



Fachbereich Agrarwirtschaft

Fachgebiet: Bodenkunde und erneuerbare Energien

Prof. Dr. Ludwig Popp

Prof. Dr. Sc. Agr. Bernhard Seggewiß

Bachelor Studienarbeit

**“Energiegewinnung aus Biomasse mittels Vergasung und
Verwertung der entstehenden Biokohle“**

von

Markus Kröhnert

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2009-0528-9

Februar 2010

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | <i>Einleitung</i> | 4 |
| 2 | <i>Biokohle</i> | 6 |
| 2.1 | Zusammensetzung der Biokohle | 7 |
| 2.2 | Positive Eigenschaften der Biokohle | 8 |
| 2.3 | Der Einfluss der Biokohle auf Lachgasemissionen aus dem Boden | 9 |
| 2.4 | Der Einfluss der Biokohle auf Methanemissionen aus dem Boden | 10 |
| 2.5 | Applikation der Biokohle | 11 |
| 3 | <i>Terra Preta</i> | 13 |
| 4 | <i>Klimafarming</i> | 14 |
| 5 | <i>Pyrolyse</i> | 15 |
| 5.1 | Pyrolyse Verfahren | 16 |
| 5.1.1 | Langsame Pyrolyse..... | 17 |
| 5.1.2 | Flash Pyrolyse | 18 |
| 5.2 | Biomasserohstoffe für die Pyrolyse | 19 |
| 5.3 | Pyrolyse Gase | 20 |
| 5.4 | Pyrolyse am Beispiel von Flachsfasern | 21 |
| 5.5 | Pyrolysereaktoren | 24 |
| 5.5.1 | Drehtrommelpyrolyse | 25 |
| 5.5.2 | Wirbelschichtpyrolyse | 26 |
| 5.5.3 | Doppelschneckenreaktor | 27 |
| 5.6 | Karbonisierung | 28 |
| 5.7 | Vergasung | 28 |
| 6 | <i>Kraft Wärme Kopplung</i> | 29 |
| 7 | <i>Flox Verfahren</i> | 31 |
| 7.1 | Funktionsweise von Flox- Brenner | 32 |
| 7.2 | Flox- Brenner Einsatz im Biomasse Pyrolyse Reaktor | 33 |
| 7.3 | Energiebilanz des Pyrolysereaktors mit Flox- Feuerung | 33 |
| 8 | <i>Zusammenfassung</i> | 35 |
| 9 | <i>Literaturverzeichnis</i> | 37 |
| | <i>Eidesstattliche Erklärung</i> | 39 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2-1 Struktur der Biokohle..... | 7 |
| Abbildung 2-2 Struktur der Biokohle..... | 7 |
| Abbildung 5-1 Pyrolyseverfahren | 15 |
| Abbildung 5-2 Aufbau eines Pyrolysereaktors mit Doppelschnecke und Flox-Feuerung | 17 |
| Abbildung 5-3 Drehtrommelreaktor der Firma VTA | 25 |
| Abbildung 5-4 Aufbau eines Wirbelschichtreaktors | 26 |
| Abbildung 5-5 Aufbau eines Doppelschneckenreaktors | 27 |
| Abbildung 6-1 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung | 30 |
| Abbildung 7-1 Flammenlose Verbrennung im Flammenbetrieb (links) und mit flammenloser Oxidation (rechts)..... | 32 |
| Abbildung 7-2 Brenner im Flammenbetrieb rechts und Brenner im Flox-Betrieb links | 32 |
| Abbildung 7-3 Energiebilanz Pyrolysereaktor mit Flox-Feuerung (ohne Verluste)..... | 34 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| 5-1 Tabelle Zusammensetzung des Pyrolysegases bei Holzpellets..... | 20 |
| Tabelle 5-3 Versuchsparameter einer Flachsfaser-Pyrolyse | 21 |
| Tabelle 5-4 Analysewerte der Biokohlebestandteile | 21 |
| Tabelle 5-5 Analysewerte des Pyrolyseöls..... | 22 |
| Tabelle 5-6 Detaillierte Analysewerte des Pyrolyseöls..... | 23 |
| Tabelle 5-7 Zusammensetzung des Pyrolysegases..... | 24 |

1 Einleitung

Die erneuerbaren Energien gewinnen in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Das ist darauf zurückzuführen, dass im Bewusstsein der Menschen ein Umdenken stattfindet und der Staat zum Handeln verpflichtet ist um die festgelegten Klimaziele erfüllen zu können.

Zu den erneuerbaren Energien gehört unter anderem auch die Nutzung nachwachsender Rohstoffe, oder im Allgemeinen die organische Substanz, zur Strom- und Wärmeenergieerzeugung. Bei der Biomassennutzung zur Energieerzeugung sind sehr unterschiedliche Verfahren gebräuchlich. Biogaserzeugung, Biodiesel und Pflanzenölherstellung aus Ölpflanzen, Btl-Verfahren, Hackschnitzel-Heizkraftwerke, Holzvergaser oder aber Stroh- und Getreideheizungen sind die häufigsten Formen der Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen. Einige der Verfahren sind nicht immer ökologisch vertretbar, wie z.B. die Verbrennung von Getreide und Stroh, da potentieller Humus unwiederbringlich zerstört wird. Hinzu kommen teilweise niedrige Wirkungsgrade und relativ hohe Emissionswerte.

Ein mehrere Tausend Jahre altes Verfahren wurde seit einigen Jahrzehnten wieder mehr Aufmerksamkeit geschenkt, die Verkohlungs- oder Pyrolyse von Biomasse. Im Hinblick auf den sich abzeichnenden Klimawandel, der sich mit häufigeren Unwetterphänomenen, Gletscher- und Polabschmelzungen, längeren Trockenperioden und einer zunehmenden Zahl von Hungersnöten bemerkbar macht, kann die Biomasseverwertung mittels Pyrolyseverfahren einen nicht unerheblichen Beitrag zum Klimaerhalt erfüllen.

In dieser Arbeit werden das Pyrolyseverfahren und eines der daraus erzeugten Produkte, die Biokohle, näher beleuchtet. Der Biokohle wird in mehreren Untersuchungen eine Bodenverbessernde und Ertragssteigernde Wirkung nachgesagt. Zusätzlich kann eine erhebliche Menge an Kohlenstoff durch die Biokohle langfristig gebunden werden. Diese Eigenschaften werden im Verlauf dieser Arbeit näher beschrieben, um einen Nutzen für die Landwirtschaft zu erhalten. Durch das Pyrolyseverfahren können im landwirtschaftlichen Sektor Energie erzeugt und gleichzeitig die Böden verbessert werden.

Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit der Biokohle, wo sich die Erläuterung der Terra Preta anschließt, in der die Biokohle die Hauptrolle spielt. Vor der Beschreibung der Pyrolyse, des Verfahrens zur Herstellung der Biokohle, wird noch ein nachhaltiges ökologisches Gesamtkonzept für die Landwirtschaft, Klimafarming, vorgestellt, welches die Biokohlenutzung beinhaltet. Im Abschnitt der Pyrolyse, werden am Beispiel von Flachsfasern einige Analysewerte der Pyrolyseprodukte dargestellt und nachfolgend noch die wichtigsten Reaktortypen erläutert. Um höhere Wirkungsgrade von bestimmten Biomasseverwertungsverfahren durch die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Elektrizität zu erreichen wird das Prinzip der Kraft Wärme Kopplung beschrieben. Im darauf folgenden Abschnitt wird ein effizientes Brennerverfahren, die flammenlose Oxidation (FLOX), dargestellt, das bei einer Verwendung in Pyrolyseanlagen die entstehenden Pyrolysegase mit weitaus geringeren Emissionen verbrennt und gleichzeitig Nutzwärme für den Pyrolyseprozess oder anderen Heiz- und Trocknungsverfahren bereitstellt. Zum Abschluss folgt eine kurze Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse.

2 Biokohle

Die Biokohle (engl.: biochar) ist ein Produkt der Pyrolyse und unterscheidet sich von herkömmlicher Holzkohle dadurch, dass diese nicht vorrangig für Energiegewinnungszwecke, wie z.B. Wärme- und Stromerzeugung, genutzt wird, sondern für Abscheidungs- und Speicherungsprozesse des atmosphärischen Kohlenstoffs. Die Biokohle ist reich an stabilen Kohlenstoffverbindungen und kann somit im Boden als langjähriger Kohlenstoffspeicher verwendet werden. Das übliche Verbrennen und die natürlichen Abbauprozesse von Holz und anderem organischen Material tragen dazu bei, eine große Menge Kohlendioxid an die Atmosphäre freizusetzen. Die Biokohle kann diesen Kohlenstoff im Boden speichern und somit große Mengen des Treibhausgases aus der Atmosphäre entziehen. Außerdem kann die Kohle dazu beitragen Trinkwasserqualitäten zu erhalten oder sogar zu verbessern, indem Nährstoffauswaschungen in das Grundwasser minimiert und Schwermetalle an die Biokohle gebunden werden. Zusätzlich wird die Fruchtbarkeit der Böden und somit auch die landwirtschaftliche Produktivität gesteigert. Dadurch können z.B. alte Waldbestände, wie die der Regenwälder, geschont werden. Die Biokohle spielt in der Terra Preta, ein sehr fruchtbarer Boden im Amazonasgebiet, die Schlüsselfunktion zur langfristigen Erhaltung und Erreichung der hohen Fruchtbarkeit. In Verbindung mit Komposten, Wirtschaftsdüngern oder Mineraldüngemitteln kann die Biokohle ökonomische Vorteile hervorrufen, wie z.B. eine Minimierung von Nährstoffauswaschungen, bessere Ausnutzungsraten von Nährstoffen oder Ertragssteigerungen. Im sich anschließenden Punkt wird die genauere Zusammensetzung der Biokohle beschrieben. (wikipedia: biochar)

2.1 Zusammensetzung der Biokohle

Der Aufbau der Biokohle ist weitestgehend strukturlos, enthält aber einige örtliche kristalline Strukturen mit höchst konjugierten (chem.: sich abwechselnde Bindungsarten z.B. C-C=C-C=C-...) aromatischen Verbindungen. Die kristallinen Partikel sind in der Größenordnung von wenigen Nanometern im Durchmesser und sind zusammengesetzt aus graphitartigen Schichten, die verdreht und verschoben übereinander liegend (turbostratisch) angeordnet sind. Zusätzlich zu den Graphen- Schichten, die in einer zufälligen Art und Weise vernetzt sind, enthält die Biokohle aromatisch- aliphatisch- (Moleküle mit einem oder mehreren offenen, kettenförmigen Kohlenwasserstoff-Resten) organische Verbindungen mit komplexer Struktur und anorganischer Bestandteile (Mineralstoffe). Abschließend besitzt die Biokohle Hohlräume, die als Poren ausgeformt sind, und sich in Makro- Meso- und Mikroporen einordnen lassen. Dazu enthält die Biokohle noch Mikrorisse und Strukturen, ähnlich zellenartiger Biomasse. Die Kohlenstoffatome sind fest miteinander verbunden. Dadurch besitzt die Biokohle eine Resistenz gegen die Zerlegungsprozesse der Mikroorganismen. In den folgenden zwei Abbildungen wird graphisch eine kleine Auswahl der Strukturen in Biokohlen dargestellt. (Evelyn Krull)

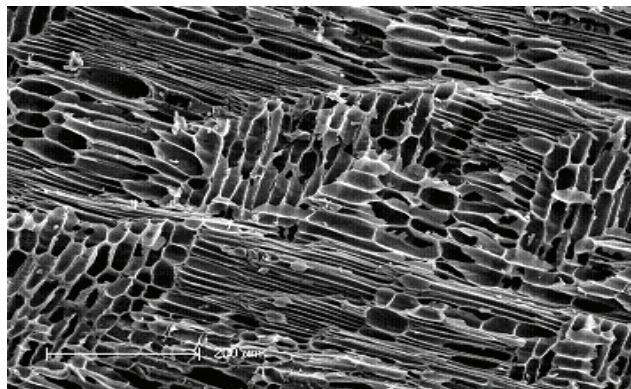


Abbildung 2-1 Struktur der Biokohle

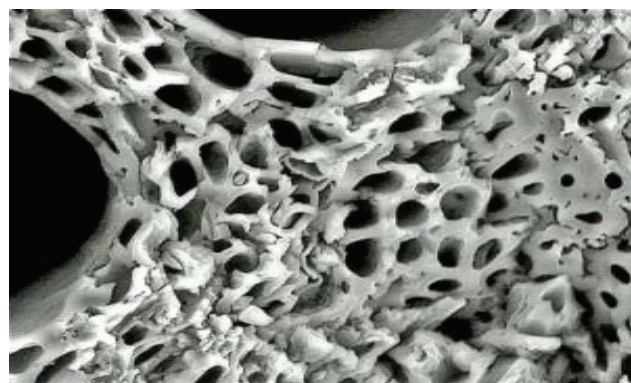


Abbildung 2-2 Struktur der Biokohle

2.2 Positive Eigenschaften der Biokohle

Biokohle besitzt zahlreiche Merkmale die sich positiv auf das Bodenleben, das Pflanzenwachstum und weitere chemische, biologische und physikalische Prozesse auswirken. Untersuchungen haben ergeben, dass in einigen Bodentypen und bei bestimmten Feldfrüchten mit dem Einsatz der Biokohle sich bestimmte Merkmale herauskristallisierten. Dazu gehören die gesteigerte Wasserhaltefähigkeit der Böden, höhere Biomasserträge, ein höheres Bodenkohlenstoffniveau, ein gesteigerter pH-Wert des Bodens, niedrigere Aluminiumtoxizitäten, eine Abnahme der Bodendichte, eine veränderte Mikroorganismen-Zusammensetzung im Boden, geringere Kohlendioxid-, Lachgas- und Methanemissionen aus dem Boden, verbesserte Bedingungen für Regenwürmer, eine langfristige Steigerung der Kationen- Austauschkapazität und eine effizientere Ausnutzung von Düngemitteln und Nährstoffen. Zusätzlich dazu können Schwermetalle oder toxische Reste von Pflanzenschutzmitteln durch die Biokohle fest gebunden und somit nicht in das Grundwasser ausgewaschen werden. Dabei sollte bedacht werden, dass durch Varianzen in den Ausgangsmaterialien, den Prozessbedingungen und –Abläufen unterschiedlich große Ergebnisabweichungen hervorgerufen werden, die sich zudem oft widersprechen. Je nach Ausgangssubstrat der zur Pyrolyse eingesetzten Biomasse haben manche Biokohleprodukte keinen Einfluss auf bestimmte, zuvor angesprochene Auswirkungen. Manche Biokohlen zeigten sogar negative Effekte im Bezug auf die Produktivität von Feldfrüchten. Es besteht somit noch Forschungsbedarf um bestimmte Effekte zu untersuchen und zu bestätigen. Außerdem müssen positive und negative Merkmale bestimmter Biokohle- Produkte herausgefiltert werden. Studien haben auch gezeigt, dass die größten Effekte einer Biokohlen-Applikation dort auftreten, wo Böden unfruchtbar sind, unter einer Übersäuerung leiden oder im Nährstoffdefizit liegen. Dies wären z.B. abgeholzte Regenwaldflächen, unter Jahreszeitlich bedingter Trockenheit leidende Böden oder aber auch wenig fruchtbare Sandböden, wie man sie beispielsweise in Teilen Brandenburgs findet. Auf optimal versorgten Lehmböden kann man hingegen nur äußerst geringe Auswirkungen der Biokohle, im Hinblick auf hervorgerufene positive Effekte, ermitteln. Bei reinen Tonböden wiederum führt die Struktur der Biokohle, welche ein hohes Porenvolumen aufweist, zu einer Bodenauflockernden Wirkung, was weitere positive Merkmale nach sich zieht. In den folgenden beiden Punkten sollen die behaupteten positiven Eigenschaften der Biokohle, eine Verringerung der Lachgas- und Methanemissionen aus dem Boden zu bewirken, widerlegt werden.

2.3 Der Einfluss der Biokohle auf Lachgasemissionen aus dem Boden

Das globale Erwärmungspotential eines Gases beruht auf zwei Aspekte, die Aufnahmeleistung der Moleküle für die eintreffenden Strahlungen der Sonne und die chemische Zusammensetzung der Moleküle in der Atmosphäre. Laut Definition liegt das Erderwärmungspotential von Kohlendioxid bei 1,0 und im Vergleich dazu erreicht das Lachgas einen Wert von 310. Unter anaeroben Bedingungen wird Lachgas aus dem Boden durch die Denitrifikation freigesetzt. In dem Prozess der Denitrifikation wird durch denitrifizierende Bakterien der im Nitrat gebundene Stickstoff in molekularem Stickstoff überführt. Gleichzeitig wandeln nitrifizierende Bakterien den molekularen Stickstoff in Ammonium- Stickstoff um. Die Verfügbarkeit von Ammonium ist abhängig von der Mineralisation organischen Materials und den klimatischen Bedingungen. Die Umsetzung Biokohle- basierter Strategien für Energie-Erzeugungszwecke ist stark abhängig von einer Verringerung der Lachgasemissionen. Das kann durch die generelle Fähigkeit der Biokohle, Stickstoff im Boden zu speichern bei gleichzeitiger Verbesserung der pflanzlichen Ernährung, erreicht werden. Es ist unwahrscheinlich, dass die Biokohle die Stickstoffverfügbarkeit durch physische Anlagerung, wie z.B. in kleinen Poren begrenzt, wo der Stickstoff unerreichbar für denitrifizierende Bakterien ist. Wahrscheinlicher ist, dass die Biokohle den Prozess der Auswaschung gelösten Stickstoffs hemmt. Veröffentlichte Daten beweisen, dass der Effekt der Biokohle, die Bildung von Lachgasen zu unterdrücken, sehr begrenzt ist. Man hat ermittelt, dass ab einer Wassersättigung der Biokohleporen von 83% aufwärts, die Böden vermehrt Lachgas emittieren. Bei einer gleichmäßigen Bodenfeuchte über einen längeren Zeitraum konnten nur geringe Lachgasemissionen ermittelt werden. Unter anaeroben Bedingungen wird Stickstoff in Lachgas umgewandelt. Das der Zustand anaerober Bedingungen in z.B. Tonböden eher erreicht ist, als in mit Biokohle durchmischten Böden, ist darauf zurückzuführen, dass die Biokohle größere Porenfraktionen aufweist und somit eine schnellere Wasserdurchlässigkeit in tiefere Schichten ermöglicht. Somit lassen sich geringere Lachgasemissionen in Biokohleböden vermuten. (Evelyn Krull)

2.4 Der Einfluss der Biokohle auf Methanemissionen aus dem Boden

Methan hat gegenüber dem Lachgas ein relativ geringes Erderwärmungspotential, aber dafür einen sechsmal höheren Anteil in der Atmosphäre und besitzt einen ca. 50- Mal höheren jährlichen Zufluss. Abgesehen von den Emissionen aus der Industrie, einschließlich der Erdgas Nutzung, emittiert Methan hauptsächlich aus den Böden der natürlichen Lebensräume. Innerhalb der Landwirtschaft sind der Reisanbau und die gasförmigen Ausscheidungen der wachsenden Wiederkäuerbestände die hauptsächlichen Quellen für Methan. Der Zusammenhang zwischen der Umsetzung von Methan und der Luftdurchlässigkeit der Böden ist bedeutend im Bezug auf die reduzierte Bodenbearbeitung. Während höhere Mengen organischer Substanz im Oberboden sowohl für eine bessere Wasserdurchlässigkeit und für eine höhere Wasserhaltefähigkeit verantwortlich sind, ist ein höheres Feuchtigkeitsniveau die Basis für ansteigende Methanemissionen. Das ist dadurch begründet, dass der Zustand des Bodens mit zunehmender Feuchtigkeit von einem aeroben in einen anaeroben Status wechselt. Einige Feldexperimente mit Biokohle haben ein Ausbleiben der Methanemissionen ermittelt. Eine gewisse Anzahl von Projekten erforscht zurzeit gerade den Einfluss der Biokohle auf Methanemissionen im Reisanbau, wo aber noch keine wissenschaftlichen Ergebnisse ermittelt wurden. Im nächsten Punkt wird die Applikation von Biokohle beschrieben. (Evelyn Krull)

2.5 Applikation der Biokohle

Die Zersetzung von pflanzlichem Material ist ein Weg zur Humusanreicherung und somit zur Kohlenstoffspeicherung im Boden. Eine Voraussetzung für den längerfristigen Verbleib der humifizierten Materialien ist aber ein geringer Einfluss äußerer Umweltbedingungen, wie z.B. eine erhöhte Sauerstoffzugabe durch tiefe Bodenbearbeitung. Auf der anderen Seite führt aber die Zersetzung von org. Substanz an der Bodenoberfläche zu einer Umwandlung von Kohlenstoff in Kohlendioxid und somit zu einem Verlust an Kohlenstoff an die Atmosphäre. Eine andere Möglichkeit zur Kohlenstoffanreicherung in den Böden ist die Applikation von Biokohle. Dadurch kann eine künstliche, aber sehr stabile Humusform dem Boden zugeführt werden.

Die zuletzt vor ca. 500 Jahren im Amazonasgebiet mit Biokohle angereicherten Böden haben bis in die heutige Zeit nichts an ihrer Fruchtbarkeit eingebüßt. Diese sehr fruchtbaren Böden bieten einen starken Kontrast zu den sonst üblichen stark verwitterbaren Böden. Die Biokohle enthält etwa 40% des in der Biomasse- Originalsubstanz befindlichen Kohlenstoffs. Die meisten Feldfrüchte reagieren nach einer Biokohlen- Applikation bis zu einem Kohlendioxidäquivalent von 180 Tonnen pro Hektar mit höheren Erträgen und können sogar höhere Mengen, ohne einen Einfluss auf die Produktivität, tolerieren. Der Effekt einer Ertragssteigerung ist aber überwiegend auf sehr degradierten Standorten ermittelbar.

Eine Applikationsmethode stellt die Vermischung der Biokohle mit konventionellen Düngemitteln wie z.B. Kompost oder leichtlösliche, anorganische Dünger, dar. Ein wichtiger Aspekt sollte berücksichtigt werden, wenn die Biokohle mechanisch in den Boden eingearbeitet wird. Die Bodenbearbeitung kann zu großen Kohlenstoffverlusten führen, weil die Bodendurchlüftung die mikrobielle Zersetzung der organischen Substanz fördert. Das führt dazu, dass Kohlenstoffvorräte im Boden mineralisiert werden. Ein Boden der fünf bis zehn Jahre im Direktsaatverfahren geführt wurde, kann innerhalb eines Jahres unter Bodenbearbeitung den in der Zeit angesammelten Bodenkohlenstoff verbrauchen.

Die meisten Biokohlen sind sehr anfällig gegenüber Erosionsvorgängen, da sie nur geringe Dichten von 0,17 bis 0,37 Tonnen je Kubikmeter aufweisen. Zudem weisen die Biokohlen, kurz nach der Herstellung, teilweise noch Wasserabweisende Merkmale auf. Darum ist die Biokohle sehr anfällig gegenüber starken Windeinflüssen. Zusätzlich dazu besitzen die meisten Biokohlen bei der Applikation in den Boden eine staubartige Konsistenz die somit leichter aufgewirbelt werden kann. Auf tropischen Böden kann eine Winderosion bis zu 50%

Biokohleverluste nach sich ziehen. Dadurch können teilweise Einarbeitungsprozesse unausweichlich sein.

Es besteht auch die Möglichkeit die Biokohle mit Kompost zu vermischen und mit dem Mist- oder Düngerstreuer zu verteilen, oder eine Biokohle- Güllemixtur herzustellen und mittels Güllefass oberflächlich zu applizieren, wobei die Methode der direkten Injektion der Güllemixtur in den Boden optimal wäre. Außerdem stehen für die Applikation von festen Biokohlebestandteilen Einschlitzverfahren oder aber die einfache oberflächige Verteilung zur Verfügung. In der sich anschließenden Thematik wird der durch langjährige Biokohleapplikation erzeugte, höchst fruchtbare Boden, Terra Preta, erläutert.

3 Terra Preta

Die Terra Preta ist die portugiesische Bezeichnung für schwarze Erde. Die neuzeitliche Nachbildung in Amazonien wird als Terra Preta Nova bezeichnet. Diese durch Menschenhand geschaffene Schwarzerde besteht aus einer Mischung von Holzkohle, tierischen Exkrementen und Kompost, durchsetzt mit Tonscherben, teilweise auch Muschelschalen. Diesen besonders fruchtbaren Boden, mit einer Mächtigkeit von mehreren Metern, findet man in alten und prähistorischen Siedlungsgebieten. Diesen Boden kann man als einen wachsenden Boden bezeichnen, ähnlich dem mitteleuropäischen Torfmoor. Die in den Regenwäldern verbreiteten Erden sind in der Regel sehr nährstoffarm. Der Hauptteil der Nährstoffe in einem Regenwald ist in der Biomasse der Flora und Fauna gebunden. Durch die immensen Niederschläge in den tropischen Gebieten werden die vorhandenen Nährstoffe rasch in tiefere Bodenschichten oder in das Grundwasser ausgewaschen. Es kann sich somit in Regenwäldern nur eine dünne Humusschicht entwickeln. Organische Reste und deren Nährstoffe stehen als Nährmedium zur Verfügung und werden somit sehr schnell von den Pflanzen und Tieren aufgenommen.

Die Terra Preta hingegen gehört zu den fruchtbarsten Böden der Erde und ist mindestens vergleichbar mit einem guten europäischen Ackerboden. Durch die Speicherfähigkeit der in der Terra Preta enthaltenen Biokohle in Form von pyrogenem Kohlenstoff wird die Nährstoffauswaschung aus dem Boden teilweise oder fast vollständig verhindert. Der Anteil von pflanzenverfügbaren Stoffen wird somit gesteigert. Der Vergleich von Terra Preta und den sich auf der Nordhalbkugel der Erde befindlichen Schwarzerden ergibt, dass die schwarze Farbe der Terra Preta auf pyrogenem Kohlenstoff beruht, der mit einem Anteil von 10 bis 40 % in der organischen Substanz enthalten ist. Dieser Kohlenstoff ist in seiner Form sehr grobporig und fast schwammartig. Aufgrund des Aufbaus der Kohlenstoffmoleküle lassen sich folgende für den Ackerbau relevanten und funktionalen Eigenschaften erfüllen: eine erhöhte Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit eine Habitatsfunktion für Mikroorganismen und eine gesteigerte Luftaustauschkapazität. Außerdem wird durch die schwarze Färbung des pyrogenen Kohlenstoffs die Erwärmung des Bodens beschleunigt. Die Eingliederung der Biokohleapplikation und der Terra Preta in einem landwirtschaftlichen Gesamtkonzept wird im nächsten Punkt beschrieben.

4 Klimafarming

Klimafarming bezeichnet ein ökologisch nachhaltiges Gesamtkonzept für die Landwirtschaft, deren künftige Rolle sich nicht mehr nur auf die Produktion von Nahrungsmitteln beschränkt, sondern sich ebenso mit der Biodiversitätsförderung, dem Klimaschutz, der Energieerzeugung und der Landschaftsgestaltung beschäftigt. Diese Aufgabenbereiche sind untrennbar miteinander vernetzt und finden ihre gemeinsame Basis vorrangig in der gezielten Förderung der Biodiversität. Nur wenn die hohe biologische Aktivität der Böden gewährleistet ist und die Stoffkreisläufe sich schließen, werden auch die Humusgehalte der Böden wieder ansteigen. Somit besteht die Möglichkeit atmosphärischen Kohlenstoff zu binden. Um aber die Biodiversität der Böden effizient fördern zu können, müssen einige grundlegende Bedingungen bei der landwirtschaftlichen Produktion erfüllt werden. Zum einen ist dies der Verzicht auf den Einsatz von Mineraldüngern, Gülle und Düngekonzentraten. Außerdem sollte eine Kompostierung von Viehmist vor der Ausbringung erfolgen, auf Herbizide verzichtet werden, der Einsatz von Fungi- und Insektiziden schrittweise verringert werden, eine Düngung mit aktivierten Komposten und Biokohle- Kompost- Mischungen erfolgen. Hinzu kommen noch der Verzicht auf eine tiefgründige Bodenbearbeitung, der Einsatz Bodenschonender und hochentwickelter Landtechnik und die Anlage einer permanenten, artenreichen Bodenbedeckung unter Beachtung sinnvoller Fruchtfolgen und Mischkulturen. Wenn die vorher genannten Bedingungen hinreichend erfüllt werden, kann dies zu einer Stabilisierung von landwirtschaftlichen Ökosystemen führen. Eine hohe landwirtschaftliche Biodiversität und der daraus resultierende Humusaufbau würden den Anteil der Landwirtschaft am Klimawandel, der zurzeit auf 14% geschätzt wird, deutlich verringern. Wenn es möglich ist Kohlenstoff aus dem Kohlenstoffzyklus zu entnehmen und dauerhaft im Boden zu binden kann die Landwirtschaft nachhaltig klimapositiv wirtschaften. Aufgrund der höchst effizienten Kohlenstoffaufnahme von Pflanzen, kann die Landwirtschaft diesen Prozess nutzen um den pflanzlichen Kohlenstoff dauerhaft zu binden und in den Boden einzulagern. Hierbei kann man den Prozess der Pyrolyse von Biomasse nutzen. Somit lassen sich bis zu 490 kg Kohlendioxid pro Tonne Grüngut aus dem Kohlenstoffkreislauf entnehmen. Der Prozess der Pyrolyse wird im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben.

5 Pyrolyse

Die Pyrolyse ist die chemische Zerlegung von kondensierten Stoffen durch Erhitzen, was spontan bei ausreichend hohen Temperaturen erreicht wird. Das Wort Pyrolyse ist aus dem griechischen abgeleitet und bedeutet Feuer- Aufspaltung. Die Pyrolyse ist ein Spezialfall der Thermolyse, und wird am häufigsten bei organischen Materialien verwendet. Die Pyrolyse, speziell bei Holz, beginnt bei 300 °C aufwärts. Bei der Pyrolyse von organischem Material erhält man als Reaktionsprodukte gasförmige und flüssige Stoffe und einem festen Rückstand mit einem höheren Kohlenstoffgehalt. Die Pyrolyse unterscheidet sich von anderen Hochtemperaturprozessen, wie z.B. die Verbrennung und die Hydrolyse dadurch, dass es sich nicht um eine Reaktion mit Sauerstoff, Wasser oder anderen Reagenzien handelt. Die Pyrolyse findet unter anderem bei der normalen Verbrennung von z.B. Holz statt (brennbare Gase werden durch die Hitze freigesetzt); bei dem Erhitzen von Speisen, speziell beim Braten, Backen, Rösten, oder Grillen; bei der Holz- und Biomassekohleherstellung, und des Weiteren auch bei der Herstellung von Kohlefasern und Biokraftstoffen. In vielen industriellen Anwendungen findet der Prozess unter hohem Druck und bei Temperaturen über 430 °C statt. Für landwirtschaftliche Abfälle, organische Substanzen, liegen die Prozesstemperaturen zwischen 450 und 550 °C. In der nachfolgenden Abbildung sind die beiden Pyrolyseverfahren bildlich dargestellt und in den anschließenden Abschnitten auch näher beschrieben.

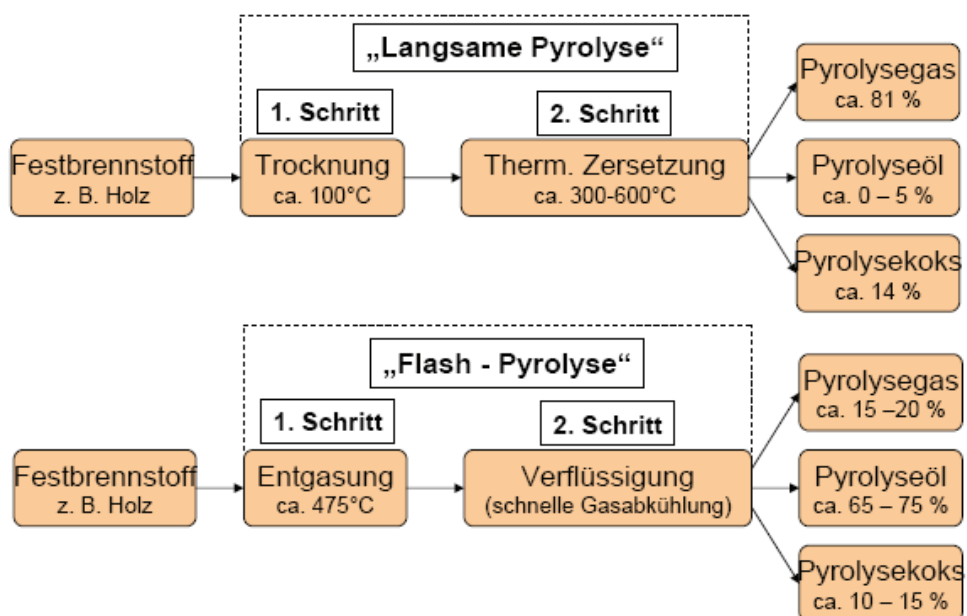


Abbildung 5-1 Pyrolyseverfahren

5.1 Pyrolyse Verfahren

Die thermische Verwertung biogener Festbrennstoffe, wie Getreide, Restholz aus Strauchschnitt oder Rückstände aus Biogas- und Kläranlagen kann durch die Verfahrenskombination eines Pyrolyse- Reaktors und der Flox- Feuerung optimal durchgeführt werden. Der biogene Festbrennstoff wird aus dem Lagerbehälter über eine Gasdichte Dosiereinrichtung dem Pyrolysereaktor zugeführt. In der Dosiervorrichtung sorgen zwei von Elektromotoren angetriebene Schnecken (im Doppelschneckenreaktor), die parallel ineinander greifen dafür, dass das Material transportiert, gleichmäßig durchmischt und erhitzt wird. Mittels der äußeren Wärmezufuhr (allotherm) werden die bei etwa 700°C flüchtigen Bestandteile der Biomasse als Pyrolysegas freigesetzt. Eine zusätzliche Eingabe von Vergasungsluft und von Wasserdampf im Nachschwel- Reaktor dient der Reduktion des nach der Pyrolyse noch vorhandenen Restkohlenstoffs bei 900°C. Das Pyrolysegas tritt mit einer Temperatur von ca. 700°C in die Flox- Feuerung ein. So kann verhindert werden, dass die Kondensationstemperatur der höher siedenden Gasanteile unterschritten wird. Eine Teerbildung und die dadurch entstehenden Probleme können so vollständig vermieden werden, da das heiße Pyrolysegas mit der vorgewärmten Verbrennungsluft vermischt und bei hohen Temperaturen oxidiert wird. Der Reaktor und die gasseitigen Bauteile sind dadurch auch nach mehreren hundert Betriebsstunden frei von Ablagerungen und Verschlackungen. Eine nachgeschaltete OFA- Reaktionszone (**O**ver **F**ire **A**ir) in der Rauchgasführung von der Flox- Brennkammer zum Pyrolysereaktor gewährleistet die vollständige Verbrennung des noch verbliebenen Kohlenmonooxids. Die hohen Feuerungstemperaturen von bis zu 1100°C ermöglichen eine Wärmeauskopplung, z.B. zum Betrieb eines Stirlingmotors. Aufgrund der doppelwandigen Ausführung des Pyrolysereaktors wird ein Teil der verbleibenden Abgaswärme für den Pyrolyse Prozess wieder zur Verfügung gestellt. Wenn die Pyrolyse mit einem nachgeschalteten Nachschwel- Reaktor erfolgt, können je nach eingesetztem Brennstoff bis zu 80 % des Energiegehalts der verwendeten Biomasse, oder ca. 90 % der eingesetzten Brennstoffmasse in ein Pyrolysegas umgewandelt werden. Die Abbildung zeigt eine Pyrolyseanlage mit Doppelschneckenreaktor und Flox-Feuerung.

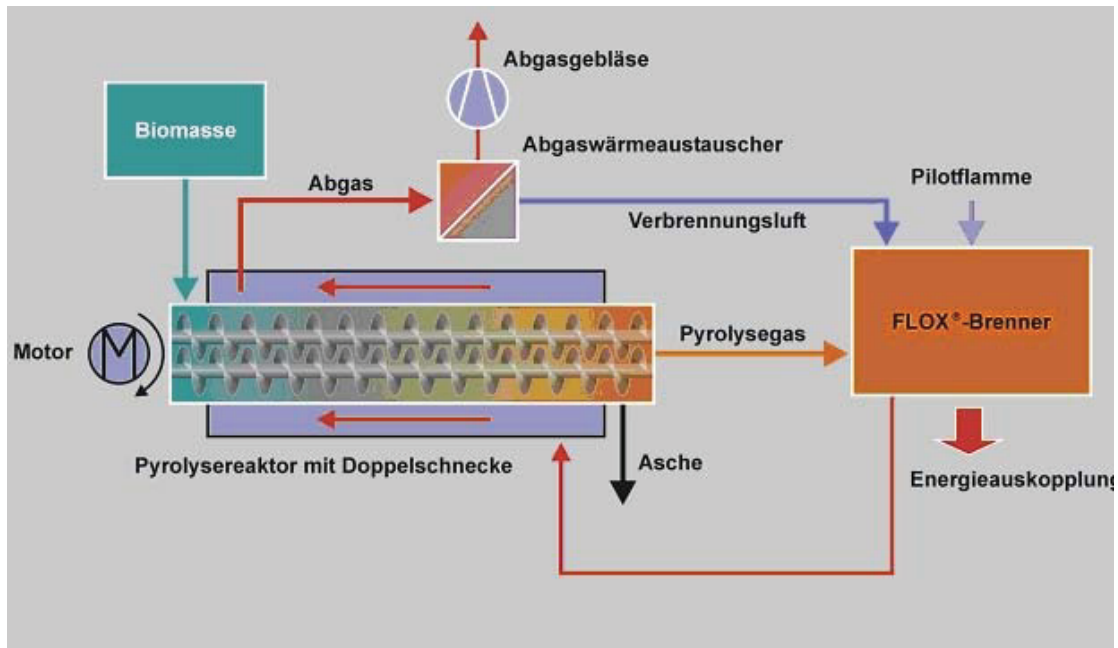


Abbildung 5-2 Aufbau eines Pyrolysereaktors mit Doppelschnecke und Flox-Feuerung

5.1.1 Langsame Pyrolyse

Die langsame Pyrolyse ist die thermische Zersetzung von organischer Substanz bei einer langsamen Erhitzung, bei einem niedrigen bis mittlerem Temperaturniveau das zwischen 450 und 650°C liegt und unter Sauerstoffabschluss abläuft. In dem Prozess wird gleichzeitig ein Synthesegas freigesetzt. Ausgangsmaterialien in Form von getrockneten Biomassepellets oder –Stücken in unterschiedlichen Größenvariationen werden einer beheizten Feuerungsanlage beigefügt, die mit gleich bleibenden Temperaturen arbeitet. Der Pyrolyse- Brennofen wird hauptsächlich mit einer internen oder externen Wärmequelle aufgeheizt. Eine Nachgeschaltete so genannte Flox- Feuerung, worin die entstandenen Pyrolysen Gase verfeuert werden, stellt die Wärme für den Pyrolyseprozess zur Verfügung. Die Wesentlichen Merkmale der langsamen Pyrolyse sind die Verweil- und Produktionszeiten, die beim Synthesegas bei ca. 5 Sekunden liegen und bei der Biokohle Minuten, Stunden und auch Tage in Anspruch nehmen können. Hinzu kommen eine relativ niedrige Brennraumtemperatur von 450 bis 650°C, der Pyrolyseablauf unter atmosphärischem Druck, eine sehr langsame Erhitzung von 0,01 bis 2,0°C pro Sekunde und eine sehr kurze Abkühlungsphase der Pyrolyseprodukte, die nur wenige Stunden bis Minuten betragen kann. Die festen, flüssigen und gasförmigen Produkte

der Pyrolyse werden in ziemlich gleichmäßigen Größenordnungen erzeugt, was auf die langsame Geschwindigkeit des Verbrennungsprozesses zurückzuführen ist. Die Pyrolysereaktion selbst ist leicht endotherm. Die Biokohle besitzt einen Energiegehalt von 30 bis 35 MJ pro Kilogramm und wird konventionell in Verbrennungs- und Vergasungsanlagen als Brennstoff verwendet um den Prozess der Pyrolyse mit Wärme zu versorgen oder feuchte Rohmaterialien zu trocknen. Das Synthesegas wird zur Wärme- oder Elektroenergieerzeugung eingesetzt.

5.1.2 Flash Pyrolyse

Die Flash Pyrolyse ist ein Mitteltemperaturprozess der bei etwa 475°C abläuft und in dem Biomasse unter anaeroben Bedingungen sehr schnell erhitzt wird. Die freigesetzten, vorwiegend primären Produkte der Pyrolyse kondensieren nach einer schnellen Abkühlung zu einer rötlich-braun gefärbten Flüssigkeit. Dieses kondensierte Produkt besitzt etwa die Hälfte des Heizwertes von Heizöl. Bei der Flash Pyrolyse steht nicht die Ausbeute an Biokohle im Vordergrund, sondern die Maximierung der flüssigen Produkte. Wesentliche Merkmale der Flash Pyrolyse sind die sehr hohen Aufheiz- und Wärmeübertragungsraten, welche eine kleine Partikelgröße von 2- 5 mm erfordern. Hinzu kommt noch ein Temperaturniveau, das bei 457°C liegen soll und das schnelle Abkühlen und Abscheiden der Produkte um Sekundärreaktionen zu vermeiden, die zu Ausbeute- und Qualitätsverlusten der Pyrolyseöl führen können. Das Hauptprodukt Pyrolyseöl wird in Ausbeuten von ca. 75%, in Bezug auf den trockenen Rohstoff, gewonnen. Zusätzlich entstehen als wertvolle Nebenprodukte die Biokohle mit einem Anteil von 10 bis 15% und das Pyrolysegas (15 bis 20%), welches zur Erzeugung der Prozessenergie dienen kann. Im Vergleich zu den Gesamtwirkungsgraden von konventionellen Verbrennungs- und Vergasungsverfahren, die bei 20 bis 30% liegen, erreicht man bei der Energiegewinnung durch Pyrolyseprodukte einen relativ höheren Wert von bis zu 35 %. Im Folgenden werden typische Rohstoffe für die Pyrolyse und Biokohleproduktion beschrieben.

5.2 Biomasserohstoffe für die Pyrolyse

Je nach dem, wo die Biokohle als Bodenverbesserer eingesetzt wird, spielt die Art der für die Pyrolyse zur Verfügung gestellten Rohmaterialien eine wichtige Rolle. Für die energetische Nutzung der Biokohle hingegen, führen unterschiedliche Ausgangsmaterialien nicht zu immensen Abweichungen von Energieerträgen. Die Rohmaterialien werden gegenwärtig für gewerbliche Zwecke oder in Forschungseinrichtungen genutzt und bestehen hauptsächlich aus Holzhackschnitzeln, Holzpellets, Baumrinden, Ernteresten (Stroh, Reisschalen, usw.), Hirsepflanzen oder Produktionsabfällen wie Reste aus Brauvorgängen, Zuckerherstellung oder Kläranlagen. Die Verhältnisse der Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff untereinander, sind die Hauptaspekte für die Eignung einer gewerblichen Nutzung und für die Qualität von Brennstoffzeugnissen. Die Rohmaterialien, die hauptsächlich für die Herstellung von Biokraftstoffen und Heizgasen in Frage kommen sind solche, die einen niedrigen Mineralstoff- und Stickstoffgehalt aufweisen. Aus diesem Grund sind die geeignetsten Materialien, Holz und Biomasse aus Energiepflanzen, einschließlich Gehölze aus Kurzumtriebsplantagen, schnell wachsende Gräser wie das Sudangras, und reichlich verfügbare Nebenprodukte aus der Landwirtschaft, wie zum Beispiel Stroh. Die Anteile von Hemizellulose, Zellulose und Lignin untereinander bestimmen die Verhältnisse von flüchtigem Kohlenstoff wie Synthesegase und stabilem Kohlenstoff wie Biokohle in den Pyrolyseprodukten. Rohstoffe mit einem hohen Ligninanteil erreichen die höchsten Biokohleerträge, wenn sich die Pyrolysetemperatur im mittleren Bereich, der bei etwa 500°C liegt, befindet.

5.3 Pyrolyse Gase

Das Pyrolysegas ist ein brennbares Gas, das durch den chemischen Prozess der Pyrolyse von Biomasse freigesetzt wird. Diese Gase werden bei Temperaturen zwischen 400 und 1500 °C flüchtig. Die nicht kondensierbaren Komponenten bilden einen Teil der Reaktionsprodukte und setzen sich zusammen aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, Methan und höhere Kohlenwasserstoffe. Je nach Prozessbedingungen ergeben sich erhebliche Unterschiede der Anteile fester, flüssiger und gasförmiger Produkte. Bei der „langsamen Pyrolyse“ entstehen bei Temperaturen zwischen 150 und 600 °C rund 80 % Pyrolysegas, ca. 15 % Biokohle und bis zu 5 % Pyrolyseöl, während bei der Flash- Pyrolyse (schnelle Pyrolyse) durch eine sehr schnelle Abkühlung, der bei 475 °C erzeugten Pyrolysegase, die Ausbeute an Pyrolyseöl auf bis zu 75 % erhöht wird, sodass nur 15- 20 % Pyrolysegas und 10- 5 % Biokohle aus der Reaktion hervorgehen. Folgende Anteilswerte der flüchtigen Gase beschränken sich auf die Pyrolyse von Holz. Stickstoff und Kohlendioxid machen einen Anteil bis ca. 60 % aus, Wasserstoff bis ca. 5 %, Kohlenmonoxid bis ca. 35 % und die höheren Kohlenwasserstoffe bis zu 10 %. Der Heizwert von Pyrolysegas hängt stark von den Prozessbedingungen und dem eingesetzten organischen Material ab und liegt in einer Größenordnung zwischen 4000 bis 8000 kJ pro Nm³. Die nachstehende Tabelle zeigt die Zusammensetzung des Pyrolysegases von Holzpellets. Im nachfolgenden Beispiel werden Analyseergebnisse von pyrolysierten Flachsfasern aufgezeigt.

5-1 Tabelle Zusammensetzung des Pyrolysegases bei Holzpellets

| Komponente im Pyrolysegas | Gehalt *) [%] |
|--|---------------|
| Sauerstoff | 0,43 |
| Stickstoff | 40,37 |
| Kohlendioxid | 15,37 |
| Wasserstoff | 3,89 |
| Kohlenmonoxid | 29,13 |
| Summe C ₁ H _x -R | 6,6 |
| Summe C ₂ H _x -R | 2,27 |
| Summe C ₃ H _x -R | 0,71 |
| Summe C ₄ H _x -R | 0,26 |
| Summe C ₅ H _x -R | 0,07 |
| Summe C ₆ H _x -R | 0,06 |

1) Konzentrationsmittelwert

5.4 Pyrolyse am Beispiel von Flachsfasern

Im Rahmen einer Arbeit wurden Flachsfasern mit Hilfe eines Rohrreaktors pyrolysiert und die entstandenen Produkte analysiert. Um die Mikrostrukturen der Flachsfasern nicht zu zerstören wurde das Rohrreaktorverfahren angewandt. Der Reaktor wurde batch-weise beschickt (die Eingabe erfolgte in geteilten und kleinen Mengen). Die verwendeten Versuchsparameter sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5-2 Versuchsparameter einer Flachsfaser-Pyrolyse

| | | |
|-------------------------|----------------|----------|
| Pyrolysetemperatur | 475 | [°C] |
| Heizrate | 31,7 | [°C/min] |
| Aufheizphase | 15 | [min] |
| Halte-Phase | 5 | [min] |
| Inertgas | N ₂ | [-] |
| Inert-Gas-Fluss | 60 | [l/min] |
| Kondensationstemperatur | 15 | [°C] |
| Eintragsmenge | 20 | [g] |
| Eintragungsfuchte | 7 | [m%] |

Die Untersuchung hat ergeben, dass bei der Pyrolyse von 20 g Flachsfasern, 3,95 g Flachkohlefasern (Biokohle), 10,77 g Pyrolyseöl und 5,29 g Pyrolysegas erzeugt wurden. Für die relative Massebilanz errechneten sich Werte von 19,75 m% (Masseprozent) Biokohle, 53,8 m% Pyrolyseöl und 26,45 m% Synthesegas. Die Analysewerte der Biokohleelemente, Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff, sind in der nachfolgenden Tabelle, in Masseprozent angegeben.

Tabelle 5-3 Analysewerte der Biokohlebestandteile

| Element | C | H | N | O* |
|---------|-------|------|------|-------|
| [m%] | 75,79 | 3,29 | 0,69 | 20,23 |

*Differenz zu 100m%

Außerdem wurde das Pyrolyseöl umfassend chromatographisch analysiert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5-4 Analysewerte des Pyrolyseöls

| Komponenten | m% |
|-------------------|-------|
| Organische Säuren | 3,69 |
| Alkohole | 0,37 |
| Aldehyde | 10,54 |
| Aromaten | n.q. |
| Furane | 2,25 |
| Guajacole | 0,22 |
| Ketone | 10,57 |
| Phenole | 0,11 |
| Pyrane | 0,13 |
| Zucker | 5,01 |
| Syringole | 0,08 |
| Andere | n.q. |
| Total | 32,97 |

Das kondensierte Pyrolyseöl weist typische thermische Abbauprodukte auf, die aus der Pyrolyse von ligno- cellulosischer Biomasse resultieren. Eine sehr detaillierte Zusammensetzung von Pyrolyseöl kann man der nachstehenden Tabelle entnehmen.

Tabelle 5-5 Detaillierte Analysewerte des Pyrolyseöls

| Komponenten | m% (Masseprozent) |
|--|-------------------|
| Säuren | 6,86 |
| Essigsäure* | 6,86 |
| Alkohole | 0,69 |
| 1,2-Ethandiol | 0,69 |
| Aldehyde | 19,68 |
| Hydroxyacetaldehyd* | 15,68 |
| 3-Hydroxypropanal | 2,69 |
| 2-Hydroxy-3-oxobutanal | 1,19 |
| 1-Hydroxybutandial | 0,11 |
| Furane | 4,2 |
| 3-Furaldehyd* | 0,19 |
| 2-Furaldehyd* | 1,1 |
| Tetrahydro-4-methyl-3-furanon oder 2-Ethyl-butanal* | 0,04 |
| Dihydro-methyl-furanon* | 0,43 |
| γ -Butyrolacton* | 0,58 |
| (5H)-Furan-2-on* | 0,93 |
| 5-Methyl-(5H)-furan-2-on* | 0,09 |
| 3-Methyl-(5H)-furan-2-on* | 0,19 |
| 5-Hydroxymethyl-2-furaldehyd* | 0,67 |
| Guajacole | 0,41 |
| Guajacol* | 0,13 |
| 4-Methylguajacol* | 0,04 |
| 4-Ethylguajacol* | 0,09 |
| 4-Vinylguajacol* | 0,07 |
| Homovanillin* | 0,09 |
| Ketone | 19,73 |
| Hydroxypropanon* | 15,92 |
| 1-Hydroxy-2-butanon* | 0,52 |
| 1-Acetyloxypropanon-2-on* | 1,33 |
| 2-Hydroxy-2-cyclopenten-1-on* | 1,01 |
| 3-Methyl-2-cyclopenten-1-on* | 0,04 |
| 2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-3-on* | 0,67 |
| 3-Ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-on* | 0,26 |
| Phenole | 0,21 |
| Phenol* | 0,09 |
| o-Cresol* | 0,06 |
| m-Cresol* | 0,04 |
| p-Cresol* | 0,04 |
| Pyrane | 0,24 |
| Isomer von 3-Hydroxy-5,6-dihydro-(4H)-pyran-4-on* | 0,13 |
| 3-Hydroxy-5,6-dihydro-(4H)-pyran-4-on* | 0,11 |
| Zucker | 9,35 |
| unbek. Anhydrozucker | 1,74 |
| 1,4:3,6-Dianhydro- α -D-glucofuranose* | 0,8 |
| Lävoglukosan* | 6,72 |
| unbek. Anhydrozucker* | 0,07 |
| Lävoglukosenon | 0,35 |
| Syringole | 0,15 |
| Syringol | 0,15 |
| Summe aller quantifizierten org. Verbindungen | 61,51 |

*quantifiziert mit GC (Gaschromatographie)/ FID (Flammenionisationsdetektor) ;Responzfaktor durch Referenzsubstanz ermittelt

Der Wassergehalt der Flachsfasern lag bei 7,0 m%. Der sich im Pyrolyseöl befindliche Anteil ergab einen Wert von 46,43 m%. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass durch den Pyrolysevorgang Reaktionswasser gebildet wurde, mit einem Anteil von 38,43 m%.

Das Pyrolysegas setzt sich folgendermaßen zusammen.

Tabelle 5-6 Zusammensetzung des Pyrolysegases

| <u>Komponenten</u> | <u>Vol. %</u> |
|--------------------|---------------|
| Wasserstoff | 1,32 |
| Kohlenmonoxid | 49,40 |
| Kohlendioxid | 46,43 |
| Kohlenwasserstoffe | 2,84 |
| davon Methan | 1,69 |
| davon C2-C4 | 1,15 |

Das Pyrolysegas setzt sich überwiegend aus Kohlenmonoxid und Kohlendioxid zusammen.
(Christian Gerdes)

5.5 Pyrolysereaktoren

Das Pyrolyseverfahren lässt sich nicht nur nach der Prozessgeschwindigkeit und den jeweiligen Bedingungen unterscheiden, sondern auch nach den unterschiedlichen Bauart bedingten Pyrolyseprozessen. Nachfolgend werden die drei hauptsächlich benutzten Anlagentypen beschrieben.

5.5.1 Drehtrommelpyrolyse

Die Drehtrommelpyrolyse ist ein thermischer Zersetzungsprozess, der je nach Einsatzprodukt in einer reduzierenden Atmosphäre bei Temperaturen bis zu 950°C abläuft. Die Pyrolyse findet in einem Ofen mit innenliegendem Rollkörper statt. Der zylindrische Rollkörper befindet sich im Bezug auf die Mittelachse des Zylinders in einer horizontalen Lage. Die Biomassebrennstoffe werden in dem rotierenden Zylinder transportiert und durchmischt. Der Rollkörper wird von außen beheizt, wobei die Temperaturen, je nach eingesetztem Rohmaterial, dem Optimum angepasst werden können. Durch die Rotation wird die Biomasse gleichmäßig pyrolysiert, sodass die Endprodukte (z.B. Biokohle) eine homogene Masse bilden. Die Abbildung zeigt einen beidseitig gelagerten Drehtrommelreaktor.

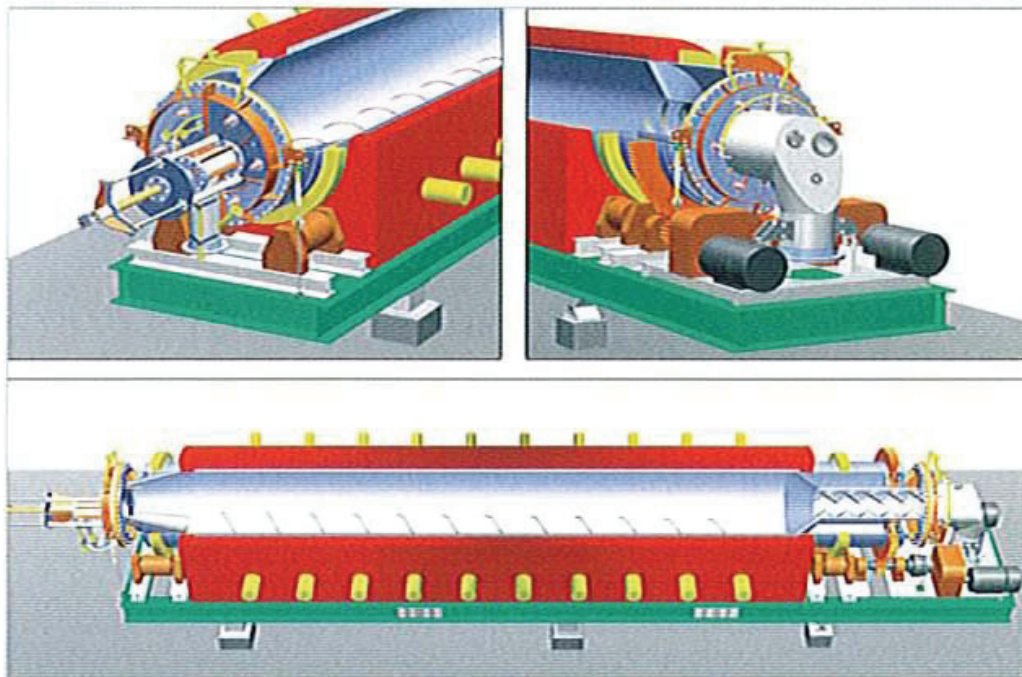


Abbildung 5-3 Drehtrommelreaktor der Firma VTA

5.5.2 Wirbelschichtpyrolyse

Bei der Wirbelschichtpyrolyse gibt man fein zermahlene Biomassestücke in einen Behälter, wo diese durch ein von unten einströmendes heißes Gas verwirbelt und pyrolysiert werden. Das heiße Gas- oder Luftgemisch kann aus einem der Pyrolyse nachgeschalteten Verbrennungsvorgängen (Flox- Feuerung) bereitgestellt werden. Die Biomassepartikel werden durch die Verwirbelung gleichmäßig pyrolysiert. Die synthetisierten Gase und das eingeblasene Gasgemisch werden durch ein Ventil, das am oberen Teil des Behälters angebracht ist, ausgelassen und somit von den festen Bestandteilen (Biokohle) separiert. Die Biokohle wird nach einer bestimmten Verweildauer herausgelassen. Teilweise muss die Verwirbelung durch Zugabe von zum Beispiel Quarzsand unterstützt werden, da zu große Biomassepartikel das eingeblasene Gasgemisch zu schnell durchlassen und somit die Verwirbelungsprozesse unterdrücken können. In der Abbildung ist der Aufbau eines Wirbelschichtreaktors dargestellt.

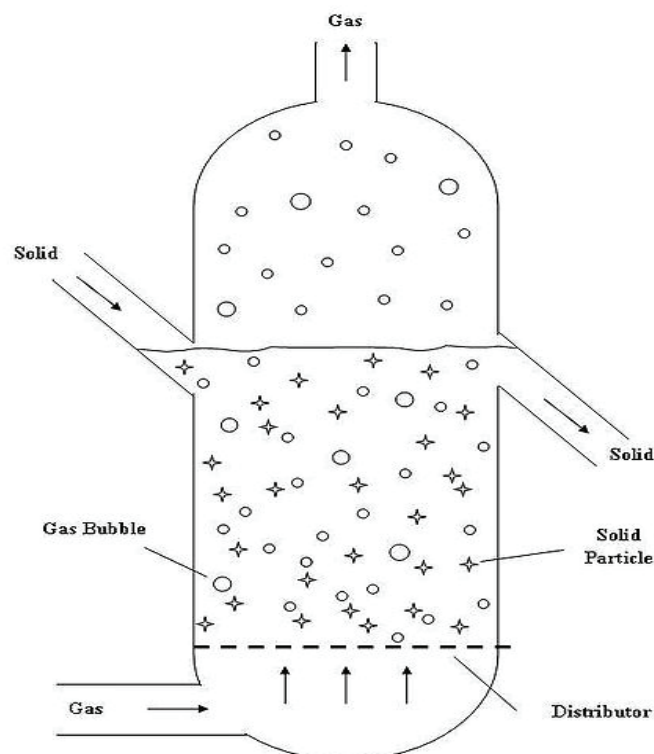


Abbildung 5-4 Aufbau eines Wirbelschichtreaktors

5.5.3 Doppelschneckenreaktor

Bei einem Doppelschneckenreaktor werden die zuvor zerkleinerten Biomassepartikel, durch zwei parallel laufende und ineinandergreifende Schnecken transportiert und mechanisch durchmischt. Die Doppelschnecken werden in einem unter Sauerstoffabschluss befindlichen Behälter geführt. Die Wärme kann entweder durch eine Befeuerung von Außen, oder durch hoch erhitzten Quarzsand, welcher den Biomassepartikeln beigemischt wurde, zugeführt werden. Die gleichlaufenden Schnecken kämmen ineinander und reinigen sich so von selbst. Die Pyrolysedämpfe werden aus der flachen Reaktionsmischung schnell herausgeführt. Vor der Kondensation der Pyrolysedämpfe werden die in der Doppelschnecke mitgeführten Kohlepartikel in einem Heißzyklon abgeschieden. Nach der Auskondensation des Pyrolyseöls kann das Pyrolysegas zum Aufheizen des Quarzsandes, oder der Doppelschnecken-Behälterhülle verbrannt werden. Die leichten Biokohlepartikel werden im Sandkreislauf durch Sieben und Sichten von dem Quarzsand getrennt. Nachfolgend ein Bild einer Pyrolyseanlage mit einem Doppelschneckenreaktor.

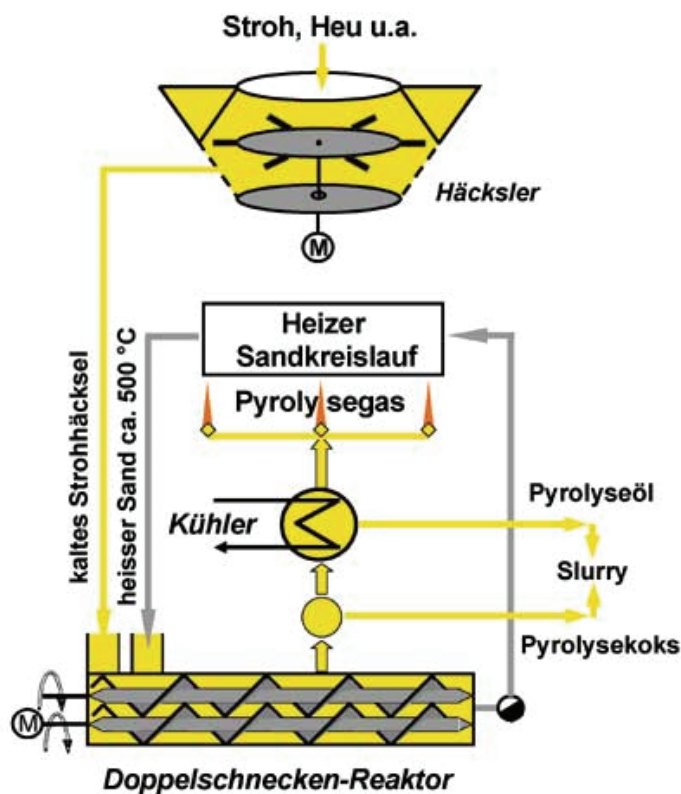


Abbildung 5-5 Aufbau eines Doppelschneckenreaktors

5.6 Karbonisierung

Die Karbonisierung, oder auch Verkohlung, beschreibt eine Reihe von Pyrolyseprozessen, die den herkömmlichen Methoden der Holzkohleherstellung gleicht und wobei Biokohle produziert wird, die mit die höchsten Kohlenstoffgehalte aufweist. Der autotherme Karbonisierungsprozess ist eine Methode die überall auf der Welt in der ländlichen Bevölkerung weit verbreitet ist. Der Prozess der Verkohlung ist für die festen Syntheseprodukte optimiert worden. Zudem werden noch kondensierte Gase erzeugt, die in der Industrie Verwendung finden und als Holzessig bezeichnet werden. Der Holzessig kann als Basis für Bestandteile von Nahrungsmittel-Aromastoffe dienen und besitzt zudem einen gewissen Düngungswert für Pflanzen. Der autothermale Prozess ist eine der realistischsten Optionen für degradierte Böden in Entwicklungsländern mittels Biokohleapplikationen die Bodenfruchtbarkeit aufzubauen. (Evelyn Krull)

5.7 Vergasung

Die Vergasung ist der Prozess, bei dem kohlestoffhaltiges Material (Kohle, Erdöl und auch Biomasse) überwiegend in Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt wird. Die Reaktionen laufen bei hohen Temperaturen ab sowie unter kontrollierten Sauerstoffbedingungen manchmal auch unter hohem Druck von 15 bis 50 bar. Das Gasgemisch ist das Produkt mit der höchsten Energie und der Prozess der Vergasung findet bei der sauberen Entsorgung von Abfall Verwendung. Bei Anlagen mit langsamen Pyrolyseprozessen, wird die Vergasung vielfach benutzt um bestimmte Synthesegase aus Biokohle- Abfallprodukten zu erzeugen. Die Synthesegase werden für die Erzeugung elektrischer Energie mittels Gas- oder Dampfturbinen verwendet, für die Herstellung von Chemikalien oder Düngemitteln genutzt oder aber mehrfach gereinigt für den Einsatz als Flüssigtreibstoff. Durch die Umstellung der Biomassenutzung auf Gassyntheseprozesse ist die Produktion von Biokohle zurückgestellt worden. Allerdings hat die Biokohle aus Vergasungsprozessen einen höheren Brennwert und findet als Basis für die Aktivkohleproduktion Verwendung. Außerdem kann die Biokohle als Trägerstoff für langsam wirkende Düngemittel eingesetzt werden. (Evelyn Krull)

6 Kraft Wärme Kopplung

Zur Nutzung der überschüssigen Wärme aus der Flox- Brennkammer ist es sinnvoll die technischen Möglichkeiten der Kraft- Wärme- Kopplung (KWK) zu verwenden. Dadurch lassen sich höhere Wirkungsgrade für den Brennstoff erzielen. Laut Definition ist die Kraft- Wärme- Kopplung die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Strom. Die bei der Verbrennung der pyrolysen Gase entstehende Wärme kann z.B. mit einem Stirlingmotor in elektrische Energie umgewandelt werden und gleichzeitig kann ein Teil der Wärme den Pyrolyseprozess unterstützen oder zur Vortrocknung der Brennstoffe dienen. So werden durch die KWK vorhandene Energieträger, wie z.B. die Biomasse, optimal ausgenutzt, was bedeutet, dass bis zu 90% der eingesetzten Energie verwendet wird. Gegenüber der herkömmlichen getrennten Erzeugung von Wärme und Strom spart man durch die Kraft- Wärme- Kopplung bis zu 40% der Primärenergie (Das ist die Energie, die mit den natürlich vorkommenden Energieformen oder Energiequellen zur Verfügung gestellt wird.) ein. Um die Energieeffizienz von KWK- Anlagen zu beschreiben, vergleicht man die Versorgung eines Objekts (z.B. Gebäude) durch Strom und Wärme aus Kraft- Wärme- Kopplung mit einer alternativ möglichen Versorgung durch zwei getrennte Erzeugungssysteme. Zum Beispiel muss man, um einen Verbraucher mit 28 kWh Strom und 62 kWh Wärme zu versorgen, in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) 100 kWh Primärenergie einsetzen. Bei einer getrennten Energieerzeugung in einem Kondensationskraftwerk, mit einem Wirkungsgrad von 35%, und einer Heizung fallen insgesamt 153 kWh Primärenergie an. Die KWK spart also im Vergleich zur getrennten Energieerzeugung 35% Energie ein und verursacht 29% geringere Kohlendioxidemissionen. Die Werte unterscheiden sich je nach verwendetem Brennstoff.

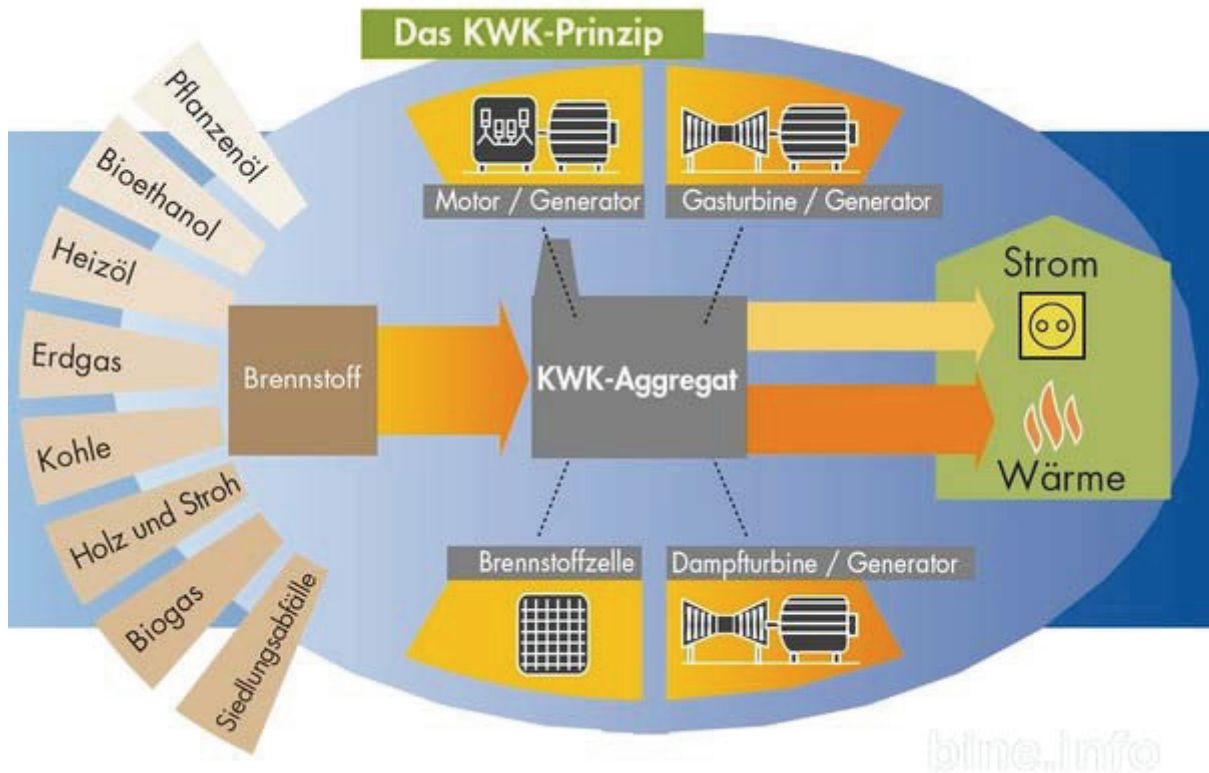


Abbildung 6-1 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung

7 Flox Verfahren

Die Abkürzung Flox steht für das Verfahren der **F**lammenlosen **O**xidation, also ein Verbrennungsvorgang ohne Flamme. Dabei wird Brenngas, Brennluft und rückzirkulierendes Abgas in einem exakt abgestimmten Verhältnis durchmischt und somit durch den Flox-Brenner eine Verbrennung ohne Flamme erzeugt. Ein entscheidender Vorteil ist dabei, dass auch bei hohen Ofentemperaturen nahezu keine Stickoxide gebildet werden. Außerdem wird eine effiziente Nutzung der Brennstoffe ermöglicht, da die heißen Abgase zur Vorerwärmung der Brennluft genutzt werden können. Bei konventionellen Verfahren lassen sich die Grenzwerte der TA- Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) nur durch eine nach geschaltete und sehr aufwändige Reinigung der Abgase erreichen. Der Luftstickstoff oxidiert hauptsächlich in den heißen Zonen des Flammenumfeldes. Im Gegensatz zu konventioneller Verbrennung treten solche Temperaturspitzen beim Flox- Verfahren nicht auf und eine gleichmäßige Temperatur des Ofens bis zu 1400°C kann bei geringen Stickstoffemissionen aufrechterhalten werden. Die Technologie der flammenlosen Verbrennung kommt derzeit hauptsächlich in der Stahlindustrie und bei Brennern für die Wärmebehandlung zum Einsatz. Seitdem auch Projekte, die sich mit der Nutzung von Schwachgasen und Biotreibstoffen und der Kraft Wärme Kopplung (KWK) beschäftigen, durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und die EU gefördert werden, eröffnen sich neue Einsatzmöglichkeiten für die Flox- Technologie.

7.1 Funktionsweise von Flox- Brenner

Bei der flammenlosen Verbrennung strömen Brenngas und Brennluft unvermischt mit hoher Strömungsgeschwindigkeit in die Brennkammer. Die sehr starke interne Rezirkulation der Abgase in der Brennkammer und deren Vermischung mit der Brennluft bilden den wesentlichen Unterschied zu konventionellen Brennern. Durch diese Vorgänge und einer verzögerten Vermischung von Luft und Brenngas ist die Ausbildung einer Flammenfront nicht mehr möglich. Der Brennstoff oxidiert bei ausreichend hohen Temperaturen von mindestens 800°C im gesamten Brennraumvolumen, wodurch sich sehr homogene Temperaturen einstellen. Somit wird die Bildung thermischer Stickoxide vermieden, die vor allem im äußeren Bereich der Flamme, wo die höchsten Temperaturen zu verzeichnen sind, vorkommen. Mit der homogenen Temperaturverteilung lässt sich außerdem eine höhere mittlere Brennraumtemperatur aufrechterhalten.

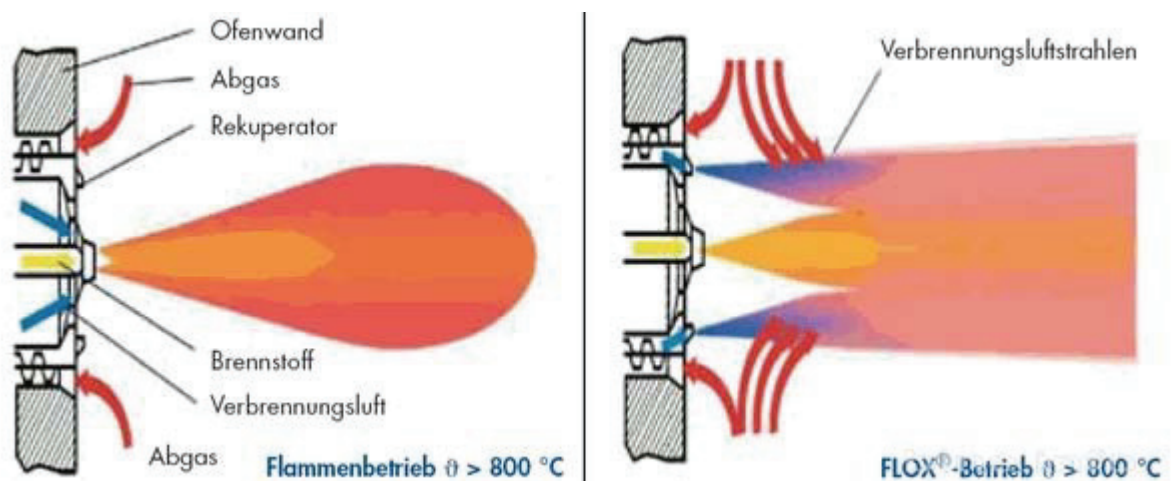


Abbildung 7-1 Flammenlose Verbrennung im Flammenbetrieb (links) und mit flammenloser Oxidation (rechts)

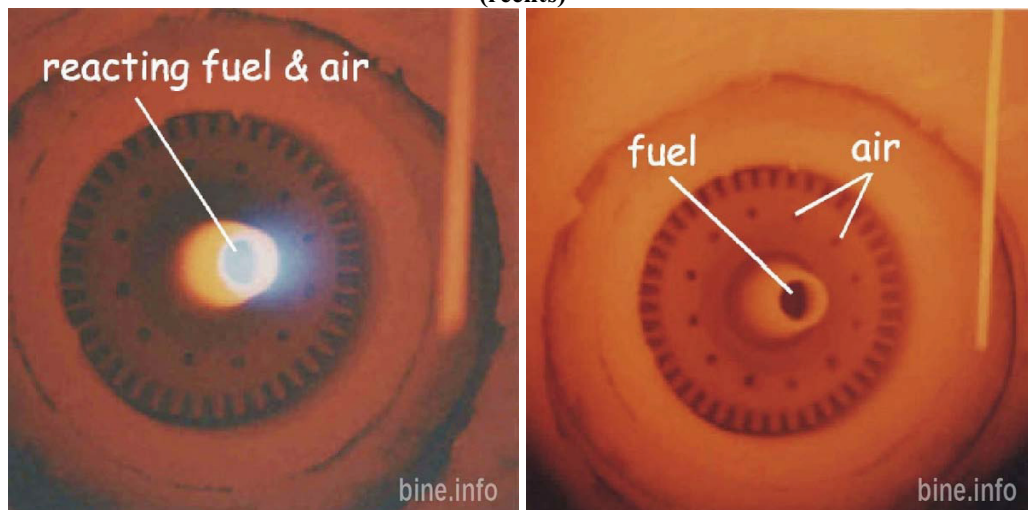


Abbildung 7-2 Brenner im Flammenbetrieb rechts und Brenner im Flox-Betrieb links

7.2 Flox- Brenner Einsatz im Biomasse Pyrolyse Reaktor

Schwachgase, wie z.B. Deponiegas, Biogas, Klärgas oder Holzgas, zum letztgenannten zählt auch das Pyrolysegas, haben im Vergleich zum Erdgas einen geringeren Energiegehalt. Außerdem schwanken die Brennstoffqualitäten häufig kurzfristig bei Gasen aus Produktionsprozessen wie z.B. Biogas und Holzgas. Das Ziel ist es diese Gase mit sehr unterschiedlicher Zusammensetzung energieeffizient und schadstoffarm zu nutzen. In Forschungsprojekten wurde bewiesen, dass Flox- Brenner im Vergleich mit konventionellen Brennern mit energiearmen Gasen besser zurecht kommen. Zudem führt eine schwankende Brennstoffqualität bei flammenloser Oxidation nicht gleich zu Problemen mit der Flammenstabilität. Die heiße Abluft der Brennkammer kann dem Pyrolyseprozess unterstützend zurückgeführt werden oder zusätzlich einen Stirlingmotor antreiben.

7.3 Energiebilanz des Pyrolysereaktors mit Flox- Feuerung

Der Primärenergieinput (berechnet mit dem Massenstrom der absoluten Trockenmasse multipliziert mit dem Heizwert der Biomasse) wird im Pyrolysereaktor energetisch wie auch stofflich aufgespalten in einen Pyrolysegasstrom und den Biokohlestrom, welcher ca. 30% der eingesetzten Biomasse ausmacht. Die Biokohle besitzt etwa den doppelten Heizwert wie die eingesetzte Biomasse. Somit wird durch die Pyrolyse etwa 66% des Primärenergieinputs als Biokohle ausgekoppelt. Das in der Biomasse eingelagerte Wasser wird bei der Pyrolyse verdampft und mit dem brennbaren Pyrolysegas durch die Brennkammer geführt. In der Brennkammer mit der Flox- Feuerung wird somit der Heizwertanteil von ca. 34% sowie die Wärme des Pyrolysegases, welches man als Gas- Dampfgemisch bezeichnen kann und eine Temperatur über 600°C besitzt, umgesetzt. Die für die Verdampfung der Brennstofffeuchte aufzubringende Energie wird prozessintern im Kreis geführt, da die Abgase der Feuerung mittels eines Rezirkulationsprozesses wiederum zur Aufheizung und Verdampfung der Biomassefeuchte und Pyrolyse eingesetzt werden. Abzüglich der Wärmeverluste von etwa 4% stehen somit ca. 30% des Primärenergieinputs für eine Wärmeauskopplung zur Verfügung.

Diese Wärmeenergie kann z.B. für Heizzwecke von Betriebs- oder Wohngebäuden genutzt werden oder einem Stirlingmotor als Antriebsenergie dienen.

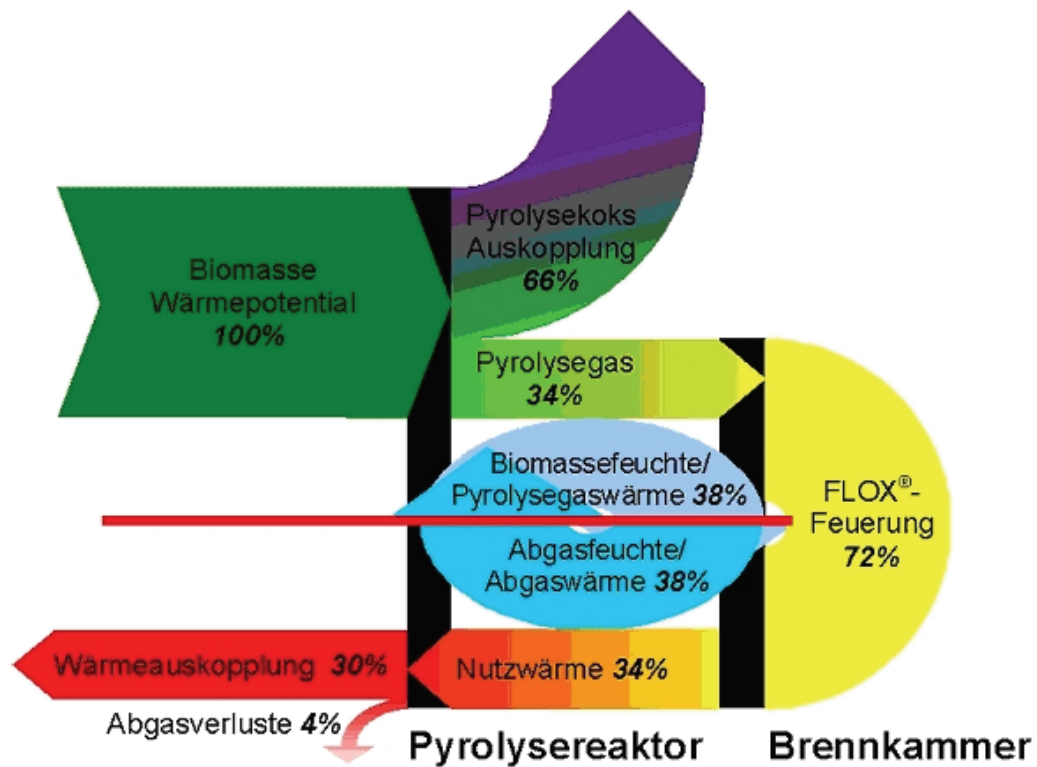


Abbildung 7-3 Energiebilanz Pyrolysereaktor mit Flox-Feuerung (ohne Verluste)

8 Zusammenfassung

Das Verfahren der Pyrolyse bietet für die globale und speziell auch für die deutsche Agrarwirtschaft ein nicht zu unterschätzendes Nutzungspotential. Dazu gehört eine optimale Verwertung von organischen Reststoffen, die direkte Energiegewinnung oder die Bereitstellung von Pyrolyseprodukten für eine spätere Energieerzeugung und die bodenverbessernden Wirkungen des festen Pyrolyseproduktes, der Biokohle.

In der deutschen Landwirtschaft können sich das Pyrolyseverfahren und die Biokohleapplikation in den Oberboden nur dort sinnvoll etablieren, wo permanent organische Reststoffe (wie z.B. Futtermittelreste, verdorbene Silagen oder Erntenebenprodukte) anfallen oder Standorte einen Anbau von Kulturpflanzen nicht zulassen (extreme Sandböden, Niederschlags benachteiligte Gebiete). Ansonsten ist in Deutschland auf guten Böden nicht mit einer ausgeprägten Ertragssteigerung zu rechnen, da die Böden im Großen und Ganzen ausreichend mit Nährstoffen und Humus versorgt sind. Ein speziell für die Pyrolyse vorgesehener Anbau von Energiepflanzen sollte wenn dann nur auf Grenzstandorten erfolgen, um die ertragreicheren Flächen für die Lebensmittelproduktion freizuhalten, da schon zum heutigen Zeitpunkt Kriege aufgrund von Nahrungsmittelknappheit geführt werden und die Deckungsbeiträge in der Lebensmittel-Rohstoffproduktion höher ausfallen.

Global gesehen ermöglicht das Pyrolyseverfahren eine bessere Ausnutzung von pflanzlichem Material zur vorrangigen Produktion von Biokohle, die in den sehr benachteiligten Regionen der Erde eine Bewirtschaftung der Böden überhaupt durchführbar macht und zur Nahrungsmittelproduktion der dort heimischen Bevölkerung einen großen Beitrag leisten kann.

Wenn man bedenkt, dass etwa 300 bis 500 Millionen Menschen, auf einem Drittel der 1,5 Milliarden Hektar landwirtschaftlich genutzten Landoberfläche, Wanderfeldbau mit Brandrodung betreiben, kann die Pyrolysetechnik einen großen Nutzen im Bereich der dauerhaften Bodenverbesserung erzielen, eine effektivere Nutzung von Biomasse erreichen und weitere Brandrodungsvorhaben unterbinden. Der derzeitige Prozess der Regenwaldzerstörung mittels Brandrodung kann durch die Biomassepyrolyse des gefällten Holzes unterbrochen werden. Dadurch bleibt der wertvolle Kohlenstoffspeicher und Sauerstoffproduzent, Regenwald, in gewisser Hinsicht erhalten, da das Pyrolyseprodukt, die Biokohle, einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweist, der bei einer Applikation in den Boden sehr lange Zeit erhalten bleibt. Somit werden Emissionen, die durch die Brandrodung

entstehen, minimiert, Böden auf längere Zeit gesehen fruchtbar gemacht und ein sesshaft werden von Kleinbauern ermöglicht.

Die tropischen Wälder enthielten in ihrer ursprünglichen Größe zwischen 20 und 25% des terrestrischen Kohlenstoffs. Da bis zum heutigen Zeitpunkt etwa 50% der Regenwaldfläche zerstört wurden, kann man leicht eine der Hauptquellen für die Treibhausgasanreicherung in der Atmosphäre, der beschleunigten Erderwärmung und des darauf beruhenden Klimawandels, festmachen.

Für das Pyrolyseverfahren stehen eine große Anzahl von unterschiedlichen Anlagentypen und –Bauweisen für eine Nutzung in der Landwirtschaft zur Verfügung. Die Variationen gehen von sehr kleinen Anlagen bis hin zu industriellen Größenordnungen. Außerdem variieren die Einsatzrohstoffe für die Pyrolyse von z.B. organischen Abfallresten, Klärschlamm, Wirtschaftsdünger (Hühnertrockenkot) oder Stroh bis hin zu Hauptprodukten wie Getreide. Die Art des Pyrolyseverfahrens, Langsame oder schnelle Pyrolyse, sollte je nach der gewünschten Zusammensetzung der Produkte entschieden werden. Da sich bei beiden Verfahren die Biokohleerträge kaum unterscheiden beruht die Wahl des Verkohlungsverfahrens auf die Nutzung eines der anderen zwei Produkte, dem Pyrolyseöl oder dem Pyrolysegas. Bei einer Kombination mit der Flox-Feuerung sollte die langsame Pyrolyse zum Einsatz kommen, bei der ca. 80% Pyrolysegas produziert werden. Die Flox-Feuerung hat sich bis vor kurzer Zeit nur in industriellen Anlagen der Stahl- oder Glasindustrie bewährt und wird derzeit für das Pyrolyseverfahren optimiert und erforscht. Bei einem Vergleich zur herkömmlichen Verbrennung von Schwachgasen, kommt die Flox-Feuerung mit den schwankenden Zusammensetzungen und Energiegehalten der Schwachgase sehr gut zurecht. Außerdem entstehen bei der flammenlosen Verbrennung so gut wie gar keine Stickoxid-Emissionen. Die erzeugte Wärme aus dem Flox-Brenner kann zusätzlich noch den Pyrolysevorgang unterstützen. Die Wärmenutzung für Gebäude- Heizzwecke oder der Vortrocknung von Pyrolyserohmaterialien kann außerdem erfolgen, und somit den Wirkungsgrad der gesamten Anlage steigern. Fördertechnisch gesehen stellt der Staat monetäre Mittel bereit, die die Wahl dieses Biomassenutzungsverfahrens erleichtern und eine Investition, für derartige Anlagentechniken unterstützen. Laut Erneuerbaren- Energie- Gesetz werden z.B. die Nutzung nachwachsender Rohstoffe gefördert, neue Entwicklungsverfahren unterstützt und eine Stromabnahme durch die Netzbetreiber und festgelegte Strompreise bei der Biomasseverstromung abgesichert.

Diese Arbeit hat einen kleinen Überblick zum Pyrolyseverfahren und der Biokohlverwendung in der Landwirtschaft gegeben. Es besteht, bei dem Pyrolyseverfahren von Biomasse und der Verwendung der Biokohle als Bodenverbesserer, noch ein hoher Forschungsbedarf.

Bei einem zusätzlichem Informationsbedarf zu der, in der Arbeit, beschriebenen Thematik wird auf die Nutzung der Quellen im nachstehenden Literaturverzeichnis hingewiesen.

9 Literaturverzeichnis

- Airterra www.airterra.ca – CO2 and Climate Change; Biochar
- Alternaenergy www.alternaenergy.ca
- ANZ-Biochar.org www.anzbiochar.org – Australia and New Zealand Biochar Researchers Network
- Bigchar www.bigchar.com.au – Australien biochar and mobile biochar production
- BINE.info www.bine.info/hauptnavigation/publikationen/publikation/flammenlose-Verbrennung/ - Energieforschung für die Praxis
- Biochar International.org www.biochar-international.org – International Biochar Initiative
- Biochar.info www.biochar.info
- Biochar.net www.biochar.net – Organic Biochar Development
- Biochar.org www.biochar.org – Balance carbon and restore soil fertility
- Biocharengineering www.biocharengineering.com
- Biochar-Farmers.org www.biocharfarms.org – resources for sustainable use of biochar in agriculture
- bioliq Karlsruhe iwrwww1.fzk.de/bioliq/schnell1.html – biomass to liquid Karlsruhe
- C. Gerdes, Dissertation: „Pyrolyse von Biomasse- Abfall: Thermochemische Konversion mit dem Hamburger- Wirbelschichtverfahren“; 2001, [dokserv.pdf](#)
- C. Steiner- Dissertation: “Slash & Char As Alternative To Slash & Burn”; 1. Auflage 2007, Cuviller Verlag Göttingen, ISBN: 978-3-86727-444-9
- D. J. Tenenbaum: „Biochar: Carbon Mitigation from the Ground Up“; 2009, [EHP117pa70PDF.pdf](#)
- D. Meier, O. Faix: “Heizöl und Chemie- Rohstoffe aus Holz- Flash-Pyrolyse eröffnet neue Möglichkeiten”; 1999, [fr-1999-1-13-Heizoel.pdf](#)
- E. Krull: “Biochar, climate change and soil: A review to guide future research”; 2009, [poei.pdf](#)

- E.Henrich, E.Dinjus, D.Meier: “Hochwertige Biomassenutzung durch Flugstrom-Druckvergasung von Pyrolyseprodukten”; 2002, [pub_meier_1_02.pdf](#)
- Eprida www.eprida.com
- F. Behrendt: “Direktverflüssigung von Biomasse- Ein Überblick”; 2007, [Vortrag_Behrendt_29_11_2007.pdf](#)
- GEOS www.geos.ed.ac.uk/sccs/biochar - UK Biochar Research Centre
- Growing new life.com www.growingnewlife.com – Climate change, energy crisis, environment and population growth- the way forward
- Hydrocarb www.hydrocarb.de – Bioenergie- Systeme
- Ithaka Journal www.ithaka-journal.net – Journal für Terroirwein, Biodiversität und Klimafarming
- M. Antonietti: „Magic Coal from the Steam Cooker“; 2006, [MaxPlankCharcoal.pdf](#)
- Pyreg www.pyreg.de - Verfahren zur thermischen und stofflichen Verwertung von Biomasse
- S. J. Scherr, S. Sthapit: „Farming and Land Use to Cool the Planet“; 2009, [SOW09_chap3.pdf](#)
- VTA www.vta.de/de/Technologien/Pyrolyse - VTA- Drehtrommelpyrolyse
- W. Rosenberg, C. Noack: “Entwicklungsfaktor Biomasse?“ – Energetische Nutzung nachwachsender Biomasse als Chance ländlicher Regionen; 2004, [Biomasse_08asmall.pdf](#)
- W. Sehn, H. Gerber: „Pyrolyse mit flammenloser Oxidation kombinieren“; 2007, [BWK-1.pdf](#)
- Wikipedia www.wikipedia.org – Die freie Enzyklopädie

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Bachelorarbeit von mir selbstständig verfasst ist und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

.....
Markus Kröhnert

Klüß, den 16. Februar 2010