ma%	$\approx 26 \text{ Ma\%}$

## 4.2 Bestimmung von Brenn- und Heizwert

In diesem Abschnitt werden die Berechnungen und Ergebnisse zur Bestimmung der Trockensubstanz  $TS$ , des Wassergehaltes  $W$ , sowie des Glühverlustes  $GV$  dargestellt.

Brenn- und Heizwert wurden mittels Näherungsformeln nach SHIN bestimmt und geben Auskunft über die Wertigkeit der Müllprobe als Ersatzbrennstoff. Für die Berechnung wurden die Ergebnisse aus Tabelle 4.2 genutzt.

### Bestimmung des Trockensubstanzgehalt TS

$$TS [\%] = \frac{m_{\text{Trockensubstanz}}}{m_{\text{gesamt}}} \cdot 100\% \quad (4.46)$$

$$TS_{\text{TIC}} = \frac{7,340 \text{ g}}{38,717 \text{ g}} \cdot 100\% \quad (4.47)$$

$$= \underline{18,96\%} \quad (4.48)$$

$$TS_{\text{org.}} = \frac{2,878 \text{ g}}{2,976 \text{ g}} \cdot 100\% \quad (4.49)$$

$$= \underline{96,71\%} \quad (4.50)$$

### Bestimmung des Wassergehaltes W

$$W [\%] = \frac{m_{\text{gesamt}} - m_{\text{Trockensubstanz}}}{m_{\text{gesamt}}} \cdot 100\% \quad (4.51)$$

$$W_{\text{TIC}} = \frac{38,717 \text{ g} - 7,340 \text{ g}}{38,717 \text{ g}} \cdot 100\% \quad (4.52)$$

$$= \underline{81,04\%} \quad (4.53)$$

$$W_{\text{org.}} = \frac{2,976 \text{ g} - 2,878 \text{ g}}{2,976 \text{ g}} \cdot 100\% \quad (4.54)$$

$$= \underline{3,29\%} \quad (4.55)$$

### Bestimmung des Glühverlustes GV

$$GV [\%] = \frac{m_{\text{gesamt}} - m_{\text{Glührückstand}}}{m_{\text{gesamt}}} \cdot 100\% \quad (4.56)$$

$$GV_{\text{org.}} = \frac{2,878 \text{ g} - 2,203 \text{ g}}{2,878 \text{ g}} \cdot 100\% \quad (4.57)$$

$$= \underline{23,45\%} \quad (4.58)$$

### Bestimmung des Inertstoffgehaltes IS

$$IS [\%] = 100\% - GV_{\text{org.}} \quad (4.59)$$

$$IS_{\text{org.}} \approx 100\% - 23,45\% \quad (4.60)$$

$$\approx \underline{76,55\%} \quad (4.61)$$



Tab. 4.2: Daten zu Trockensubstanz, Wassergehalt, Glühverlust und Inertstoffgehalt der Müllprobe II

Probe	Trockensubstanz	Wassergehalt	Glühverlust	Inertstoffgehalt
Original	96,71%	3,29%	23,45%	76,55%
Nach TIC	18,96%	81,04%	-	-

### Bestimmung des Brennwertes $H_s$

$$H_s \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 523 \cdot GV^{0,77} \quad (4.62)$$

$$H_s(\text{org.}) = 523 \cdot 23,45^{0,77} \quad (4.63)$$

$$= 5936,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 5,94 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 1,65 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}} \quad (4.64)$$

### Bestimmung des Heizwertes $H_i$

$$H_i \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = H_s \cdot \frac{TS}{100} - 25 \cdot (0,09 \cdot H \cdot TS + W) \quad (4.65)$$

$$= H_s \cdot \frac{TS}{100} - 25 \cdot \left( 0,09 \cdot \frac{GV}{15} \cdot TS + W \right) \quad (4.66)$$

$$H_i(\text{org.}) = 5936,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{96,71}{100} - 25 \cdot \left( 0,09 \cdot \frac{23,45}{15} \cdot 96,71 + 3,29 \right) \quad (4.67)$$

$$= 5318,51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 5,32 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 1,48 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}} \quad (4.68)$$

## 5 Diskussion

In diesem Abschnitt wird die Plausibilität der erhobenen Daten zur Analyse der Müllprobe I überprüft und diskutiert.

Beginnend mit dem Carbonatgehalt werden diese als wichtige Füll- und Zuschlagsstoffe für Papier, Pappe und diverse Kunststoffe eingesetzt. Für die untersuchte Müllprobe I fällt mit einem mittleren Carbonatgehalt von 5,3 Ma% (siehe Abschnitt 4.1.1) dieser im Vergleich zu Carbonatgehalten für Papier mit bis zu 30 Ma% [1] und für Kunststoffe von 10 – 50 Ma% [2] gering aus. Da aus der optischen Betrachtung des Mülls nicht nur Papier- und Kunststoffreste zu erkennen sind, sondern auch fasrige und veraschte Komponenten, ist es durchaus plausibel, dass der Carbonatgehalt entsprechend kleiner ausfällt. Möglicherweise ist Kehricht, mit einem gewissen Carbonatanteil, im untersuchten Müll entsorgt worden.

In diesem Versuch wurde der Carbonatgehalt für zwei Stichproben bestimmt, welche von einander eine Abweichung von 3% aufweisen, was sich auf die inhomogene Zusammensetzung der Müllprobe selbst zurückführen lässt. Die Abweichungen bezüglich der Kalibrierkurve könnten sich ebenfalls auf diese Inhomogenität zurückführen lassen, jedoch wäre an dieser Stelle weitere Kalibrierpunkte, sowie weitere Messungen mit Müllproben sinnvoll, um repräsentative Aussagen treffen zu können. Nähere Informationen zur Fehlerbetrachtung finden sich unter Abschnitt 6.

Der TC-Gehalt liegt laut dem Analyse-Brennkammer bei  $\approx 27\%$  (siehe Tabelle 4.7). Aufgrund der optischen Zusammensetzung des Mülls mit teilweise enthaltenen Papier, Pappe und Kunststoffschnipseln sowie den Textilfasern und ascheähnlichen Resten könnte der Kohlenstoffgehalt plausibel sein. Verglichen mit Tabelle 5.1 [4, S.11] scheinen sich die Daten für Feinmüll, gemischt mit Pappe, Papier und Kunststoffen, bzw. grob aufgerundet, mit dem unteren Wert von Hausmüll mit 30 Ma% zu decken.

Für die Blindprobe und die vorbehandelte Probe durch die Bestimmung des TIC fallen andere Werte als die der originalen Müllprobe an. Dies ist, aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen aller drei Proben, auch zu erwarten. Für die Blindprobe ist ein sehr geringer Messwert, durch das Fehlen an Kohlenstoff in der Verbindung von CaO, zu erwarten. Dies deckt sich auch mit dem ausgebenen Messwert der Analyse von 0,41 Ma%. Der Restkohlenstoffgehalt kann dabei auf die nicht 100%ige Reinheit der Probe zurückgeführt werden bzw. weiterer Faktoren, welche unter Abschnitt 6 in der Fehlerbetrachtung aufgeführt sind.

Der Messwert für die vorbehandelte Probe durch die TIC-Bestimmung liegt bei 4,39 Ma%. Fälschlicherweise könnte man erwarten, dass dieser Wert, aufgrund des ausgetriebenen, anorganischen Kohlenstoffs bei  $\approx 26\text{ Ma\%}$  liegen müsste. Da jedoch für das Austreiben des CO<sub>2</sub>, aus den Carbonaten, Phosphorsäure und zur Neutralisation Natronlauge hinzugefügt wurde, verfälschen diese die Masse der Probe und man erhält somit einen verfälschten Messwert. Möglich wäre es an dieser Stelle, die Masse der zugeführten Säure und Base einzubeziehen und somit einen neuen, hier nicht aufgeführten, Messwert zu errechnen.

Tab. 5.1: Elementgehalte von Restabfall und ausgewählter Fraktionen [4, S.11]

Parameter	Hausmüll	Fraktion A Papier, Pappe	Fraktion B Kunststoffe, etc.	Fraktion C Feinmüll	Fraktion D Bioabfall
Kohlenstoff C [TS%]	30-40	40	54	19	31
Wasserstoff H [TS%]	4-5	6	8	3	4
Stickstoff N [TS%]	0,3-0,5	0,3	0,9	0,4	2,1
Sauerstoff O [TS%]	17-30	37	17	17	20

**Fraktion A:** Papier, Pappe

**Fraktion B:** Kunststoffe, Holz, Leder, Textilien, Verbunde

**Fraktion C:** Feinmüll < 8 mm

**Fraktion D:** Mittelmüll 8 – 40 mm, Vegetabilien

Der Wassergehalt wurde aus dem errechneten Trockensubstanzanteil berechnet (siehe Gleichung (4.46) bis (4.55)). Die Feuchtigkeit in der untersuchten Müllprobe kann praktisch nur in Papier, den Fasern und ähnlichem enthalten sein. Kunststoffe binden Feuchtigkeit praktisch nur als Anhaftung an ihrer Oberfläche [6, S.3]. Der Müll fühlte sich trocken an und haftete auch nicht feuchtigkeitsbedingt zusammen. Eine allgemeine Hausmüllprobe besitzt einen Wassergehalt von  $\approx 35\%$  (siehe Abb. 5.1). Vergleicht man die untersuchte Probe damit, erscheint der berechnete Wert für den Wassergehalt als nicht plausibel.

Da jedoch auch für Müllfraktionen wie Steine, Kunststoffe, Keramik, Verbundstoffe, etc. kein Wassergehalt in der Quelle (siehe Abb. 5.1) angegeben ist, kann man darauf schließen, dass der Wassergehalt nur bei entsprechend hygroskopischen bzw. schon stark feuchten bis nassen Müllfraktionen berücksichtigt wird. Der Wassergehalt der Müllprobe fällt mit  $\approx 3\%$  als sehr gering aus und kann somit als nahezu „trocken“ angenommen werden.

Der Unterschied im Wassergehalt zwischen der originalen Probe und der für die TIC-Analyse behandelten Probe lässt sich auf die zugegebene Phosphorsäure bzw. Natronlauge zurückführen. Dieser Wassergehalt gibt keine offensichtlich sinnvolle Information preis.

Der Glühverlust wird im Folgenden indirekt über den Inertstoffgehalt verglichen. Laut der Quelle (siehe Abb. 5.1) besitzt der allgemeine Haushaltsmüll einen Inertstoffgehalt von  $\approx 27\text{ Ma}\%$ . Aschegehalte des Hausmülls schwankten Mitte der 1990er Jahre zwischen  $25\text{ Ma}\%$  und  $35\text{ Ma}\%$  [7]. Das Papier (Illustrationspapier) aus einem Magazin weist einen Glührückstand von ca.  $15\text{ Ma}\%$  auf [8]. Einige Kunststoffe können theoretisch sogar rückstandsfrei verbrennen. Es besteht also ein enger Bezug des Glührückstands zum Füllstoffgehalt. Dazu wären jedoch genauere Analysen zu den enthaltenen Kunststoffen nötig.

Im Vergleich dazu erscheint der Inertstoffgehalt der untersuchten Müllprobe mit  $\approx 73\%$  als zu hoch bzw. der Glühverlust im Vergleich als sehr niedrig. Die Vermutung, dass die optisch ascheähnlichen Bestandteile tatsächlich inert sind, könnte man somit begründen.

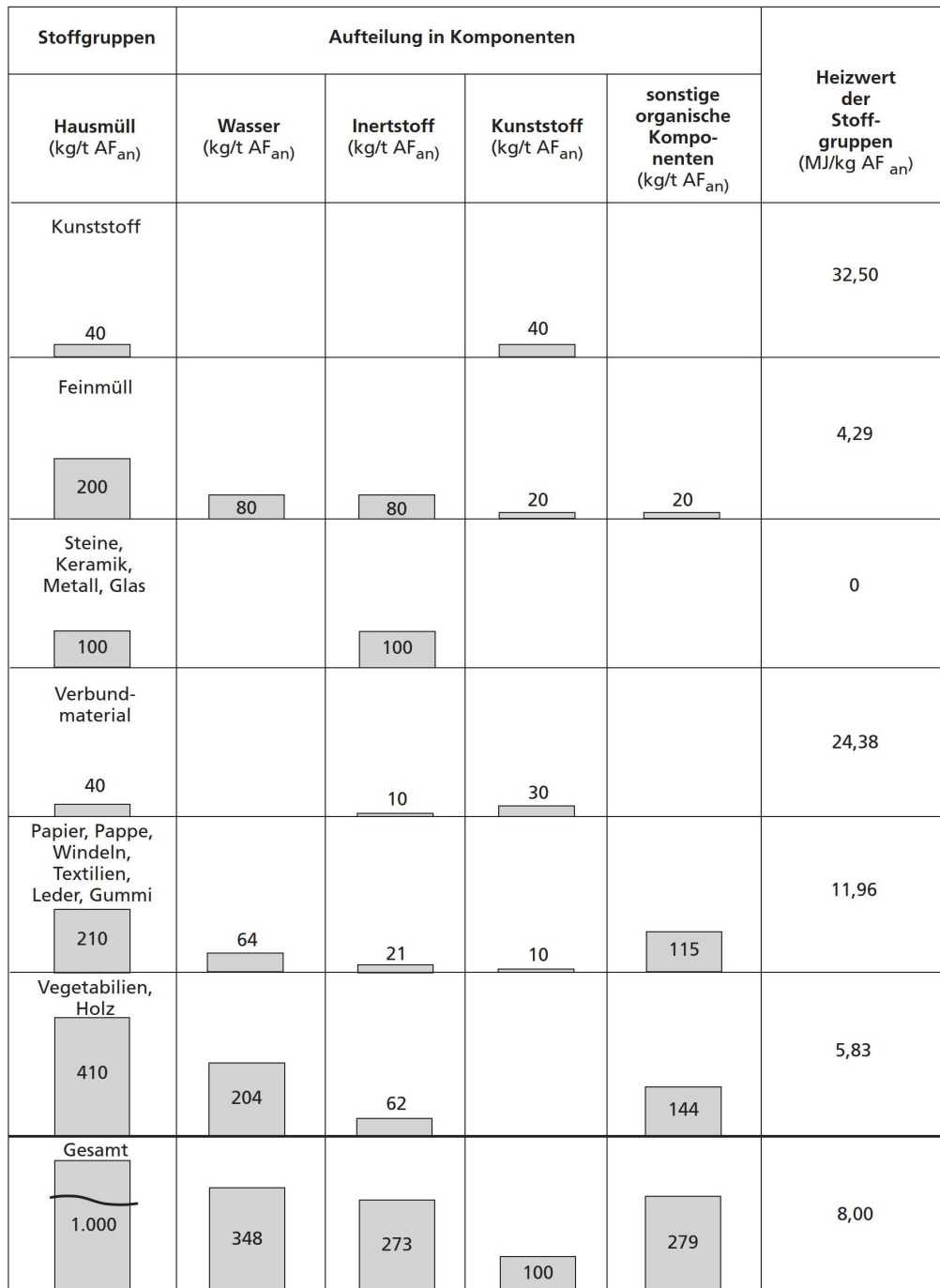


Abb. 5.1: Darstellung eines Hausmülls durch unterschiedliche Stoffgruppen und deren Aufteilung auf die Komponenten Wasser, Inertstoff, Kunststoff und sonstigen organischen Komponenten aus [7, S.23]

Tab. 5.2: Tabellenausschnitt mit Heizwerten üblicher Brennstoffe aus [9]

Energieträger	Heizwert	$\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$	Brennwert	$\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$
Stadtgas	6,8...8,7		7,7...9,8	
Benzin	12,11		13,06	
Waldfrisches Holz	1,90		k.A.	
Hackschnitzel	3,5...4,0		3,8...4,3	
Papier	4,17		k.A.	
Hausmüll	2,78		k.A.	

Der Brennwert ist, richtiger Weise, höher als der Heizwert, da die im Wasserdampf gebundene Energie mit folgender Kondensation betrachtet wird. Ein Gemisch welches zu gleichen Teilen aus Haus- und Papiermüll besteht hat etwa einen Heizwert von  $3,5 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$  oder  $12,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  (siehe Tab. 5.2). Mit  $1,65 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$  ist der berechnete Brennwert etwa halb so groß. Verglichen mit üblichen Brennstoffen aus Tab. 5.2 zeigt sich die Müllprobe als Ersatzbrennstoff mit  $1,65 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$  schlechter als die angegebenen Brennwerte für Benzin, Stadtgas und Hackschnitzel. Das erscheint sinnvoll durch den hohen Inertstoffgehalt, da dadurch pro Kilogramm weniger Energie durch Verbrennung frei werden kann. Für weitere Vergleiche wird Bezug auf den Heizwert genommen, da hierfür mehr Angaben aus Tab. 5.2 zu entnehmen sind.

Der Heizwert der Probe siedelt sich mit  $\approx 5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  bzw.  $\approx 1,5 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$  vergleichsweise zwischen die Müllfraktionen von Feinmüll mit  $\approx 4,29 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  und Holz, Vegetabilien mit  $\approx 5,83 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  an (siehe Tab. 5.1). Aus rein optischer Einschätzung scheint lediglich der Feinmüll als plausibel, da Holz bzw. Vegetabilien nicht vorrangig zu erkennen sind. Die untersuchte Müllprobe liegt somit unter dem Heizwert für allgemeinen Hausmüll mit  $\approx 8,00 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  (siehe Tab. 5.1). Das wiederum erscheint durch den hohen Inertstoffgehalt als sinnvoll, nimmt man den Messwert der Müllfraktion von Papier, Pappe, etc.  $\approx 11,96 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  in die Betrachtung des Heizwertes als Bestandteil hinzu (siehe Tab. 5.1). Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen von Müllproben erscheint eine genauere Plausibilitätsbetrachtung als schwierig. Die Dimensionen dieser Müllprobe scheinen, was den Heizwert anbelangt, jedoch nicht unrealistisch zu sein.

Ausgehend von der Sinnhaftigkeit der erhobenen Daten lässt der Heizwert, ähnlich wie der Brennwert, ebenfalls mit Heizwerten von üblichen Brennstoffen der Tabelle 5.2 vergleichen. Die Probe schneidet im Vergleich, auch in Bezug auf weitere Energieträger, deutlich schlechter ab. Lediglich waldfrisches Holz, mit  $1,90 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$  Heizwert, ist an dieser Stelle annähernd vergleichbar. Somit wird auch durch den Heizwertvergleich deutlich, dass sich die Müllprobe selbst, vergleichsweise schlecht als Ersatzbrennstoff eignet. Begründung liegt auch hier wieder im hohen Inertstoffgehalt, welcher keinen energetischen Nutzen darstellt.

Um energetisch hochwertigere Brenn- bzw. Heizwerte zu erzielen, könnte untersucht werden ob eine Reduzierung des Inertstoffgehaltes pro Kilogramm, durch feineres Sieben der Müllprobe, zielführend ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass lediglich Aussagen zur qualitativen Beschaffenheit getroffen können, da die Zusammensetzung der Müllprobe nicht genauer bestimmt ist. Ein Widerspruch ist hier nicht zu erkennen, da die Brenn- bzw. Heizwertewerte zwar im Vergleich zu anderen Energieträgern gering ausfallen, aber immerhin in derselben Größenordnung liegen. Erwartungsgemäß ist der Heizwert geringer als der Brennwert da die latente Wärme des Wasserdampfes in diesem nicht eingerechnet wird.

Betrachtet man nun den Chlorgehalt, so liegt dieser üblicher Weise zwischen etwa 0,3 Ma% und 3 Ma% [6]. Chlorgehalte des Hausmülls schwankten Mitte der 1990er Jahre zwischen 0,4 Ma% und 1 Ma% [7, S.22, Tab. 2.1]. Der hier gemessene Chlorgehalt von 0,17 Ma% liegt damit unterhalb der Erwartung. Es ist zu beachten, dass der hier gemessene Chlorgehalt lediglich organisch gebundenes Chlor beschreibt. Anorganische Chloride wie etwa das Natriumchlorid geben bei den verwendeten Temperaturen kein Chlor ab. Es ist unklar ob die Literaturwerte sich nur auf organisches Chlor oder auch auf anorganisches Chlor beziehen. Nimmt man an, dass das Verhältnis der leicht zu zersetzenden Verbindungen zum schwer zu zersetzenden chlorhaltigen Verbindungen 1 : 1 ist, so passt der Messwert zum Minimalwert der Literaturquellen [6], [7]. Dann läge der Gesamtchlorgehalt bei vielleicht  $3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$  und rund 0,3 Ma%. Bei der Bestückung der kleinen Probenträger mit feinen Anteilen der Müllprobe könnte auch zu wenig Kunststoff übertragen worden sein. Der geringe Chloranteil der Papierfraktion erklärt die Abweichung zum Literaturwert welcher sich auf den heterogenen Hausmüll bezieht. Papier sollte weniger als  $0,5 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$  AOX (Adsorbierbare organisch gebundene Halogene) aufweisen [10]. Nur ein Bruchteil des AOX-Gehaltes entfällt dabei auf Chlor. Es lag kein reines Papier vor. Die Probe wies aber auch zu wenig Kunststoff für einen hausmülltypischen Chlorgehalt auf. Der ermittelte Messwert liegt somit zwischen den für die beiden Extremfälle zu erwartenden Konzentrationen. Somit kann der ermittelte Chlorgehalt auch nicht als falsch ausgeschlossen werden.

## 6 Fehlerbetrachtung

Es ist zu bezweifeln, dass alle im Müll enthaltenen Carbonate mit der Phosphorsäure reagieren konnten. Papier ist sehr porös und saugt sich mit der sauren Lösung voll. Die Füllstoffpartikel liegen zwischen den Fasern vor und können so bis auf wenige Ausnahmen von der Phosphorsäure erreicht werden. Probleme treten auf wenn polymerbeschichtete Zelluloseerzeugnisse oder Kunststoffe zu analysieren sind. Die Carbonate in der aller äußersten Schicht können reagieren, während alle restlichen Carbonatpartikel von der Kunststoffmatrix umhüllt und damit von der umgebenden Lösung getrennt sind. Um auch diese Anteile erreichen zu können, müsste der Müll kleinstmöglich zerkleinert werden. Thermoplastische Kunststoffe und Elastomere können nur mit großem Aufwand so klein zerteilt werden. Ihr (visko-)elastisches Verhalten stellt dabei die größte Herausforderung dar. Sie können dadurch nur geschnitten, gerissen oder geschert werden. Mühlen die das Mahlgut auf Druck belasten oder die Teilchen durch Impulse und Prall brechen sind nicht geeignet. Alternativ zum Mahlen ließe sich vielleicht eine Veraschung bewerkstelligen, bei der die Carbonate keinen Temperaturen ausgesetzt sind, bei denen sie dissoziieren. Die Asche enthielte dann den gesamten anorganischen Kohlenstoff in leicht zu analysierender Form.

Betrachtet man den Stoffumsatz im Reaktor, so muss dieser als nicht vollständig angenommen werden, da die Messung aus Zeitgründen gestoppt wurden, als der gemessene emittierte Kohlenstoffdioxidstrom noch nicht null war. Obige Einschlüsse in inerte Matrizen begünstigen ebenso die Unvollständigkeit der Reaktion. Für eine allgemeine Einschätzung der Müllprobe scheint dieses Vorgehen jedoch als ausreichend.

Weiterhin unterliegt der  $\text{CO}_2$ -Detektor zufälligen Messabweichungen. Eine Fehlerklasse zum verwendeten Gerät ist nicht bekannt.

Darüber hinaus schwankte die Partikelgröße in der Müllprobe stark. Es war von Fasern mit vielleicht 5 mm bis zu Staub mit etwa  $100\text{ }\mu\text{m}$  alles vorhanden. Viel bedeutender ist das Verhältnis der enthaltenen Kunststoffe, dem Papier, der Pappe und den Inertstoffen untereinander. Schon das Vorhandensein eines Polyvinylchloridpartikels kann den ermittelten Chlorgehalt stark vom wahren mittleren Chlorgehalt abweichen lassen. Ähnlich verhält es sich auch für Schwefel- und Kohlenstoffgehalte.

Das zugegebene destillierte Wasser könnte durch Spuren von Kalk verunreinigt gewesen sein. Die eventuell enthaltenen Carbonate hätten dann den Messwert nach oben verschoben.

Die Dichtigkeit des Apparates könnte mangelhaft gewesen sein. Das Vermögen des Behälters einen bestimmten Gasdruck über einen längeren Zeitraum zu halten wurde nicht geprüft. Jedoch wäre ein großes Leck aufgefallen und wurde demnach nicht registriert. Kleine Verluste sind allerdings nicht auszuschließen und hätten den bestimmten Carbonatgehalt gesenkt.

Geht man weiter auf die Messergebnisse und deren Auswertung ein, so ist gerade bei der Bestimmung des Carbonatgehaltes eine exaktere Kalibrierung durch weitere Blindproben notwendig um eine genauere Kalibrierkurve zu erhalten. Die Verwendung von CaO als Trennmittel ist suboptimal, da es durch unsachgemäße Lagerung mit Luftfeuchtigkeit und atmosphärischem CO<sub>2</sub> zu CaCO<sub>3</sub> reagiert. Das führt bei der hohen Temperatur zur Rückreaktion und treibt den Blindwert unnötig in die Höhe. Gerade die Abweichungen von  $\approx 3\%$  können maximal als grobe Einschätzung gewertet werden und entsprechen keiner Laborqualität. Die Qualität der Blindprobe ist bestenfalls ausreichend. Versuchsbetreuer bestätigten, dass es sich um eine ältere Chemikalie handelt, welche bereits über lange Zeit Luftfeuchtigkeit und Kohlenstoffdioxid ausgesetzt war. Da während der Bestimmung des TIC die erste Müllprobe verloren ging, wurde eine zweite Müllprobe im weiteren Verlauf des Versuches analysiert. Dies zeigt sich unter Abschnitt 4.1.1. Die anschließend analysierte Probe wurde der ursprünglichen jedoch genauest-möglich nachempfunden. Eine nahezu ähnliche Menge Abfall des Mülls I wurde mit der exakt gleichen Menge Phosphorsäure versetzt und anschließend getrocknet. Optisch ließen sich jedoch Unterschiede in der Zusammensetzung erkennen. So erhielt die erste Probe der Müllprobe I mehr Textilfaser und die zweite Probe der Müllprobe I mehr Papier, Pappe und vermutlich auch Kunststoffstückchen. Das könnte ein Grund für den 3% höheren Carbonatgehalt, der zweiten Probe sein, da gerade in Papier, Pappe und Kunststoffen oft auch Carbonate als Füllstoffe zugesetzt werden. So finden sich in Papier, je nach Sorte, bis zu 30 Ma% Füllstoffe wie Kaolin, Kreide (Carbonate) oder Gips [1] und in Kunststoffen bis zu 40 Ma% Carbonate wieder [2], um den geforderten Eigenschaften gerecht zu werden.

Zu den berechneten Heiz- und Brennwerten ist noch zu erwähnen, dass diese nur mittels Näherungsformeln berechnet wurden und somit nur eine grobe Einschätzung zulassen. Jedoch ist eine genauere Berechnung für diesen Versuch nicht nötig gewesen, da der Charakter der Müllprobe I deutlich wurde und durch Inhomogenität des Mülls eine größere Genauigkeit der Heiz- bzw. Brennwertbestimmung keinen Mehrwert für diesen Versuch gibt.

Bei der Bestimmung des Aschegehaltes fielen fünf Fehlerquellen auf. Der Müll könnte durch einen beachtlichen, mineralischen Feststoffanteil belastet sein. Die Veraschung könnte unvollständig sein, wodurch verbliebene organische Anteile als anorganisch interpretiert werden würden. Die Asche könnte bei den angewendeten Temperaturen ihre chemische Zusammensetzung in Anwesenheit von Umgebungsluft verändert haben. Die Asche könnte Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufgrund ihrer hygroskopischen Eigenschaften angezogen haben. Es könnten abermals Messfehler passiert sein.

Abschließend lässt sich sagen, dass die in diesem Versuch angewendeten Methoden zur groben Einordnung der Müllprobe ausreicht. Eine belastbare qualitative und quantitative Analyse würde weitere Messungen mit verbesserter Technik erfordern.



# Literaturverzeichnis

- [1] WIKIPEDIA (Hrsg.): *Füllstoff*. Version: 21.11.2019. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=186948324>, Abruf: 2019-12-01
- [2] POLYMER SERVICE GMBH MERSEBURG (Hrsg.): *Teilchengefüllte Kunststoffe – Lexikon der Kunststoffprüfung*. Version: 13.08.2019. [https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Teilchengef%C3%BCllte\\_Kunststoffe](https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Teilchengef%C3%BCllte_Kunststoffe), Abruf: 2019-12-01
- [3] DOMININGHAUS, Hans: *Die Kunststoffe Und Ihre Eigenschaften*. 5., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Springer. – ISBN 978-3-540-62659-6
- [4] HANS-GÜNTER RAMKE, Höxter: *Plausibilitätskontrollen in der Analytik von Zuordnungsparametern fester Siedlungsabfälle*. [http://www.th-owl.de/fb8/fachgebiete/abfallwirtschaft/pdf/Essen\\_2008\\_Beitrag\\_Internet.pdf](http://www.th-owl.de/fb8/fachgebiete/abfallwirtschaft/pdf/Essen_2008_Beitrag_Internet.pdf), Abruf: 2019-12-30
- [5] SCHWARZBÖCK, Therese ; RECHBERGER, Helmut ; ASCHENBRENNER, Philipp ; SPACEK, Stefan ; SZIDAT, Sönke ; FELLNER, Johann: Klimarelevanz von ersatzbrennstoffen – anwendung und vergleich verschiedener bestimmungsmethoden. 70, Nr. 3, 179–193. <http://dx.doi.org/10.1007/s00506-018-0466-8>. – DOI 10.1007/s00506-018-0466-8. – ISSN 1613-7566
- [6] LLA INSTRUMENTS GMBH: *Qualitätskontrolle in der Abfallwirtschaft*. [https://www.lla.de/files/lla/pdf/Einsatzbereiche%20GER/Qualitaetskontrolle\\_Chlorwertbestimmung\\_EBS.pdf](https://www.lla.de/files/lla/pdf/Einsatzbereiche%20GER/Qualitaetskontrolle_Chlorwertbestimmung_EBS.pdf), Abruf: 2020-02-01
- [7] SCHOLZ, Reinhard ; BECKMANN, Michael ; SCHULENBURG, Frank: *Abfallbehandlung in thermischen Verfahren: Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte*. Springer-Verlag. – ISBN 978-3-322-90854-4. – Google-Books-ID: B0cEBgAAQBAJ
- [8] THIEL, Reinhardt ; URBAN, Peter: *Papier*. Version: 08.2016. <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-16-00236>, Abruf: 2020-10-01
- [9] S. FÜRKUS: *Heizwerte, Brennwerte, Primärenergiefaktoren, CO<sub>2</sub>-Äquivalente*. <http://heizkostenrechner.eu/heizwert-brennwert-tabelle.html>, Abruf: 2019-12-24
- [10] Co. KG, Igepa group GmbH u.: *C - Lexikon - IGEPA*. Version: 2020. <https://www.igepa.de/cms/igepa-group/ueber-uns/lexikon/c/>, Abruf: 2020-01-08