

Schuljahr 2016/2017  
Naturwissenschaftliches Seminarfach  
Kurshalbjahr 2  
Jonas Huch  
j.huch@eichsfeld-gymnasium.de

**Seminarfacharbeit**  
**„Gewinnung regenerativer Energieträger durch die  
Pyrolyse von Herbstlaub“**

Eichsfeld-Gymnasium Duderstadt  
Naturwissenschaftliche Seminarfacharbeit  
Betreuende Lehrkraft: StR Friedrich Ach  
Vorgelegt von: Jonas Huch  
Duderstadt, den 26.04.2017

## Inhaltsverzeichnis

1	Abstract.....	1
2	Einleitung.....	1
3	Allgemeines über die Pyrolyse von Biomaterialien .....	2
3.1	Was ist Pyrolyse? .....	2
3.2	Wo und wie wird Pyrolyse bereits angewendet? .....	4
3.2.1	Verfahren zur Herstellung fester Energieträger aus Biomasse .....	4
3.2.2	Verflüssigung von Biomaterialien .....	5
3.2.3	Biomassevergasung .....	6
3.2.4	Bereits angewandte Pyrolyse von Herbstlaub .....	7
4	Material und Methoden.....	8
4.1	Versuch zur Messung der Gas- und Kohlemenge.....	8
4.1.1	Aufbau des Versuchs .....	8
4.1.2	Durchführung.....	8
4.2	Versuch: Messung der Flüssigkeitsmenge und Nachweis der Gasbrennbarkeit.....	9
4.2.1	Aufbau des Versuchs .....	9
4.2.2	Durchführung.....	10
5	Ergebnisse.....	10
5.1	Versuch zur Messung der Gas- und Kohlemenge.....	10
5.1.1	Beobachtungen.....	10
5.1.2	Messwerte .....	12
5.2	Versuch: Messung der Flüssigkeitsmenge und Nachweis der Gasbrennbarkeit.....	12
5.2.1	Beobachtungen.....	12
5.2.2	Messwerte .....	13
6	Diskussion und Fazit.....	13
6.1	Versuch zur Messung der Gas- und Kohlemenge.....	13
6.1.1	Deutung der Beobachtung .....	13
6.1.2	Deutung der Messergebnisse .....	14
6.2	Versuch: Messung der Flüssigkeitsmenge und Nachweis der Gasbrennbarkeit.....	15
6.2.1	Deutung der Beobachtung .....	15
6.2.2	Deutung der Messergebnisse .....	16
6.3	Fazit.....	16

7	Anhang.....	17
7.1	Daten und Berechnungen .....	17
7.2	Grafiken.....	18
7.3	Bilder des Versuchs.....	20
8	Literaturverzeichnis .....	23
9	Eidesstattliche Erklärung .....	24
10	Freigabeerklärung .....	25

## 1 Abstract

In dieser Facharbeit wird bewiesen, dass die Pyrolyse von Herbstlaub zu festen, flüssigen und gasförmigen Sekundärenergieträgern grundsätzlich möglich ist. Bemerkenswerte Ausbeuten werden aber nur bei der Verkohlung erzielt. Die Ausbeute an hochwertiger Kohle liegt bei beständiger Befeuerung, hoher Temperatur und hoher Aufheizrate bei 47,9 Gew.-% [1] der eingesetzten Biomasse. Mit qualitativ schlechterer Kohle werden sogar Verkohlungswirkungsgrade von 61,3 Gew.-% erreicht. Die Temperatur und Aufheizrate hat dabei einen großen Einfluss auf Menge und Qualität der entstehenden Kohle.

## 2 Einleitung

Jährlich fallen im Herbst erhebliche Mengen an Laub, Geäst und anderen biologischen, also auf Kohlenstoff basierenden, Abfällen an. Oftmals werden diese Abfälle einfach verbrannt, kompostiert oder auf andere Weise entsorgt. Dabei gibt es ein Verfahren, bei welchem eben dieser Abfall sinnvoll genutzt werden kann. Durch die Pyrolyse, je nach Reaktionsprodukten und Reaktionsbedingungen auch Torrefizierung, Vergasung, Verflüssigung oder Verkohlung genannt, lassen sich diese Biomaterialien zur nachhaltigen Energiegewinnung, bzw. zur Erzeugung regenerativer Energieträger nutzen.

Bei der Pyrolyse, also der thermischen Zersetzung werden die langen organischen Moleküle, bestehend größtenteils aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) [2], in kleinere Moleküle aufgespalten, wodurch eine gewisse Menge von brennbarem Gas, flüssige Bestandteile wie z.B. Teer oder Pech und ein fester Bestandteil, die Kohle, zurückbleiben. Diese Reaktionsprodukte wiederum lassen sich selbst wieder zum Heizen oder zur Stromerzeugung, z.B. in Gasmotoren oder Kohlekraftwerken, nutzen. Die Anteile der jeweils flüssigen, festen oder gasförmigen Bestandteile lassen sich maßgeblich über die Temperatur und Aufheizrate während des Prozesses regeln [3]. Ein weiterer Vorteil gegenüber fossilen Brennstoffen wie Steinkohle o.Ä. ist, dass bei dem gesamten Prozess, das heißt bei der Pyrolyse selbst wie auch bei der Verbrennung der Produkte, nur so viel CO<sub>2</sub> frei wird, wie die Pflanze vorher gebunden hat. Es handelt sich also um einen CO<sub>2</sub>- und somit klimaneutralen Prozess. Somit wird aus einem Abfallstoff eine nachhaltige Energiequelle für die Zukunft.

Die folgende Seminarfacharbeit befasst sich vornehmlich mit den Produkten der Pyrolyse von trockenem Herbstlaub in Abhängigkeit von Temperatur und Aufheizrate bei dem Zersetzungsprozess. Es werden mehrere Versuche vor allem zur Untersuchung der entstehenden Gas- und Kohlemenge durchgeführt. Ein kleiner Teilversuch befasst sich auch mit der entstehenden Flüssigkeitsmenge. Hierbei werden jeweils zwei Versuchsreihen, einmal bei hoher Temperatur und hoher Aufheizrate und einmal bei geringerer Temperatur und niedrigerer Aufheizrate durchgeführt und die entstandene Gas-, Kohle- und Flüssigkeitsmenge bestimmt. Eine weitere qualitative Untersuchung der Reaktionsprodukte findet ausdrücklich nicht statt. Lediglich das entstandene Gas wird auf seine Brennbarkeit hin untersucht. Auch die freiwerdende Prozesswärme wird nicht gemessen.

---

<sup>1</sup> Gew.-% = Anteil des Gewichts des Reaktionsprodukts am Gewicht der eingesetzten Biomasse in %

<sup>2</sup> vgl. [4], S. 10 ff.

<sup>3</sup> s. Abb. A-3

### 3 Allgemeines über die Pyrolyse von Biomaterialien

#### 3.1 Was ist Pyrolyse?

Pyrolyse (von altgriechisch pyr → Feuer und lysis → (Auf)Lösung) ist ein Teilschritt der thermo-chemischen Umwandlung von organischen, langkettigen Verbindungen durch hohe Temperaturen und unter Ausschluss von Sauerstoff. Aufgrund der Tatsache, dass in organischen Verbindungen aber oft auch Sauerstoff gebunden ist, spielen auch Oxidationsreaktionen bei der Pyrolyse von z.B. Holz (mit einem Gewichtsanteil des Sauerstoffs von ungefähr 44 % [4]) eine Rolle. Der zur Reaktion absichtlich hinzugefügte Sauerstoff, also die Luftzahl (auch Verbrennungsluftverhältnis [ $\lambda$ ] genannt [5]) ist jedoch in der Regel  $\lambda=0$ .

Die bei der Pyrolyse entstehenden Hauptprodukte lassen sich in drei Komponenten einteilen.

Als Feststoff bleibt nach einer vollständig abgelaufenen Pyrolysereaktion nur noch reiner, schwarzer Kohlenstoff zurück, dessen noch an Holz erinnernde Form es der komplexen, stark verzweigten Struktur des Lignins zu verdanken hat. Diese Kohle kann dann z.B. als Energielieferant, in der Metallindustrie als Reduktionsmittel, als natürlicher Bodenverbesserer („Terra Preta“), in qualitativ hochwertiger Form als Aktivkohle oder einfach als Grillkohle verwendet werden.

Der flüssige Teil besteht vor allem aus brennbaren, und somit als Energieträger nutzbaren Pyrolyseölen und -teeren, die wiederum aus mehreren hunderten verschiedenen Verbindungen wie diversen Alkoholen, organischen Säuren und weiteren Kohlenwasserstoffen sowie zu ungefähr 38 % aus Wasser (sowohl bereits in der Biomasse enthaltenes Wasser als auch bei der Reaktion neu entstandenem Wasser) bestehen. Diese Pyrolyseöle haben ungefähr einen pH-Wert von 1,5–3,8 sowie einen durchschnittlichen Brennwert von circa  $17,5 \frac{MJ}{kg}$  (entspricht etwa 42 % des Brennwertes von Heizöl) bei einer Dichte von  $1200 \text{ kg/m}^3$  [6]. Eine weitere Anwendung für diese flüssigen Bestandteile ist sogenannter „liquid Smoke“ in der Lebensmittelindustrie, also als flüssiges Raucharoma.

Der dritte Teil besteht aus den gasförmigen Produkten, größtenteils in Form von Wasserstoff ( $H_2$ ), Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), Kohlenstoffmonoxid ( $CO$ ) und Methan ( $CH_4$ ).

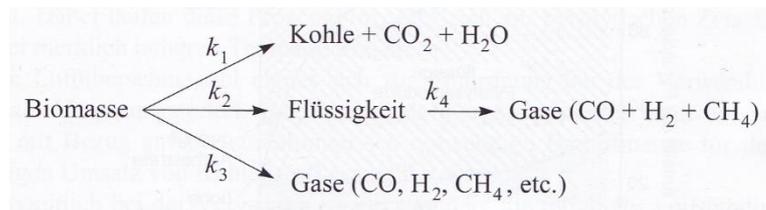


Abb.A-1: Die Produkte der Pyrolyse bzw. Vergasung ( $k_4$ ) [7]

<sup>4</sup> [4] S.10, 2.1

<sup>5</sup> [1] S.376 f.

<sup>6</sup> [1] S.684 ff.

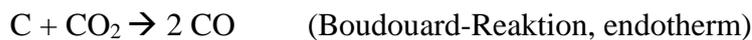
<sup>7</sup> [1] S.387

Die gesamte thermo-chemische Umwandlung läuft in mehreren Phasen ab.

Bis zu einer Temperatur in Höhe von etwa 220°C findet eine Aufheizung bzw. Trocknung des Biomaterials statt. Dieser Schritt verläuft endotherm, da zur Verdampfung des im Material enthaltenen Wassers Energie benötigt wird [8].

Der zweite Schritt ist die pyrolytische Zersetzung. Diese findet von etwa 200°C bis etwa 500°C statt und ist exotherm. Zu Beginn dieser Phase zerfallen die Molekülketten erst unter Bildung von größtenteils Wasser (H<sub>2</sub>O), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Methanol (CH<sub>3</sub>OH) bei etwa 200°C. Bis ungefähr 330°C sind circa 30 % des Biobrennstoffes zerfallen. Darüber hinaus kondensieren nun bei Raumtemperatur die entstehenden Kohlenwasserstoffverbindungen, die bereits als Pyrolyseöl erwähnt wurden. Als Feststoffe bleiben Kohle und Asche zurück.

Ab 500°C bis zu 1000°C findet die Vergasung statt. Bei diesem Schritt geht es wirtschaftlich gesehen darum, eine möglichst große Ausbeute an brennbaren Gasen zu erhalten. Damit auch die bei der Pyrolyse entstehende Kohle als gasförmiger Brennstoff nutzbar gemacht werden kann, findet dieser Reaktionsschritt mit einer Luftzahl  $0 < \lambda < 1$  statt. Folgende Reaktionen sind Bestandteil der Vergasung:



Dabei handelt es sich um dynamische, chemische Gleichgewichtsreaktionen, die sich durch Temperatur und Druckänderung beeinflussen lassen.

Der letzte Schritt der thermo-chemischen Umwandlung ist die Oxidation, das heißt die vollständige Verbrennung bzw. Reaktion mit Sauerstoff bei  $\lambda > 1$ .

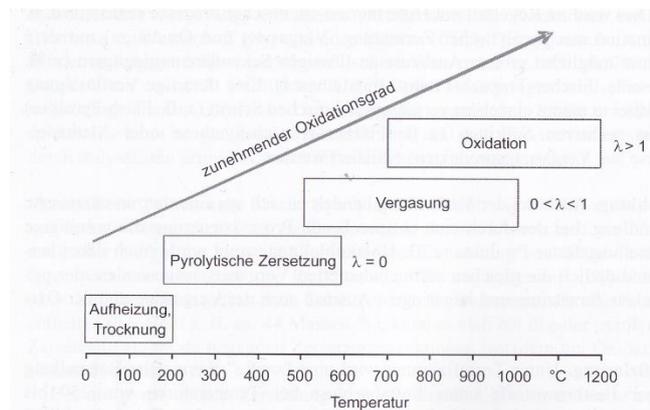


Abb.A-2: Phasen der thermo-chemischen Umwandlung von Biomaterialien [10]

<sup>8</sup> s. Anhang Abb. A-12

<sup>9</sup> vgl. [1] S.390

<sup>10</sup> [1] S.380

Biogene Festbrennstoffe bestehen primär aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin [12]. Bei der Pyrolyse von diesen Biomaterialien werden diese Biopolymere in kürzerkettige, unter Normalbedingungen meist flüssige und/oder gasförmige Kohlenwasserstoffverbindungen aufgespalten; zusätzlich fällt bei diesem Vorgang auch ein fester Rückstand (Kohle) an.

Grundsätzlich werden die Anteile der bei der Pyrolyse entstehenden Produkte sehr wesentlich von der Aufheizrate und der erreichten Temperatur bestimmt:

Je höher die Temperatur, desto mehr Gas entsteht, da die entstehenden flüssigen Pyrolyseprodukte (z.B. Teer) zunehmend in kürzerkettige Verbindungen (z.B. Methan, etc.) aufgespalten werden und Gasbildungsreaktionen (dann meist unter Zugabe von Sauerstoff; siehe Seite 3) ablaufen können.

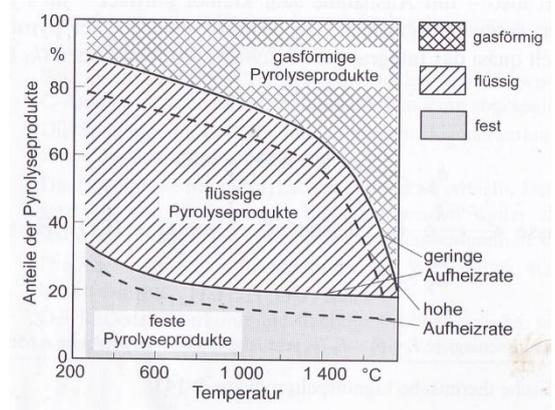


Abb.A-3: Produkte der thermo-chemischen Umwandlung von Holz in Abhängigkeit von Temperatur und Aufheizrate [11]

## 3.2 Wo und wie wird Pyrolyse bereits angewendet?

Die diversen, teilweise bereits angewendeten, sich in der Versuchsphase befindenden oder schon veralteten Pyrolyseverfahren lassen sich durch die mit ihnen herstellbaren Produkte einteilen:

### 3.2.1 Verfahren zur Herstellung fester Energieträger aus Biomasse

Bei den Verfahren zur Verarbeitung von Biomasse zu festen Energieträgern wird zwischen Verkohlung und Torrefizierung unterschieden.

Bei Letzterem handelt es sich um ein Verfahren zur Verbesserung der Verbrennungseigenschaften wie Erhöhung des Heizwertes und vollständiger Trocknung des Biomaterials durch eine milde Pyrolyse, welche bei Temperaturen von 200°C bis 300°C mit einer geringen Aufheizrate unter 50°C/min bei einer Verweilzeit von unter 60 min im Reaktor stattfindet. Allerdings ist die Torrefizierung endotherm und findet deshalb zurzeit keine Anwendung in der Industrie.

Die Verkohlung stellt eine nahezu vollständige Pyrolyse bei Temperaturen über 500°C mit dem Ziel der Produktion von Kohle aus Biomaterialien da. Das am häufigsten angewandte Verfahren hierfür ist das Meilerverfahren. Dabei wird die zur Verkohlung nötige Energie durch die Verbrennung eines Teils des Ausgangsstoffes durch kontrollierte Luftzufuhr bereitgestellt. Die durch die Verbrennung entstehenden heißen Gase werden durch die Biomasse geleitet und führen so zu dessen Verkohlung. Bei diesem Prozess entstehende Gase, Dämpfe und Flüssigkeiten werden bei dem Meilerverfahren nicht aufgefangen und gelangen in die

<sup>11</sup> [1], S. 388

<sup>12</sup> vgl. [4], S.12

Atmosphäre. Dementsprechend gefährlich für die Arbeiter und umweltbelastend ist dieses Verfahren, vor allem auch da Verkohlungen in Meilern größtenteils in Entwicklungsländern oder Ländern mit geringen Umwelt- und Sicherheitsauflagen durchgeführt wird. In diversen Regionen der Erde haben sich unterschiedliche Meilertypen wie der Erdmeiler, der gemauerte Meiler und der transportierbare, metallische Meiler entwickelt.

Eine weitere Möglichkeit der Biomasseverkohlungen ist das Retortenverfahren. Dabei wird kein Kohlgut zur Bereitstellung der für die Pyrolyse notwendige Energie verbrannt, sondern die Biomasse in einem Behälter von außen, oder beim Spülgasverfahren durch in das Biomaterial geblasene heiße Gase beheizt, wodurch eine Kohleausbeute von bis zu 30 % der eingesetzten Holzmasse möglich ist. Die Beheizung der Retorte erfolgt häufig mit den bei der Pyrolyse selbst entstehenden Gasen, was diese Form der Verkohlungen wirtschaftlich effizienter und umweltfreundlicher gestaltet, da die Abgase nicht in die Atmosphäre gelangen, sondern direkt vor Ort genutzt werden. Bei der Verkohlungen in Retorten wird zwischen der chargenweisen Retortenverkohlungen (das Befüllen, Aufheizen, die Verkohlungen und Entnahme laufen nacheinander ab) und der kontinuierlichen Retortenverkohlungen (alle Schritte laufen gleichzeitig in verschiedenen Anlagenparts ab; technisch kompliziert und deshalb erst vereinzelt umgesetzt) unterschieden. [13]

### 3.2.2 Verflüssigung von Biomaterialien

Ein weiterer sekundärer Energieträger und aus Biomasse produzierbare Rohstoffe sind die vielseitig verwendbaren Pyrolyseöle. Sie finden unter anderem als dieselähnlicher Treibstoff, „Liquid Smoke“ oder mit Koks vermischt als sogenannte „Slurry“ als Ersatz für schweres Heizöl Anwendung. Damit die Pyrolyse möglichst zu Gunsten der flüssigen Zersetzungsprodukte abläuft hat sich vor allem die Flash-Pyrolyse bewährt. Bei dieser handelt es sich, wie der Name bereits sagt, um eine sehr schnell ablaufende thermische Zersetzung mit Aufheizraten von über 1000°C/s und Verweilzeiten von unter einer Sekunde in den 450°C bis 500°C heißen Reaktoren. Dabei kommt es darauf an, die entstehenden Öle möglichst schnell aus dem System zu entfernen um einen weiteren thermischen Zerfall dieser zu verhindern. Das schnelle Abscheiden der Öle, die hohe Aufheizrate und die extrem kurze Verweilzeit werden auf verschiedenen Wegen realisiert.

Bei Wirbelschichtreaktoren [14] wird das zerkleinerte Biomaterial (Korngröße zwischen 1 mm und 3 mm) in einer heißen Wirbelschicht aus erhitztem Sand im Reaktor zersetzt. Die in der Sandwirbelschicht entstehenden flüchtigen Bestandteile werden am Kopf des Reaktors aus diesem entfernt und mithilfe eines Zyklonsystems und Wäschern gereinigt. Es wird zwischen stationärer und zirkulierender Wirbelschicht unterschieden. Dieses Verfahren erreicht eine Ölausbeute von 75% (das bei der Reaktion entstehende Wasser miteinbezogen) und findet bereits, unter anderem in Kanada mit einem Tagesumsatz von 100t (West Lorne) bzw. 200t (Guelph), Anwendung.

Weitere Reaktortypen sind solche, die mit ablativer Wirkung [15] arbeiten, das heißt die entstandenen Pyrolyseöle werden über Hitzeeinwirkung an der beheizten Reaktoroberfläche verdampft. Da die Pyrolyse nur an der Reaktoroberfläche abläuft und Aufgrund der schlechten

---

<sup>13</sup> vgl. [1] S.691 ff.

<sup>14</sup> s. Anhang Abb. A-6

<sup>15</sup> s. Anhang Abb. A-7

Wärmeleitfähigkeit der Partikel spielt deren Größe bei diesem Reaktortyp eine untergeordnete Rolle. Auf die Biomasse wirkende mechanische Kräfte können die Ablation unterstützen. So gibt es Reaktortypen bei denen die Biomasse mit ungefähr 30bar auf die Oberfläche einer rotierenden, heißen Scheibe gedrückt wird. Diese Technik wurde aber nur im Pilotmaßstab (6 t/d) umgesetzt.

Das Doppelschneckenverfahren [16] wird in einer weiteren Reaktorbauart durchgeführt, bei welcher das zerkleinerte Biomaterial mit heißem Sand vermischt durch ein beheiztes Doppelschneckensystem gefördert wird. Am Ende der Doppelschnecken tritt der Sand zusammen mit dem Pyrolyseöl und der Kohle aus. Das bei der Pyrolyse entstehende Gas wird während des Prozesses aus der Schnecke entnommen und zum Heizen des Sandes verwendet. Häufig wird das nach dem Doppelschneckenverfahren gewonnene Pyrolyseöl mit dem ebenfalls dabei entstehenden Koks zu einer sogenannten Slurry vermischt, welche z.B. als Ersatz für schweres Heizöl genutzt werden kann. Mit diesem Verfahren können Ausbeuten von 40 % bis 70 % an Pyrolyseöl und 15 % bis 40 % Pyrolysekoks erreicht werden. [17]

### 3.2.3 Biomassevergasung

Über die Verkohlung und Verflüssigung von Biomasse hinaus besteht auch die Möglichkeit Biomaterialien zu Vergasen. Wie bereits in „Grundlagen der Pyrolyse“ erwähnt, stellt die Vergasung einen teilweise über die eigentliche Pyrolyse hinausgehenden Prozess dar, bei welchem unter Sauerstoffzufuhr ( $0 < \lambda < 1$  meist 0,2-0,5) möglichst viel brennbares Gas entsteht. Die am meisten verbreitete Variante der Biomasse- aber vor allem Holzvergasung ist der von George Imbert in den 1930er und 1940er Jahren entwickelte Imbert-Generator mit einem Vergasungswirkungsgrad von bis zu 90%. Die Entwicklung und Anwendung solcher Vergaser lohnte sich jedoch nur in Zeiten, in denen andere Brennstoffe zu knapp waren, wie z.B. im und nach dem zweiten Weltkrieg (wo der sogenannte „Einheitsgenerator“ unter anderem in der Landwirtschaft eingesetzt wurde [18]), sowie während der Ölkrise in den 1970er Jahren. In einem solchen Vergaser fanden Trocknung, Pyrolyse, Oxidation und Reduktion in verschiedenen Reaktorzonen gleichzeitig statt. Die wichtigsten Festbettreaktoren, das heißt Vergaser die im Gegensatz zu Fließbettreaktoren (auf welche in dieser Arbeit nicht genauer eingegangen wird) ohne Wirbelschicht aufgebaut sind, werden in Gleichstromvergaser, Gegenstromvergaser und Querstromvergaser [19] unterteilt.

Bei dem ersten Generatortyp gelangt das Biomaterial, wie auch bei den beiden anderen Typen, von oben in den Reaktor in die Trocknungszone. Unter der Trocknungszone befindet sich der Pyrolysebereich des Vergasers, in welchem die Molekülketten in gasförmige und flüssige Pyrolyseprodukte aufgespalten werden. Diese gelangen zusammen mit der übriggebliebenen Biomasse in die Oxidationszone, die bei diesem Reaktortyp bei einer Temperatur von 800°C bis 1300°C arbeitet. Beim Gleichstromvergaser wird die Luft seitlich in diese Zone, welche auch die nötige Energie für Trocknung und Pyrolyse liefert, eingeblasen. Durch diese zusätzliche Sauerstoffzufuhr wird auch die übrig gebliebenen Kohle zum Teil oxidiert, sodass sie ebenfalls in gasförmiger Form zusammen mit dem bei der Pyrolyse entstehenden Gas am

---

<sup>16</sup> s. Anhang Abb. A-8

<sup>17</sup> vgl. [1] S.671 ff.

<sup>18</sup> s. Anhang Abb. A-10

<sup>19</sup> s. Anhang Abb. A-9

Reaktorboden durch die Reduktionszone abgesogen werden kann. Von der eingespeisten Biomasse verbleibt also nur Asche (mineralische Rückstände) im Reaktor.

Der Gegenstromvergaser ist ähnlich wie der Gleichstromvergaser aufgebaut, nur dass bei dieser Bauweise die Luft von unten in den Reaktor gelangt und das Gas am Reaktorkopf entnommen wird. Die Oxidationszone befindet sich deshalb unter der Reduktionszone als erste Zone über dem Ascherost. Das bietet den Vorteil, dass das Pyrolysegas seine thermische Energie an das darüber liegende Biomaterial abgeben kann und der Gegenstromvergaser somit effizienter arbeitet. Ein Nachteil ist jedoch, dass mit dem Gas, dadurch dass es durch das unverkohlte Biomaterial geleitet wird, auch Wasserdampf und Teere aus dem Generator entweichen, welche das Gas verunreinigen.

Beim Querstromvergaser wird die Luft wie beim Gleichstromvergaser seitlich eingeleitet. Das Gas wird aber auf gleicher Höhe auf der anderen Seite des Reaktors wieder abgesogen. Oxidations- und Reduktionszone sind dementsprechend klein und die Spaltung der Schwelprodukte dementsprechend gering. Der Betrieb eines solchen Querstromvergasers erfolgt deshalb häufig mit bereits vorverkohlenen Materialien wie Holzkohle. Vorteile sind allerdings die einfache Bauweise und geringe Größe weshalb dieser Reaktortyp auch häufig zum Betrieb von Fahrzeugen verwendet wurde. [20]

### 3.2.4 Bereits angewandte Pyrolyse von Herbstlaub

Die oben genannten Verfahren beziehen sich vor allem auf die Pyrolyse von Holz, da diese sich oft einfacher und wirtschaftlicher gestaltet als die Pyrolyse anderer Biomaterialien wie z.B. die thermische Zersetzung von Laub. Eine Forschergruppe der Universität Kassel unter Prof. Dr. Michael Wachendorf, dem Leiter des Fachgebiets Grünlandwissenschaften und nachwachsende Rohstoffe, befasst sich nun aber auch in dem „Re-Direct“ genannten Projekt mit einem Verfahren zur Weiterverarbeitung von Biomaterialien aus Parks und von Straßenrändern zu Aktivkohle mittels der Pyrolyse. Die Aktivkohle sei z.B. in Klärwerken einsetzbar um komplexe chemische Bestandteile wie Medizinrückstände aus dem Abwasser zu filtern. Wachendorf und seine Forschergruppe wollen in ihrem durch die EU geförderten Projekt eher kleinere, dezentrale, aber wirtschaftlich arbeitende Anlagen für die Herstellung von Aktivkohle aus sonst als Abfall entsorgtem Biomaterial entwickeln. Sie betreiben bereits eine städtische Bio- und Aktivkohle produzierende Anlage in Baden-Baden sowie eine kleinere in Wales (UK) [21]. Das genaue Verfahren bzw. die Funktionsweise dieser Anlagen wurde noch nicht veröffentlicht.

---

<sup>20</sup> vgl. [2] S.153 ff.

<sup>21</sup> [5]

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Versuch zur Messung der Gas- und Kohlemenge

#### 4.1.1 Aufbau des Versuchs

Der Versuch besteht aus einem besonders hitzebeständigen Reagenzglas, welches von einem Stativ leicht schräg gehalten wird. Dieses Reagenzglas wird mit einem Stopfen verschlossen, aus welchem eine Glasleitung herausführt. Diese Glasleitung knickt, kurz nachdem sie aus dem Reagenzglas kommt, steil nach unten ab und endet mit einem zweiten Bogen kurz über dem Boden des größeren Becherglases. Dieses ist mit Wasser gefüllt. In dem Glas befindet sich ein zweites, etwas kleineres, umgedrehtes Becherglas. Im Zentrum der beiden Bechergläser befindet sich die Öffnung des Glasröhrchens, sodass das entweichende Gas sich im kleineren Becherglas sammeln kann. Aus diesem führt ein transparenter Gummischlauch heraus. Die Öffnung dieses Gummischlauches sollte sich möglichst nah am Boden des zweiten Becherglases befinden, darf von diesem aber nicht verschlossen werden. Das andere Ende des Schlauches befindet sich

außerhalb beider Bechergläser und mündet in einem Glasventil. An der anderen Seite des Ventils befindet sich ein weiteres, kürzeres Stück Schlauch, an dessen Ende eine 60 ml Spritze angeschlossen wird. Um den Versuch durchzuführen wird darüber hinaus noch ein Gasbrenner zum Aufheizen des Laubes im Reagenzglas benötigt. [22]

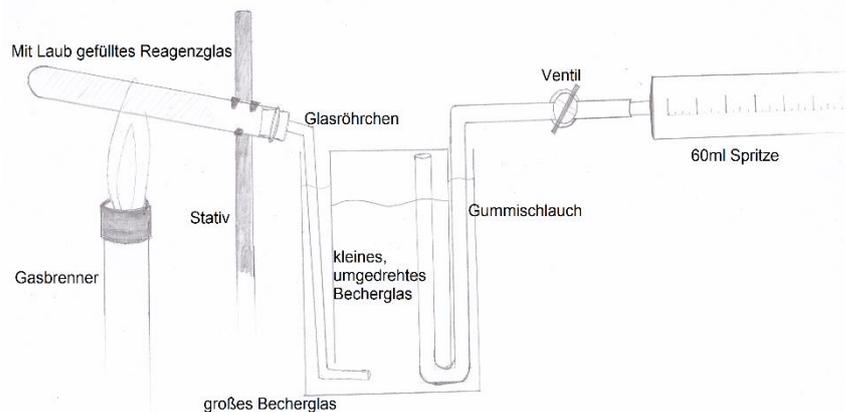


Abb. A-4: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gas- und Kohlemenge

#### 4.1.2 Durchführung

Im Herbst werden heruntergefallene Blätter verschiedener Bäume, Sträucher und anderer Pflanzen gesammelt und zum Trocknen an einem möglichst warmen und trockenen Ort ausgelegt. Es werden pro Durchgang 2 g Laub in das Reagenzglas gefüllt. Mit Hilfe der Spritze wird nun die sich im Versuchsaufbau befindende Luft entfernt. Für die erste Durchführung wird bei dem Gasbrenner die Gas- und Luftzufuhr nun so weit geöffnet, bis der Brenner annähernd auf voller Leistung läuft. Der heißeste Punkt in der Brennerflamme wird nun sofort

an das mit dem Laub befüllte Reagenzglas gehalten und dort langsam nach rechts und links bewegt. So wird eine hohe Aufheizrate und hohe Temperatur erzielt. Unter diesen Bedingungen sollte sich bei der Reaktion so eine möglichst große Gasmenge bilden [23]. Wenn sich der gesamte Reagenzglasinhalt schwarz gefärbt hat und in den Bechergläsern nur noch sehr wenige Gasblasen aufsteigen, wird der Brenner ausgeschaltet und die Öffnung des Glasröhrchens, sobald etwas Wasser angesogen wurde, aus dem Wasser entfernt. Bis zur Bestimmung der Gasmenge wird nun einige Minuten gewartet, damit das Gas die gleiche Temperatur wie das umgebende Wasser hat. Die Wassertemperatur wird dann gemessen, um die tatsächliche Gasmenge später berechnen zu können. Zum Messen des Gasvolumens wird die 60 ml Spritze an das Schlauchende gesteckt, das Gas angesogen, das Volumen abgelesen und die Spritze entleert [24]. Dies wird so lange wiederholt bis sich im Becherglas und im Schlauch kein Gas mehr befindet und die gemessenen Gasvolumina addiert. Nach der Durchführung wird der Versuchsaufbau gereinigt. So wird dieser Versuch 5 Mal durchgeführt.

Dieselbe Durchführung wird weitere 5 Mal, jedoch bei geringer Aufheizrate und bei niedrigerer Temperatur durchgeführt. Hierzu wird der Brenner nach dem Einschalten nicht auf volle Leistung gebracht, sondern lediglich die Gas- und Luftzufuhr nur so weit geöffnet bis gerade noch eine konstante, rauschende Brennerflamme vorliegt. Der Brenner wird nun langsam dem Reagenzglas angenähert und das darin befindliche Laub so lange erhitzt, bis sich der gesamte Reagenzglasinhalt schwarz gefärbt hat.

## 4.2 Versuch zur Messung der entstehenden Flüssigkeitsmenge und Nachweis der Brennbarkeit des Pyrolysegases

### 4.2.1 Aufbau des Versuchs

Der Versuch zur Messung der sich bei der Reaktion bildenden Flüssigkeitsmenge besteht aus einem Reagenzglas, welches mit der Öffnung leicht schräg nach unten gekippt an einem Stativ befestigt wird. Die Öffnung des Reagenzglases ist mit einem Gummistopfen mit Loch fest verschlossen. In diesem steckt ein um rechtwinklig nach unten abknickendes Glasröhrchen. Auf dem anderen Ende des Glasröhrchens steckt ein weiterer Gummistopfen, der sich in einem zweiten Reagenzglas befindet. Dieses wird in einem mit kaltem Wasser gefüllten Becherglas gekühlt. Der Stopfen besitzt eine zweite Öffnung, in welcher sich ein nach oben verengendes Glasröhrchen befindet. In diesem steckt im Inneren etwas Stahlwolle, sodass das Gas noch entweichen kann, der Rückschlag

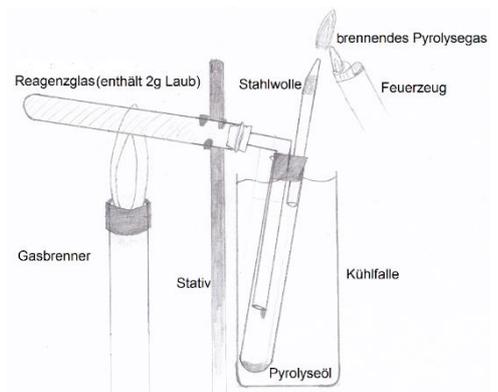


Abb. A-5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Flüssigkeitsmenge und zum Nachweis der Brennbarkeit des Pyrolysegases

<sup>23</sup> vgl. Abb. A-3

<sup>24</sup> s. Anhang F-5

von Funken bei der Brennbarkeitsüberprüfung des Gases aber verhindert wird. [25]

#### 4.2.2 Durchführung

Wie im Versuch zur Messung der Gasmenge werden pro Durchgang jeweils 2 g des getrockneten Herbstlaubes in das Reagenzglas gefüllt und leicht verdichtet. Der Brenner wird nun entzündet und bei annähernd maximaler Leistung und voll geöffneter Luftzufuhr sofort mit der heißesten Stelle der Flamme an das hitzebeständige Reagenzglas mit dem Laub gehalten und nach links und rechts bewegt, um das Herbstlaub gleichmäßig bei hoher Aufheizrate und hoher Temperatur zu erhitzen. Die bei der Pyrolyse entstehenden Flüssigkeiten entweichen bei der Reaktion in gasförmiger Form, als Rauch oder auch als Dampf, aus dem Reagenzglas und kondensieren in der Kühlfalle. Das entstehende Gas entweicht durch das sich nach oben verengende Glasröhrchen in die Umgebung. An der Spitze dieses Glasröhrchens wird während des laufenden Versuches die Brennbarkeit des Gases untersucht. Dafür wird eine Feuerzeugflamme an das austretende Gas herangeführt und beobachtet, ob und wie das Gas brennt. Nachdem sich der Reagenzglasinhalt schwarz gefärbt hat, wird der Brenner abgeschaltet. Die entstehende Flüssigkeit wird mit einer 1 ml Spritze, deren Skala auf einen hundertstel Milliliter genau ablesbar ist, aus dem Reagenzglas entnommen und die Flüssigkeitsmenge bestimmt. Die Flüssigkeit wird außerdem auf Geruch und Aussehen untersucht. Dieser Versuch unter hoher Temperatur und Aufheizrate wird dreimal durchgeführt. Eine Versuchsreihe mit niedriger Temperatur und geringerer Aufheizrate wird, wie die Brennerhandhabung in der Durchführung des Versuches zur Messung der Gas- und Kohlemenge beschrieben, ebenfalls dreimal durchgeführt.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Versuch zur Messung der Gas- und Kohlemenge

#### 5.1.1 Beobachtungen

Bei der Versuchsdurchführung, bei welcher das getrocknete Laubwerk mit einer hohen Aufheizrate und maximaler Brenntemperatur thermisch zersetzt wurde, war zu beobachten, dass sich in dem Reagenzglas sofort bei dem ersten Kontakt mit der Brennerflamme im inneren ein leichter, weißlich-transparenter Dampf gebildet hat, ohne dass das Laub irgendwelche Anzeichen einer Pyrolyse gezeigt hat. Nach etwa 10-20 s waren erste, klare Gasbläschen im Wasserbad zu beobachten, von denen etwa eines pro Sekunde aus dem Glasröhrchen in das umgedrehte Becherglas aufstieg. Darauf folgte ein dicker, weißlich-gelblicher Dampf bzw. Rauch, der durch das Glasröhrchen entströmte. Ein Teil dieses Dampfes kondensierte bereits als bräunliche Flüssigkeit in dem Röhrchen und lief in das große Becherglas hinein. Der Rest dieses Dampfes/Rauches verblieb vorerst entweder im Reagenzglas oder gelangte mit den Gasbläschen in die sich bereits im kleineren Becherglas bildende Gasblase und kondensierte

---

<sup>25</sup> s. Anhang F-6  
J. Huch

später dort bzw. lagerte sich als dünne Partikelschicht [26] auf der Wasseroberfläche ab. Teile dieses Dampfes lösten sich aber auch bereits beim Aufsteigen der kleinen Gasblasen im Wasser, was daran zu beobachten war, dass die Gasbläschen im oberen Teil des Becherglases durchsichtiger waren als die unteren Bläschen. Dabei färbten die Flüssigkeitstropfen das Wasser leicht gelblich-bräunlich [27] und verliehen ihm einen rauchigen, verkohlten Geruch. Auch die Blätter zeigten nun deutliche Anzeichen einer thermo-chemischen Zersetzung. Sie waren alle bereits mindestens an den Blattspitzen verkohlt oder schon komplett chemisch zerfallen, sodass nur noch die dickeren Laubbestandteile eine dunkelbraune Färbung aufwiesen, wohingegen vom restlichen Teil nur noch das Kohlenstoffgerüst zurückgeblieben ist. Während und kurz nach der Phase in der der gelbliche Rauch und/oder Dampf aufstieg, war eine sehr rasche Gasbildung zu beobachten in welcher etwa 10 Blasen in der Sekunde aufstiegen. Während dieser Phase liefen auch einige Tropfen einer bräunlichen Flüssigkeit durch das Glasröhrchen in das Wasser. Nach etwa 1,5 Minuten Laufzeit des Versuches nahm die Gasbildung wieder langsam ab. Gelblicher, dichter Dampf war nun nicht mehr zu beobachten und die aufsteigenden Gasbläschen waren klar und durchsichtig. Nach etwa zweieinhalb Minuten war die Gasbildung auf wenige, etwa 1-3 Bläschen pro Sekunde zurückgegangen. Das sich im Reagenzglas befindende Herbstlaub war nun vollständig verkohlt. In der tiefschwarzen Kohle befanden sich keine unverkohlten Stücke des Ausgangsmaterials mehr [28]. In dem kleineren Becherglas befand sich nun in der Gasblase ein dünner Nebel, der sich nach kurzer Zeit aber gelegt hatte. Auf der Wasseroberfläche schwimmend war im Reagenzglas darüber hinaus noch eine dünne Partikelschicht zu beobachten. Das Wasser selbst hatte nach dem Versuch eine leicht gelbliche Farbe und einen stechenden, verbrannten Geruch.

Als dieser Versuch bei niedriger Aufheizrate und geringerer Temperatur durchgeführt wurde, war nur eine sehr schwache bis keine Rauch- oder Dampfentwicklung während des gesamten Versuches zu beobachten. Auch die Gasentwicklung war deutlich geringer. Es entstand insgesamt weniger Gas, aber auch die Reaktionsgeschwindigkeit der gasbildenden Zerfallsreaktionen war sichtbar kleiner als bei der Durchführung mit hoher Temperatur und Aufheizrate. Maximal stiegen bei diesem Versuch nur etwa 3-4 Gasbläschen pro Sekunde in das kleine Becherglas auf. Darüber hinaus war nur eine sehr geringe Menge aus dem Reagenzglas fließende Flüssigkeit zu beobachten, weshalb auch das Wasser nach der Versuchsdurchführung im Vergleich zur ersten Durchführung einen weniger stark stechenden Geruch hatte und nur eine blass gelbfärbung aufwies. Außerdem war auch keine Partikelschicht auf der Wasseroberfläche erkennbar. Nach dem Versuch waren im leicht schräg gekippten Reagenzglas in der direkten Nähe des Stopfens noch eine Ansammlung weniger Tropfen einer bräunlichen, verschwelt riechenden Flüssigkeit zu sehen. Der Kohleanteil war in dieser Versuchsreihe deutlich größer als in der Vorherigen. Die Kohle war jedoch nicht so schwarz wie jene in der Durchführung bei hoher Temperatur und Aufheizrate, sondern wies noch nicht vollständig verkohlte Blattteile mit dunkelgrauer bis leicht bräunlicher Färbung im Zentrum des Reagenzglases auf.

---

<sup>26</sup> s. Anhang F-3

<sup>27</sup> s. Anhang F-4

<sup>28</sup> s. Anhang F-2

### 5.1.2 Messwerte

Mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau zur Messung der Gas- und Kohlemenge wurden aus 2 g getrocknetem Herbstlaub bei großer Aufheizrate und hoher Temperatur im Durchschnitt 170,2 ml brennbares Pyrolysegas erzeugt. Die gemessenen Werte weichen im Schnitt um 19,7 ml von diesem Wert ab.

An festen Pyrolyseprodukten, also Kohle, verblieben bei dieser Versuchsdurchführung im Durchschnitt  $0,958 \text{ g} \pm 0,098 \text{ g}$  von 2 g eingesetzter Biomasse im Reagenzglas. [29]

Bei der Durchführung mit niedrigerer Temperatur sowie Aufheizrate entstanden im Durchschnitt  $1,23 \text{ g} \pm 0,152 \text{ g}$  Kohle, die jedoch kleinere, teilweise nicht komplett verkohlte Bestandteile enthielt.

Das mittlere Ergebnis bei der Messung des Pyrolysegases lag, die jeweilige Gastemperatur der Einzelwerte mit einbezogen, bei  $104,6 \text{ ml} \pm 7,81 \text{ ml}$ . [30]

## 5.2 Versuch zur Messung der entstehenden Flüssigkeitsmenge und Nachweis der Brennbarkeit des Pyrolysegases

### 5.2.1 Beobachtungen

Wie im Versuch zur Messung der Kohle- und Gasmenge war auch in dieser Durchführung zur Bestimmung der Flüssigkeitsmenge bei einer hohen Aufheizrate und Temperatur sofort nach dem ersten Kontakt mit der Brennerflamme ein dünner weißlicher Dampf im Reagenzglas sichtbar. Dieser wurde mit dem ersten entstehenden Gas in die Kühlfalle transportiert und kondensierte dort an den Reagenzglaswänden. Nach etwa 40 s folgte auch in diesem Versuch der dicke weißlich-gelbliche Dampf bzw. Rauch, welcher ebenfalls in das zweite Reagenzglas strömte. Ein Teil dieses Dampfes kondensierte in dem gekühlten Reagenzglas. Während der Phase, in der sich im Versuch zur Messung der Gas und Kohlemenge bei hoher Aufheizrate und Temperatur große Gasmengen bildeten, wurde der andere Teil dieser Dämpfe und des Rauches durch das sich zum Ende verengende Glasröhrchen ausgeblasen. Das an der Glasspitze austretende Gas entzündete sich bei der ersten Berührung mit der Flamme eines Feuerzeuges sofort und brannte, solange die Zündquelle in der Nähe war, mit einer hellen, gasfeuerzeugähnlichen Flamme. Wurde die Flamme des Feuerzeuges entfernt, hörte auch das austretende Gas fast sofort auf zu brennen. Mit der Flamme verbrannten auch alle austretenden Dämpfe, die nicht in der Kühlfalle kondensiert sind. Nachdem das gesamte Laub verkohlt war, war nach dem Abkühlen im zweiten Reagenzglas eine dunkle, trübe, bernsteinfarbene bis tiefbraune Flüssigkeit zu sehen [31]. Diese roch stark verschwelt nach Rauch bzw. verbrannt oder verkohlt. In dem ersten Reagenzglas hat sich ebenfalls wie im Versuch zur Bestimmung der Gas und Kohlemenge eine kleine Ansammlung von flüssigen Pyrolyseprodukten befunden. Die Kohle war sehr dunkel und wies keine unverkohlten Rückstände auf.

---

<sup>29</sup> s. Anhang B-1

<sup>30</sup> s. Anhang B-2

<sup>31</sup> s. Anhang F-7

Bei der Durchführung mit niedrigerer Temperatur und Aufheizrate war ebenfalls ähnliches zu beobachten wie bei dem Versuch zur Messung der Gasmenge unter eben diesen Bedingungen. Es entstand annähernd kein dichter weißlich-gelblicher Qualm und weniger Gas, da die in die Kühlfalle gelangenden Dämpfe kondensiert sind und sich nur langsam mit dem Gasstrom in Richtung des dünnen Glasröhrchens bewegt haben. Außerdem ist die mit dem Feuerzeug entzündete Gasflamme fast sofort wieder erloschen. Die während des Versuchs in der Kühlfalle gesammelte Flüssigkeit war in dieser Versuchsreihe deutlich klarer bzw. heller und durchscheinender. Sie wies nur eine leichte Gelbfärbung auf und roch weniger verbrannt und rauchig. Die Kohle war an einigen Stellen in der Mitte des Reagenzglases nicht vollständig verkohlt, sondern noch dunkelbraun bis grau.

## 5.2.2 Messwerte

Der Versuch zur Messung der entstandenen Flüssigkeitsmenge hat, wenn er bei hoher Temperatur und Aufheizrate durchgeführt wurde, im Durchschnitt 0,256 ml Pyrolyseöl geliefert. Die einzelnen Messwerte lagen im Schnitt 0,04 ml unter bzw. über diesem Wert. Das entspricht  $12,83 \pm 1,93 \%$ , wenn bei der Flüssigkeit von der Dichte  $\rho=1$  ausgegangen wird, da sie einen Großteil Wasser enthält und die unterschiedlichen Dichten der diversen Kohlenwasserstoffverbindungen nicht berücksichtigt werden können. Diese Werte sind jedoch, da wie in 5.2.1 erwähnt ein Teil der Flüssigkeit nicht aufgefangen werden konnte, nicht verlässlich nicht aussagekräftig. [32]

In der zweiten Durchführungsweise dieses Versuchsaufbaus bei niedrigerer Temperatur und geringerer Aufheizrate wurden im Mittel 0,3 ml Pyrolyseöl aufgefangen. Wenn wieder von einer Dichte von  $\rho=1$  ausgegangen wird, entspricht dieser Wert 15,6 % des Gewichts der eingesetzten Biomasse. Im Durchschnitt weichen die einzelnen Versuchsergebnisse um 1,69 % vom Mittelwert ab. [33]

## 6 Diskussion und Fazit

### 6.1 Versuch zur Messung der Gas- und Kohlemenge

#### 6.1.1 Deutung der Beobachtung

In den Versuchsdurchführungen mit hoher Aufheizrate sowie bei hoher Temperatur war bei dem ersten Kontakt des Reagenzglases mit der Brennerflamme immer wieder ein leichter, weißlicher, vom Laub ausgehender, Dampf zu beobachten. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um die letzte im Blattwerk enthaltene Feuchtigkeit, die aufgrund der steigenden Hitze verdampft. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Biomasse zu diesem Zeitpunkt in der Phase der Trocknung bzw. in der Aufheizphase befindet. Ein eindeutiges Zeichen für den Beginn der Pyrolyse ist der entstehende dicke weißlich-gelbliche Dampf,

---

<sup>32</sup> s. Anhang B-3

<sup>33</sup> s. Anhang B-4

welcher aus den ersten Pyrolyseprodukten des Laubes wie diversen Kohlenwasserstoffen und Prozesswasser besteht, sowie die ersten verkohlten Stellen an den Blattspitzen. Die darauf einsetzende beschleunigende Gasentwicklung ist ebenfalls ein Anzeichen für den beginnenden thermo-chemischen Verfall des Biomaterials. Dass ein Teil des Dampfes bereits im Glasröhrchen kondensiert, während der Rest mit dem entstandenen Gas in das kleinere Becherglas entweicht, bzw. sich in den aufsteigenden Gasbläschen im Wasser löst, lässt sich durch die unterschiedlichen Siedepunkte der vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen erklären. Diese sind es auch, die dem Wasser die Gelbfärbung und den rauchig-verbrannten Geruch (vergleiche „Liquid Smoke“ in 3.1 „Was ist Pyrolyse?“) verleihen. Die thermische Zersetzung des Herbstlaubes hat kurz darauf ihren Höhepunkt erreicht, was aus der nun sehr rasanten Gasbildung zu schließen ist. Die Ursache der sich anschließend wieder verringernenden Gasbildung ist der Mangel an weiterem zur Verfügung stehenden Biomaterial. Dessen nun tiefschwarze Farbe lässt auf eine vollständig abgelaufene Pyrolyse und eine qualitativ hochwertige Kohle schließen. Der nach dem Versuch in der Gasblase stehende dünne Nebel besteht sehr wahrscheinlich aus Kohlenwasserstoffen mit niedrigerem Siedepunkt, die sich durch weitere Abkühlung auf Umgebungstemperatur wieder verflüssigen, sowie Rauchpartikeln, welche ohne Gasbewegung auf die Wasseroberfläche herabsinken und dort zusammen mit den schon im Wasser schwimmenden festen Teilchen eine sehr dünne Partikelschicht bilden.

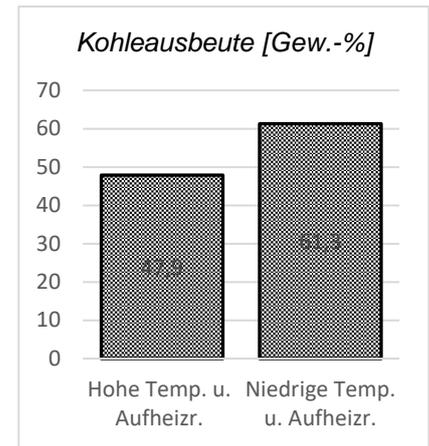
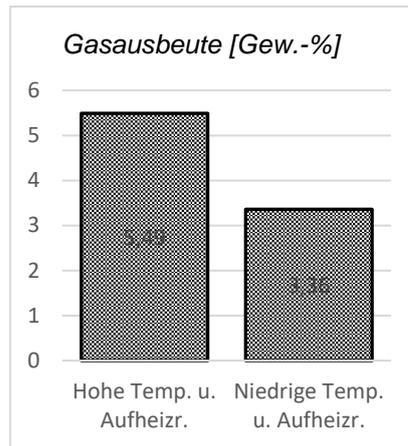
Bei niedrigerer Temperatur und geringerer Aufheizrate war annähernd keine Dampf- oder Rauchentwicklung zu beobachten, was den gleichen Grund hat wie die langsamere Gasbildung: Die Zerfallsreaktion und das Verdampfen des Wassers liefen durch die geringere hinzugefügte thermische Energie insgesamt nicht so schnell ab wie bei der ersten Durchführung. Das heißt, es ist zwar z.B. die gleiche Menge an enthaltener Restfeuchtigkeit, sprich Wasser, verdampft, jedoch in einem größeren Zeitraum, weshalb dieser Vorgang nicht so auffällig war. Was bei dieser Durchführung ebenfalls nur schwer zu beobachten war, waren Pyrolyseöltropfen, die durch das Glasröhrchen geflossen sind. Das lässt sich durch die nicht so rasante Gasbildung erklären, welche bei dem Versuch mit hoher Temperatur für das Herausfließen verantwortlich war, denn die Flüssigkeitsansammlung vor dem Stopfen des ersten Reagenzglases war auch bei der weniger stark beheizten Durchführungsweise des Versuchs vorhanden. Die nicht so tiefschwarze Färbung der Kohle deutet auf eine schlechtere Qualität dieser hin, da die Pyrolyse nicht vollständig abgelaufen ist und die Kohle somit noch eine Restmenge an Kohlenstoffverbindungen enthält. Die nicht gänzlich abgelaufene Pyrolyse hat sicher auch einen Einfluss auf die geringere Gasmenge, der aber in die Messungen nicht mit einbezogen werden konnte.

### 6.1.2 Deutung der Messergebnisse

Im Durchschnitt konnten mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau 47,9 Gew.-% qualitativ hochwertige Kohle bei hoher Aufheizrate und Temperatur und sogar 61,3 Gew.-% Kohle bei niedrigerer Aufheizrate und Temperatur gewonnen werden. Die Kohleausbeuten liegen beide deutlich über den 25 % eines Meilers und auch über den mehr als 30 % einer Retorte. Die entstandenen Gasmengen liegen mit 5,49 Gew.-% bei hoher Aufheizrate und Temperatur und 3,36 Gew.-% bei niedriger Temperatur und Aufheizrate jedoch sehr deutlich unter den z.B. von

Imbert-Gleichstromvergaser erreichen Vergaserwirkungsgrad von 90 % [34]. Allerdings wurden in dem in dieser Facharbeit genutzten Versuchsaufbau auch kein zusätzlicher Sauerstoff hinzugeführt, was die bei den Vergasern erwünschte Reaktion der Kohle zu Kohlenstoffmonoxid

(CO) verhinderte und damit die Gasausbeute drastisch reduzierte. Auch wurden in diesem Versuch keine Temperaturen von 800°C bis 1300°C erreicht, wie sie z.B. im Imbert-Gleichstromvergaser vorherrschen [35]. Um genauere Werte für die eigentliche Vergasung, wie sie in 3.1 erwähnt wird, zu bekommen, müsste das Herbstlaub in einem Versuchsaufbau mit genau geregelter Sauerstoffzufuhr sowie genauerer Temperaturregelung durchgeführt werden.



## 6.2 Versuch zur Messung der entstehenden Flüssigkeitsmenge und Nachweis der Brennbarkeit des Pyrolysegases

### 6.2.1 Deutung der Beobachtung

Der sofort entstandene Dampf hatte in diesem Versuch sicherlich denselben Ursprung wie im Versuch zur Messung der Gas- und Kohlemenge: die im Laub enthaltene Restfeuchtigkeit ist verdampft. Von dem folgenden dicken, weißlich-gelben Dampf bzw. Rauch ist nur ein Teil kondensiert, was an der rasch ablaufenden Gasbildung lag. Durch entstehende Gase wurden die Kohlenwasserstoffdämpfe aus der Kühlfalle ausgeblasen und lagen dann nicht mehr zur Messung vor, weshalb dieser Versuch bzw. Versuchsaufbau keine verlässlichen, wissenschaftlich begründeten Ergebnisse bezogen auf die entstandene Flüssigkeitsmenge lieferte. Was aber bewiesen wurde ist, dass das entstandene Pyrolysegas brennbar ist. Auch dass die bei der Pyrolyse entstandenen Dämpfe brennbar sind konnte bewiesen werden, da diese zusammen mit dem austretenden Gas verbrannt sind. Die beobachteten Eigenschaften der aufgefangenen Flüssigkeit sind wegen der entwichenen Flüssigkeitsbestandteile ebenfalls nicht verlässlich. Dessen dunkle Farbe und intensiver Geruch deutet aber auf einen geringen Wasseranteil hin. Die Kohle war, wie auch im anderen Versuch unter gleichen Umgebungsbedingungen, tiefschwarz und damit qualitativ hochwertig.

Bei der Durchführung mit niedrigerer Temperatur und Aufheizrate ist kein oder nur sehr wenig Dampf oder Rauch entwichen, da die Reaktion durch die geringere Hitzezufuhr langsamer ablief und die Dämpfe so eine längere Verweilzeit in der Kühlfalle hatten. Die deutlich höhere Transparenz und Helligkeit der Flüssigkeit sowie der weniger strenge Geruch sind ein

<sup>34</sup> [2], S.160 ff.

<sup>35</sup> [2], S.160 ff.

Anzeichen für einen höheren Wasseranteil des Pyrolyseöls. Die in der Reagenzglasmitte noch teilweise unverkohlten Blatteile sind ein Indiz für eine nicht vollständig abgelaufene Pyrolyse und damit für eine Kohle minderer Qualität.

### 6.2.2 Deutung der Messergebnisse

Da die in dem bei hoher Temperatur und Aufheizrate durchgeführten Versuch gewonnenen Messwerte aufgrund der entwichenen Flüssigkeitsmengen nicht verlässlich sind, lassen sie sich nicht mit in der Literatur genannten Werten von z.B. der Flash-Pyrolyse von Holz vergleichen, bzw. würde der Vergleich damit ebenfalls unbrauchbare Ergebnisse liefern.

Bei niedrigerer Temperatur und Aufheizrate wurden verlässlichere Werte für die Flüssigkeitsmengen erhalten. Diese liegen mit maximal 18 Gew.-% jedoch, ähnlich wie die gemessenen Gasmengen, deutlich unter in der Literatur findbaren Ausbeuten von etwa 70 % [36]. Diese geringe Ausbeute liegt daran, dass der Versuchsaufbau nicht allein der Biomasseverflüssigung dienen konnte. Die Flash-Pyrolyse im Versuch zu nachzubilden wäre deutlich zu kompliziert. Um Aufheizraten von 1000°C/s und Verweilzeiten von <1 s zu realisieren ist ein weitaus größerer Aufwand nötig, als er im Rahmen einer Facharbeit umsetzbar wäre. Ob Herbstlaub wirtschaftlich sinnvoll durch die Pyrolyse in Flüssigkeit umwandelbar ist, würde genauere Untersuchungen voraussetzen.

### 6.3 Fazit

Herbstlaub mithilfe der Pyrolyse in Flüssigkeit oder Gas umzusetzen ist, wie die in dieser Facharbeit durchgeführten Versuche gezeigt haben, möglich. Denkbar wäre eine Verarbeitung in ähnlichen Anlagen wie sie zurzeit für die Holzverflüssigung bzw. -vergasung eingesetzt werden. Vor allem für die Verflüssigung in Wirbelschichtreaktoren, bei denen eine Partikelgröße von 1-3 mm wünschenswert ist, scheint Laub gut geeignet zu sein. Die Rentabilität solcher Verfahren müsste jedoch genauer überprüft werden. Aber vor allem die Verkohlung von Laub erscheint sinnvoll: im Rahmen dieser Facharbeit wurden eine Kohleausbeute erreicht, die bis zu doppelt so hoch war wie die einer Retortenverkohlung von Holz. Dabei handelte es sich jedoch um Kohle minderer Qualität. In einer anderen Durchführung wurden bei einer Ausbeute von durchschnittlich 47,9 % jedoch sehr hochwertige, reine Kohle erzeugt. Die Qualität und der Gewichtsanteil der Kohle an den Pyrolyseprodukten lassen sich also durch die Temperatur und die Aufheizrate regeln. Beide Ausführungen wurden aber bei einer ständigen Befeuerung durchgeführt, die die Energieeffizienz dieser Verarbeitungsform senkt.

Allgemein wurde bewiesen, dass Laub ähnlich wie Holz mithilfe der Pyrolyse verarbeitet werden kann und teilweise sogar sehr gute Resultate liefert. Um die Sinnhaftigkeit solcher Verfahren diskutieren zu können bedarf es allerdings weiterer Untersuchungen.

---

<sup>36</sup> [1], S.671 ff.  
J. Huch

## 7 Anhang

### 7.1 Daten und Berechnungen

Durchgang Nr.	1	2	3	4	5
Gasmenge [ml]	147	171	151	200	182
Kohlemenge [g]	1,10	0,89	1,05	0,85	0,90
Gastemperatur [C°]	11,6	11,9	12,3	12,5	12,8
Gasmenge [g]	0,095	0,11	0,098	0,129	0,117
Gasanteil [Gew.-%]	4,76	5,52	4,87	6,45	5,86
Kohleanteil [Gew.-%]	55	44,5	52,5	42,5	45

*B-1: Messwerte des Versuchs zur Bestimmung der Gas- und Kohlemenge bei hoher Aufheizrate und Temperatur. Für Berechnung siehe Anhang B-5/B-6*

Durchgang Nr.	1	2	3	4	5
Gasmenge [ml]	97	99	116	99	112
Kohlemenge[g]	1,18	1,34	1,14	1,45	1,02
Gastemperatur [C°]	13,0	13,2	13,3	13,6	13,8
Gasmenge [g]	0,062	0,064	0,075	0,064	0,072
Gasanteil [Gew.-%]	3,12	3,19	3,73	3,18	3,596
Kohleanteil [Gew.-%]	59	67	57	72,5	51

*B-2: Messwerte des Versuchs zur Bestimmung der Gas- und Kohlemenge bei niedriger Aufheizrate und Temperatur. Für Berechnung siehe Anhang B-5/B-6*

Durchgang Nr.	1	2	3
Flüssigkeit [ml bzw. g]	0,24	0,22	0,31
Flüssigkeitsanteil [%]	12	11	15,5

*B-3: Messwerte der Flüssigkeitsmenge bei hoher Temperatur und Aufheizrate.*

Durchgang Nr.	1	2	3
Flüssigkeit [ml bzw. g]	0,36	0,30	0,28
Flüssigkeitsanteil [%]	18	15	14

*B-4: Messwerte der Flüssigkeitsmenge bei niedrigerer Temperatur und Aufheizrate*

$$\frac{P \cdot V}{T \cdot n} = R;$$

$P=1,013 \text{ bar};$   
 $R=0,0831 \text{ bar} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{l};$   
 $T=\text{Gastemperatur } [^{\circ}\text{C}] + 273,15\text{K};$   
 $V=\text{Gasvolumen } [\text{ml}];$   
 $n=\text{Gasmenge } [\text{mol}]$

B-5: Formel zur Berechnung der Stoffmenge des Gases. (s. [6], S.128)

Gaszusammensetzung: 50% H<sub>2</sub>, 22,5% CO, 15% CO<sub>2</sub>, 7,5% CH<sub>4</sub>

H<sub>2</sub>: 2,01588 g/mol

C: 12,0107 g/mol

O: 15,9994 g/mol

→ Gsgewicht: 15,1148 g/mol

B-6: Berechnung des Gsgewichts: da die Vergasung mit λ=0 stattfand kann anhand von Abb. A-11 auf die Zusammensetzung des Gases geschlossen werden.

## 7.2 Grafiken

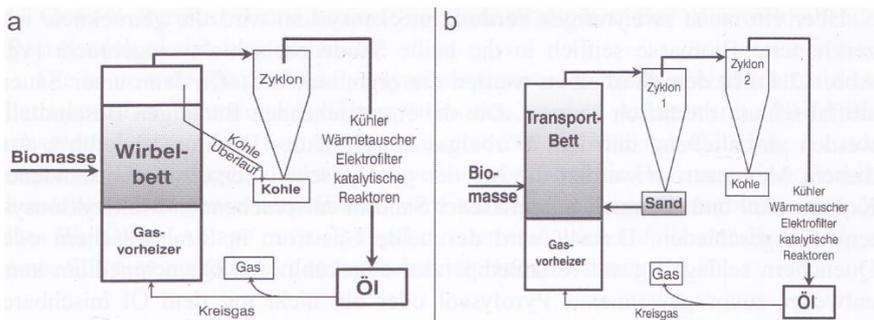


Abb. A-6: Flash-Pyrolyseanlagen, links mit stationärer Wirbelschicht, rechts mit zirkulierender Wirbelschicht. (s. [1], S.673)

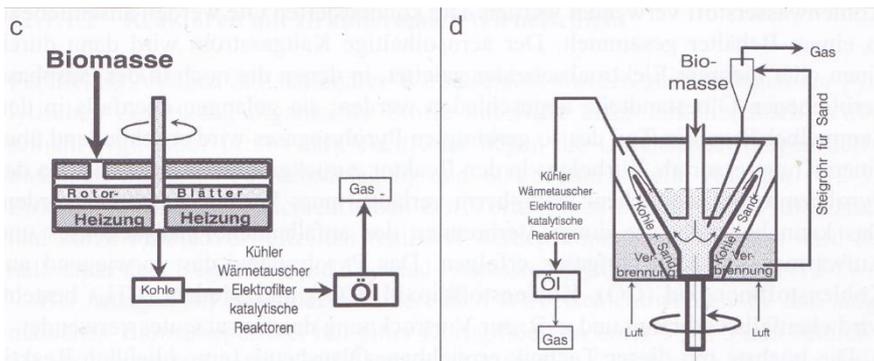


Abb. A-7: Flash-Pyrolyseanlagen mit ablativer Wirkung (s. [1], S.673)

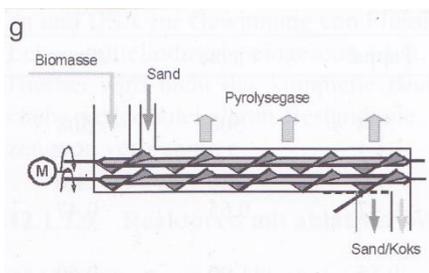


Abb. A-8: Doppelschneckenreaktor (s. [1], S.673)

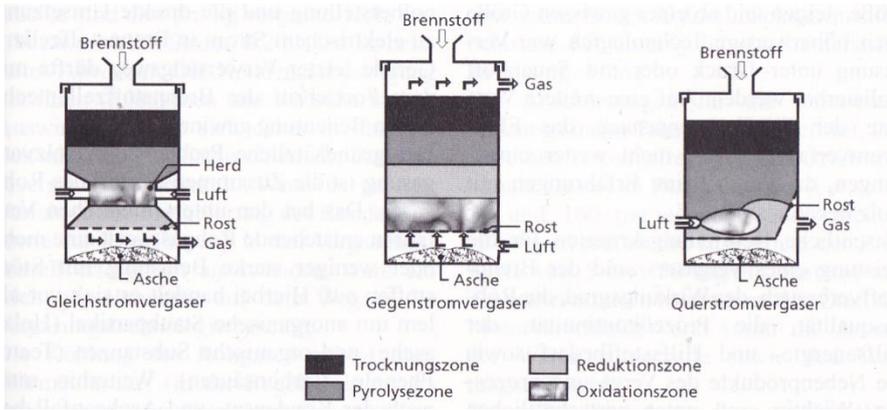


Abb. A-9: Imbert-Holzgasgeneratoren (s. [2], S.157)

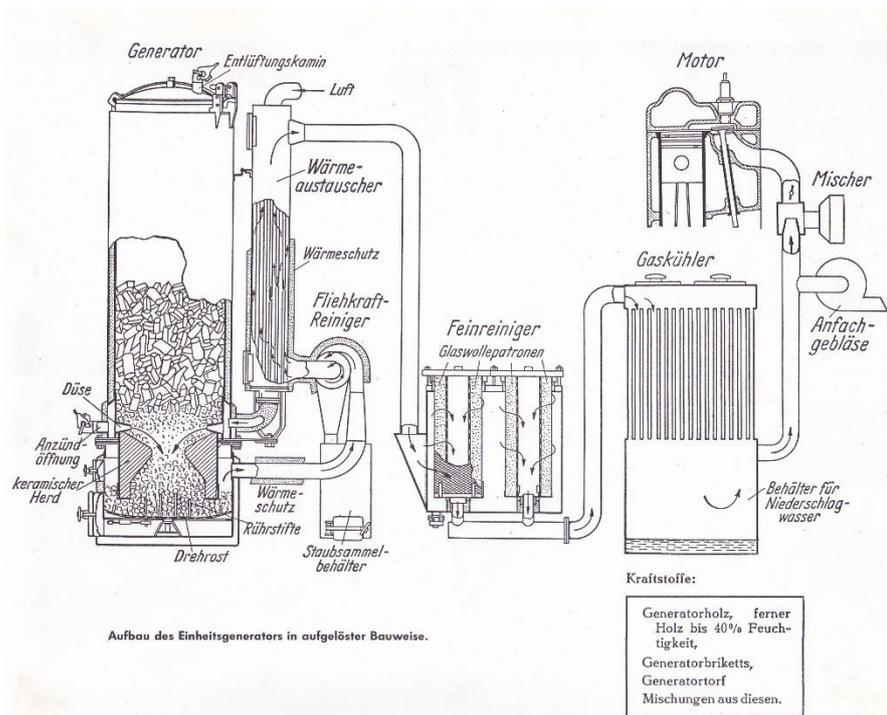


Abb. A-10: Imbert-Gleichstromvergaser, auch Einheitsgenerator genannte, wie er während des zweiten Weltkrieges in der Landwirtschaft verwendet wurde. (s. [7], S.71)

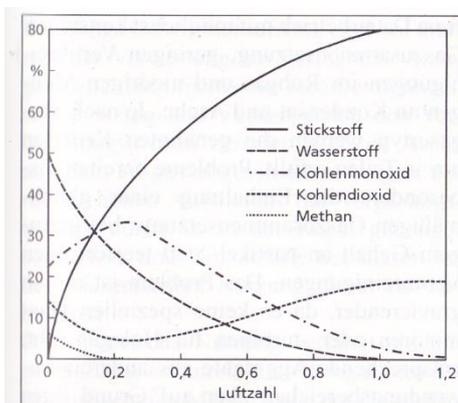


Abb. A-11: Pyrolysegas-zusammensetzung in Abhängigkeit von der Luftzahl (s. [2], S.157)

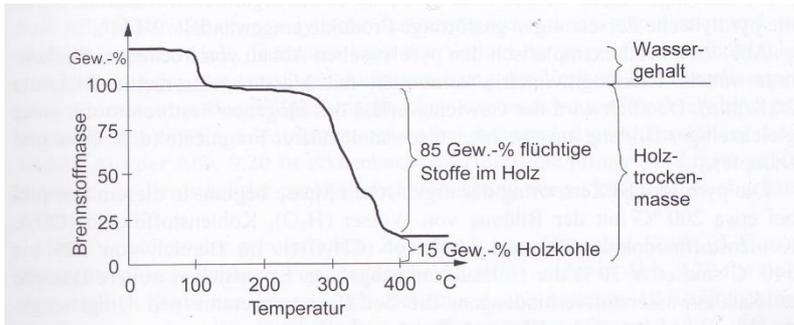


Abb. A-12: Massenabnahme von feuchtem Holz in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Erwärmung bei  $\lambda=0$ ; gut zu erkennen ist, dass bis zum Verdunsten des Wassers eine weitere Erwärmung verhindert wird. (s. [1], S.381)

### 7.3 Bilder des Versuchs



F-1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gas- und Kohlemenge



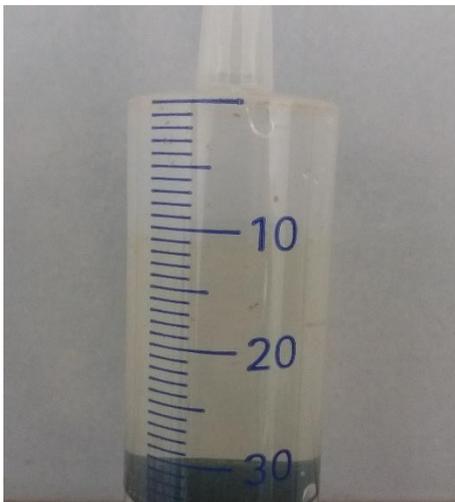
F-2: Bei der Durchführung mit hoher Aufheizrate und Temperatur entstandene tiefschwarze Kohle



F-3: Dünne Partikelschicht auf der Wasseroberfläche im kleinen Becherglas



*F-4: Durch Pyrolyseöle gelblich verfärbtes Wasser*



*F-5: Bestimmung des Gasvolumens mithilfe der 60ml Spritze; bei der 10ml Markierung Phasengrenze zwischen Pyrolysegas und eingesogenem Wasser*



*F-6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der entstehenden Flüssigkeitsmenge und Nachweis der Brennbarkeit des Pyrolysegases*



*F-7: In das gekühlte Reagenzglas laufende Pyrolyseöle*

## **8 Literaturverzeichnis**

- [1] Kaltschmitt, M. (2009). Energie aus Biomasse: Grundlagen, Technik, und Verfahren, Springer Verlag, Heidelberg
- [2] Marutzky, R. (1999). Energie aus Holz und anderer Biomasse: Grundlagen, Technik, Emissionen, Wirtschaftlichkeit, Entsorgung, Recht, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- [3] Marutzky, R., Fraunhofer-Institut für Holzforschung (1997). Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen, Springer Verlag, Heidelberg
- [4] Good, J., Nussbaumer, T., Ott, H. (2013 (revidierte Fassung)). Katalytische Direktverflüssigung von Biomasse, Eidgenössisches Departement für UVEK
- [5] <https://www.uni-kassel.de/uni/nc/universitaet/pressekommunikation/nachrichten/article/herbstlaub-wird-zu-aktivkohle-forschungsprojekt-entwickelt-clevere-biomassenverwertung.html> (19.4.17)
- [6] Mortimer, C. E., (1983). Chemie, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York
- [7] Bauer, A., (1989). Hanomag-Schlepper: von 1912 bis 1971: aus Hannover in die ganze Welt, Franckh-Kosmos, Stuttgart

## **9 Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der ausgewiesenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach anderen gedruckten oder im Internet verfügbaren Werken entnommen sind, habe ich durch genaue Quellenangaben kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

Jonas Huch

## **10 Freigabeerklärung**

Hiermit erkläre ich, dass diese Seminarfacharbeit „Gewinnung regenerativer Energieträger durch die Pyrolyse von Herbstlaub“ schulintern am Eichsfeld-Gymnasium Duderstadt unverändert als Beispiel im naturwissenschaftlichen Seminarfachunterricht genutzt werden darf.

---

Ort, Datum

Jonas Huch