

HYDROTHERMALE CARBONISIERUNG
ORGANISCHER RESTSTOFFE

MACHBARKEITSBETRACHTUNG DER TECHNISCHEN
REALISIERUNGSMÖGLICHKEITEN
IN DER REGION KAGERA/TANSANIA

Diplomarbeit

von
Ariane Krause

Erstbetreuung:

Dipl.-Ing. Axel Funke

Univ. Prof. Dr. Ing. Felix Ziegler

Institut für Energietechnik - Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik

Zweitbetreuung:

Prof. Dr. Martin Kaupenjohann

Institut für Ökologie - Fachgebiet Bodenkunde

Technische Universität Berlin

19. August 2010



Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Berlin, den 19. August 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung der Arbeit	2
1.2	Gliederung der Arbeit	3
1.3	Hintergrund	3
2	Terminologie	7
3	Biochar - Einsatz von Biokohle zur Bodenverbesserung	9
3.1	Bodenkundliche Grundlagen	9
3.2	Probleme der tropischen Böden Afrikas	13
3.3	Anthropogene Mutterböden	16
3.4	Wirkung von Kohle als Bodenverbesserer	19
4	Die Verkohlung von Biomasse	22
4.1	Prinzipien der Verkohlung	22
4.2	Eigenschaften von Kohle und Biochar	26
4.3	Überblick über die Verfahren zur Nutzung von Bioenergie	28
4.4	Pyrolyse zur Verkohlung von Biomasse	33
4.5	Hydrothermale Carbonisierung (HTC)	39
5	Machbarkeitsbetrachtung	50
5.1	Beschreibung des betrachteten Systems	51
5.2	Betrachtung der HTC-Technik: Technische Anforderungen	52
5.3	Umfeldbetrachtung: Möglichkeiten und Grenzen vor Ort	55
5.4	Synthese	57
6	Schlußfolgerung & Handlungsempfehlungen	62
6.1	Machbarkeitsaussage	62
6.2	Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf	63

7 Danksagung	67
Literaturreferenzen	69

Abbildungsverzeichnis

1.1	Karte von Tanzania [1]; „Drei-Stein-Feuer“; Typisches Landschaftsbild Kageras (in der Regenzeit)	4
1.2	Bau der Pilotanlage in Berlin - Anlage in Tanzania (Fotomontage) . .	5
3.1	Die Böden Amazoniens: links Ferralsol, rechts Terra Preta [2]	17
3.2	Langfristige Stabilität von Black Carbon im Vergleich zum Abbau organischer Substanz [5]	21
4.1	Aufbau einer Pflanzenzelle aus Cellulose, Lignin und Hemicellulose [3]	23
4.2	Molekularer Aufbau (a) und strukturelle Anordnung (b) von Black Carbon [4]	25
4.3	Elektronenmikroskopaufnahmen der porösen Struktur einer Holzkohle (links) und einer Biokohle aus Geflügelmist (rechts) [5]	26
4.4	Van-Krevelen-Diagramm zur Charakterisierung von Biomasse sowie festen, flüssigen und gasförmigen fossilen Energieträgern [6]	28
4.5	Schema der technischen Bioenergienutzung (eigene Darstellung angelehnt an [7])	29
4.6	Produkte der thermo-chemischen Umwandlung durch Pyrolyse (am Beispiel Holz) [7]	32
4.7	Traditionelle Holzkohleproduktionsanlagen: ober- und unterirdischer Erdmeiler [5]	35
4.8	Traditioneller gemauerter Meiler [7]	36
4.9	Traditionelle Holzkohleproduktion im „Missouri“ Meiler aus Beton [5]	36
4.10	Transportable Pyrolyseanlage aus Metall [5]	38
4.11	Carbonisierung von Gras (links) zu HTC-Kohle (rechts) [9]	39
4.12	Schema wichtiger Reaktionsmechanismen bei der HTC [8]	41
4.13	HTC-Batch-Reaktor (links) und Entwurf einer quasi-kontinuierlichen HTC-Anlage (rechts) [9]	47
5.1	Kopplung von Biogaserzeugung und Carbonisierung durch die Nutzung von organischen Reststoffen in Tansania	51

5.2	Systematische Darstellung der Machbarkeitsbetrachtungen (eigene Darstellung)	58
6.1	Modell eines möglichen Niedertemperatur-HTC-Reaktors	66

Tabellenverzeichnis

4.1	Vergleich der thermo-chemischen Umwandlungsverfahren anhand charakteristischer Prozessgrößen [7] [6]	32
4.2	Vergleich der beiden Verkohlungsverfahren klassische Pyrolyse und HTC	33
4.3	Aufteilung der Pyrolyseverfahren in zwei Gruppen [7] [5]	34
4.4	Charakterisierung der klassischen Holzverkohlungsanlagen [5] [7] [10] .	37
4.5	Thermodynamische Zusammenhänge zwischen Prozesstemperatur und Sattdampfdruck (Auszug aus der Dampftafel für Wasser [11])	44
4.6	Vergleich der HTC-Verfahren nach technischen Anlagenprinzipien . .	49

Begriffe und Einheiten

Beschreibung	Einheiten- zeichen	Einheitenname	verwendete Präfixe
Anbaufläche	ha	Hektar	
	10^4 m^2	Quadratmeter	
Länge	m	Meter	mm (10^{-3}) nm (10^{-9})
Gewicht	g	Gramm	kg (10^3) mg (10^{-3})
	t	Tonne	
Kohlenstoffgehalt	$\frac{g}{kg}$	Gramm C pro Kilo- gramm Boden	
Niederschlagsmenge	mm	Millimeter	
Speichervermögen	cmol/kg		
Stoffmenge	mol	Mol	cmol (10^{-2})
Temperatur	°C	Grad Celsius	
Volumen	l	Liter	
	10^{-3} m^3	Kubikmeter	
Wassergehalt	%	Masseprozent	

Abkürzungen

BiogaST	Biogas support for Tanzania
BtL	Biomass-to-Liquid
engl.	Englisch
HTC	Hydrothermal Carbonisation
HTG	Hydrothermal Gasification
HTL	Hydrothermal Liquefaction
IBI	International Biochar Initiative
k.A.	keine Angabe
PME	Pflanzenölmethylester
PIK	Potsdam-Institut für Klimaforschung e.V.
pyr.	pyrolytisch
RME	Rapsölmethylester
TOC	total organic carbon
TOM	total organic matter
TS	Trockensubstanz

Einleitung

Der Zugang zu Energie bestimmt maßgeblich die landwirtschaftliche Produktionsfähigkeit, die Versorgung mit sauberem Trinkwasser, den Zugang zu Information und Kommunikation und die Eingliederung in die Weltwirtschaft und ist somit ein wesentlicher Faktor für die Entwicklung Afrikas. Dabei ist eine große Herausforderung, Zugang zu Energie und ökologische Nachhaltigkeit in Einklang zu bringen. Eine Möglichkeit der Energieerzeugung ist die nachhaltige Produktion von Biogas über den Prozess der anaeroben Vergärung von Resten aus der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion. Neben der energetischen Nutzung der Erntereste ist auch deren stoffliche Nutzung in der Landwirtschaft von großer Bedeutung. Um die enthaltenen Nährstoffe wieder in den landwirtschaftlichen Kreislauf zu bringen, ist eine Rückführung der Erntereste erforderlich. Es besteht nun die Möglichkeit, die vergärten Erntereste vor der Ausbringung auf die Felder thermo-chemisch zu behandeln, sodass einige Eigenschaften des Materials verändert werden, was die erwünschte positive Wirkung im Boden verstärkt. Dabei handelt es sich um die Möglichkeit der Umwandlung von Biomasse zu Biokohle, die dann nach dem Prinzip der Terra Preta (d.h. die Herstellung von fruchtbaren Böden mit hohem Kohlenstoffanteil, die von den Inkas in Südamerika praktiziert wurde) als Bodenverbesserer eingesetzt werden kann. Dieser Ansatz ist zunächst überzeugend, da er eine Möglichkeit bieten kann, sowohl die Energiearmut als auch den Hunger zu verringern.

Die Idee des Gesamtprojektes ist folgende Innovation für die kleinbäuerliche Landwirtschaft in Afrika:

Kopplung von (1) Vergärung von häuslichen Abfällen und Ernteresten in Kleinstbiogasanlagen (*Biogasproduktion*), (2) hydrothermale Carbonisierung der Gärrückstände und Toilettenabfälle (*Hygienisierung und Biokohleproduktion*) und (3) Ausbringung der karbonisierten Rückstände auf landwirtschaftliche Flächen (*Bodenverbesserung und Nahrungsproduktion*).

Das entwickelte Konzept erscheint für den **Ressourcenschutz und eine nachhaltige Nahrungsmittelproduktion kleinbäuerlicher Betriebe in Afrika** besonders geeignet. Der erste und notwendige Schritt zur Umsetzung der Idee ist die Durchführung einer Machbarkeitsstudie. Für die Bewertung der praktischen Machbarkeit und der Nachhaltigkeit ist jedoch noch Forschungsarbeit erforderlich.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Die übergeordnete Zielsetzung ist die **Energieversorgung und Nahrungsproduktion in Tansania zu verbessern** (hinsichtlich Menge, Qualität und Ertragsicherheit) indem organische Reststoffe erst energetisch und anschließend stofflich genutzt werden, sodass dabei die Böden nachhaltig verbessert und Nährstoffkreisläufe geschlossen werden.

Mein Beitrag dazu ist die Prüfung, ob eine Kopplung von Biogaserzeugung aus biogenen Abfällen mit der anschließenden Carbonisierung und gleichzeitigen Hygienisierung der Gärreste zusammen mit den Toilettenabfällen zum Erreichen des Ziels beitragen kann.

Dabei liegt der Schwerpunkt meiner Arbeit auf einer **Analyse der technischen Machbarkeit der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC)** und die zentrale Fragestellung, die der Arbeit zugrunde liegt lautet:

Was gilt es für eine technische Realisierung von HTC zu beachten und erscheint diese unter gegebenen Umständen in Tansania machbar?

Mit dieser Diplomarbeit soll eine mögliche Umsetzung der HTC-Technik theoretisch geprüft werden und ein geeignetes Verfahren für eine dezentrale Realisierung in kleinem Maßstab und in Kombination mit den Kleinstbiogasanlagen des Projekts Biogas Support for Tanzania („BiogaST“) gefunden werden.

Als Rahmenbedingung der technischen Machbarkeitsbetrachtungen gelten dabei neben der Kopplung an das Projekt „BiogaST“ die ökologische Situation vor Ort (Art und Menge zur Verfügung stehender Substrate), Standortbedingungen (Verkehrswegen, Energie- und Wasserversorgung) sowie Einschränkung bei der Materialauswahl auf die regionale bzw. nationale Wirtschaft.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist somit eine strukturierte Darstellung von Anforderungen und Möglichkeiten sowie fehlenden Informationen und Daten um die übergeordnete Zielsetzung im konkret betrachteten Anwendungsfall zu erreichen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Nach kurzen Erläuterungen zur Terminologie der Kohlen in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 zunächst eine Einführung in die Bodenkunde und ein Überblick zum Prinzip der Terra Preta und zur Wirkung von Biokohle im Boden gegeben. Nachfolgend werden in Kapitel 4 die Prinzipien der Verkohlung erläutert und die technische Umsetzung in den energietechnischen Kontext der Bioenergienutzung gesetzt. Um die Wahl des HTC-Verfahrens für meinen Ansatz nachvollziehbar zu machen wird der Stand der Technik zur HTC erläutert. Bei der anschließend in Kapitel 5 durchgeführten Machbarkeitsbetrachtung wird die Anpassung der HTC-Technik zur Produktion von Biokohle an die lokal gegebenen Möglichkeiten geprüft. In Kapitel 6 folgt eine Aussage über die Machbarkeit und daraus zu ziehende Schlussfolgerungen. Abschließend ist der noch notwendige Forschungs- und Entwicklungsbedarf zusammengefasst, der für eine Anpassung der Technik und nachhaltige Umsetzung noch notwendig erscheint.

1.3 Hintergrund

Die Herausforderungen durch eine wachsende Bevölkerung mit ebenfalls wachsenden Bedürfnissen sowie durch den Klimawandel machen eine nachhaltige Energieversorgung und den Ressourcenschutz zu Prämissen für die Entwicklung Afrikas. Die oben genannte Idee kann möglicherweise einen Beitrag hierzu leisten.

Die Region Kagera in Tanzania

Zielgruppe dieses Projektes sind Familien in Karagwe, einem ländlichen Distrikt in der Region Kagera, die im Nordwesten Tanzanias zwischen dem Viktoriasee im Osten, Rwanda im Westen und Uganda im Norden liegt (siehe Abbildung 1.1 oben links). Der Name der Region stammt von dem sie durchfließenden Fluss Kagera, der schon zum Gewässersystem des Nils gehört. Die Landschaft ist savannenartig wobei seitlich des Flusslaufes hügeliges Gelände dominiert (siehe Abbildung 1.1 unten). Die Menschen in dieser Region leben in familiären Gemeinschaften mit durchschnittlich sieben Mitgliedern in abgelegenen Häusern zwischen Feldern. Landwirtschaft bildet die Lebensgrundlage der Menschen und trägt den Großteil zu ihrer Ernährung bei (d.h. Subsistenzwirtschaft). Sie macht es außerdem möglich, ein durchschnittliches Jahreseinkommen von 240 Euro zu erwirtschaften. Damit ist die Region eine der ärmsten Regionen Tanzanias. In Kagera werden hauptsächlich Bohnen und Bananen angebaut; die Bananenproduktion in der Region ist die größte des Landes. Als sog. „cash crop“, d.h. ausschließlich zum Verkauf, wird außerdem auf ca. 10 % der landwirtschaftlichen Fläche Kageras Kaffee angebaut. Eine weitere Einkommensquelle



Abb. 1.1: Karte von Tanzania [1]; „Drei-Stein-Feuer“; Typisches Landschaftsbild Kageras (in der Regenzeit)

der ländlichen Regionen in Tanzania stellt neben dem Verkauf der Ernteprodukte die Produktion von Holzkohle dar, die dann in den Städten zum Kochen eingesetzt wird. Über 97 % der landwirtschaftlichen Haushalte verwenden Feuerholz zum Kochen auf dem sog. „Drei-Stein-Feuer“ (siehe Abbildung 1.1 oben links) [12]. Die vorwiegende Verwendung von Holz zur Bereitstellung der täglich notwendigen Energie führt zu großen Problemen in den ländlichen Regionen wie die fortschreitende Entwaldung mit den bekannten negativen Folgen wie Bodenerosion etc. (siehe Abbildung 1.1 unten¹).

Projekt Biogas Support for Tanzania „BiogaST“

Ziel des Projektes „BiogaST“ ist es, einen effizienten, ressourcenschonenden, sicheren und bezahlbaren Zugang zu Energie für Bewohner ländlicher Regionen zu er-

¹eigene Aufnahmen vom April 2010

möglichen. Durch die umweltfreundliche Verwertung von Ernterückständen und den Einsatz von Biogas zum Kochen ermöglicht das Projekt eine nachhaltige Nutzung der lokalen natürlichen Ressourcen und bietet Alternativen zur Energiebereitstellung. Da in den ländlichen Regionen meist noch keine Versorgung mit elektrischer Energie existiert, erfolgt die Bereitstellung von Licht in den Haushalten über das Verbrennen von flüssigen Brennstoffen (z.B. Paraffin oder Kerosin). Biogas kann fossile Energieträger ersetzen und auf umweltverträgliche Weise zur Erzeugung von Licht eingesetzt werden.

Nur wenige Familien in Kagera können sich ein bis zwei Kühe halten, sodass die anfallende Menge Dung nicht ausreichend ist, um die bisher gängigen Typen von Biogasanlagen mit Substrat zu versorgen. Ein großes Potential, diese Familien trotzdem mit Biogas zu versorgen, birgt die Nutzung von Ernterückständen aus dem Bananenanbau. Die Bauern der Gemeinschaft MAVUNO besitzen im Durchschnitt rund 1,2 Hektar Bananenplantage mit ca. 360 Bananenpflanzen [13]. Die Bananenpflanzen, die nach der Ernte der Bananen gerodet werden, stehen prinzipiell als Substrat zur Verfügung. Die effektive Nutzung dieses Potentials erfordert jedoch die Anpassung der Anlagentechnik.



Abb. 1.2: Bau der Pilotanlage in Berlin - Anlage in Tanzania (Fotomontage)

Im Zuge des BiogaST-Projektes wurde in Zusammenarbeit zwischen Ingenieure ohne Grenzen e.V. und MAVUNO ein neuer Anlagentyp² entwickelt, der die Möglichkeit bietet, die vor Ort zur Verfügung stehenden Ernterückstände (d.h. Blätter und Stämme der Bananenpflanze) kontinuierlich zu vergären und somit den Biogasbedarf dieser Familien zu decken. Von Philipp Becker, Mitglied von Ingenieure ohne Grenzen e.V. und Diplomstudent Umweltverfahrenstechnik, wurde 2008 eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, die sich in eine Bedarfs- und Potentialanalyse sowie eine Realisierungsbetrachtung gliedert. Grundlage für diese Studie ist der Zensus

²Kombination eines Pfropfenstromfermenters (Vorteil: geringer Wasserbedarf) mit einer Dombiogasanlage (Vorteil: kein externer Gasspeicher notwendig); siehe Abbildung 1.2; Fotos von Catherina Clausnitzer, 2010

2002 sowie die Ergebnisse der vor Ort durchgeführten Untersuchungen (Gärtests nach VDI-Richtlinie 4630). Ergebnis dieser Studie ist, dass es in der Region Kagera einen Bedarf von rund 135.000 Kleinstbiogasanlagen gibt, die durch das vorhandene Substratpotenzial mit rund 250% gedeckt werden können [14].

*MAVUNO*³ wurde 1993 gegründet und ist eine als gemeinnützig anerkannte tansanische Nichtregierungsorganisation. Erklärtes Satzungsziel ist es, gemeinsam mit den Menschen vor Ort den Lebensstandard zu verbessern. Aktuell operiert MAVUNO in fünf Dörfern des Bezirks Karagwe im Nordwesten Kageras und hat ca. 230 Mitglieder, hauptsächlich selbstversorgende Bauern.

Ingenieure ohne Grenzen e.V. ist eine gemeinnützige Hilfsorganisation, die sich vorrangig mit der Lösung ingenieurtechnischer Aufgaben im globalen Kontext befasst. Ingenieure ohne Grenzen hilft durch Wissenstransferleistungen anderen Hilfsorganisationen und Bedürftigen bei ingenieurspezifischen Fragestellungen und ist vor Ort bei der Umsetzung der Projekte dabei. Regionale Schwerpunkte liegen derzeit in Ostafrika, Asien und Südamerika. Neben der technischen Entwicklungszusammenarbeit legt der Verein verstärkt Wert auf eine umfassende Auseinandersetzung mit sozialen und kulturellen Themen, ohne die ein ingenieurtechnisches Vorhaben nicht nachhaltig und unter der Akzeptanz der Mitmenschen umgesetzt werden kann.

³*Mavuno* ist Kisuaheli und bedeutet „Ernte, Ergebnis, Resultat“.

Terminologie

Bevor auf die Verwendung von Biokohle als Bodenverbesserer und die Verkohlung von Biomasse näher eingegangen wird, ist es zunächst wichtig, einige Begriffe zu definieren. Die verschiedenen Arten von Kohle und von kohlenstoffhaltigen Produkten können nach dem Herstellungsverfahren und nach der chemischen Zusammensetzung unterschieden werden. Lehmann *et al.* unterscheidet außerdem noch nach der anschließenden Verwendung der Kohle.

Bisher konnte sich in der Wissenschaft keine eindeutige Nomenklatur für künstliche, biogene Kohle durchsetzen. So lässt bspw. die Definition von Biokohle allgemein verschiedene thermo-chemische Umwandlungsverfahren zu, sodass die HTC eingeschlossen werden kann. Lehmann *et al.* charakterisiert *Biochar* als ein „kohlenstoffreiches Produkt, das gewonnen wird, wenn Biomasse wie z.B. Holz, Mist oder Blätter in einem geschlossenen Behälter, in dem nur wenig oder keine Luft vorhanden ist, erhitzt wird“ [5]. Diese Beschreibung würde sowohl die Pyrolyse als auch die HTC einschließen. An anderer Stelle definiert Lehmann *et al.* Biochar jedoch eindeutig als „hergestellt aus Pyrolyse“ [5]. Glaser *et al.* schließt die HTC-Kohle aus der Definition von Biochar aufgrund der chemischen Eigenschaften aus, insbesondere da das H/C-Verhältnis der HTC-Kohle zu hoch sei [15].

Für diese Arbeit wurden die folgenden Definitionen gewählt [5], [7], [16], [17], [18].

Unterscheidung nach der chemischen Zusammensetzung:

- *Pyrogener Kohlenstoff* = Restpartikel der Pyrolyse oder Verbrennung jeglichen Materials (d.h. keine Einschränkung auf Biomasse) mit sehr hohem Kohlenstoffanteil
- *Black Carbon*¹ = Pyrogener Kohlenstoff, der in den Boden eingebracht wurde und bei dem die anfänglichen Oxidationsvorgänge durch chemische und bio-

¹Als *Black Carbon* werden im Kontext der Energieerzeugung auch Rußpartikel bezeichnet, d.h. kleine Einheiten pyrogenen Kohlenstoffs, deren Emission eine kurzfristige verstärkende Wirkung des Treibhauseffekts verursacht [19].

chemische Prozesse im Boden abgeschlossen sind und der somit langfristig stabil ist.

- *Koks* = Produkt mit hohem C-Gehalt, großem Porenvolumen und hoher spezifischer Oberfläche, das durch thermische Entfernung der flüchtigen Bestandteile aus Kohle entsteht.

Unterscheidung nach dem Herstellungsverfahren:

- *Kohle* (Braunkohle, Steinkohle) = fossile Kohle = durch natürliche Inkohlung entstandene Kohle aus abgestorbenem Pflanzenmaterial
- *Biokohle* = über ein thermo-chemisches Verfahren produzierte Kohle aus Biomasse, d.h. pyrolytisch oder per HTC
- *Holzkohle* = über traditionelle Verkohlung hergestellte Kohle aus Holz
- *Pyrolysekohle* bzw. *pyrolytische Kohle* = Biokohle aus dem Pyrolyseverfahren, wobei vers. Biomassearten als Inputmaterial möglich sind
- *HTC-Kohle* = Biokohle aus dem HTC-Verfahren (ebenfalls vers. Biomassearten möglich)
- *Aktivkohle* = sämtliche chemisch nachbehandelte (z.B. durch den Einsatz von Wasserdampf oder Chemikalien) Arten von amorpher Kohle mit hohem C-Anteil sowie einer großen Anzahl an Mikroporen im Gefüge (d.h. einer großen spezifischen inneren Oberfläche, die die Adsorption von Schadstoffen ermöglicht)

Unterscheidung nach der Verwendung:

- *Charcoal* = Biokohle, meist Holzkohle aber auch aus anderer Biomasse über Pyrolyse erzeugte Biokohle, zur energetischen oder stofflichen Verwendung
- *Char* = Produkte aus pyrogenem Kohlenstoff, z.B. angekohltes Holz
- *Agrichar* = Biokohle zur Verwendung in der Landwirtschaft als Bodenverbesserer
- *Biochar* = pyrolytische Kohle zur Verwendung als Bodenverbesserer und zur C-Sequestrierung²

²siehe Abschnitt 3.4

Biochar - Einsatz von Biokohle zur Bodenverbesserung

Ziel der Arbeit sind die Nährstoffrückführung und die Einbringung organischer Bodensubstanz zur Stabilisierung des Bodens und zur Verbesserung seiner Fruchtbarkeit. Erreicht werden soll dies durch das Einbringen von Biokohle in den Boden. Um die zielführenden Mechanismen, die bei einer Einbringung von Biokohle (ggf. gemischt mit anderen organischen Substanzen, wie Kompost oder Gründüngung) im Boden wirken, besser verständlich zu machen, folgt an dieser Stelle eine kurze Einleitung in die Bodenkunde. Außerdem werden der Stand der bodenkundlichen Forschung zu den Prinzipien der Terra Preta sowie der Wirkung von Biokohle im Boden als elementarem Bestandteil dieser anthropogenen (d.h. von Menschen gemachten) Schwarzerden erläutert.

3.1 Bodenkundliche Grundlagen

Der Boden und die Pedosphäre

Die Pedosphäre ist eine wichtige Komponente des Ökosystems und ist definiert als die Grenzfläche zwischen dem Raum fester Materie, der Lithosphäre, und dem Raum gasförmiger Materie, der Atmosphäre [20]. Sie besteht zum größten Teil aus fester Materie, die sich aus organischem Material (z.B. Reste abgestorbener Lebewesen und Pflanzen, Humus und Huminstoffe, Wurzelmasse u.a.) und anorganischem Material (d.h. Mineralsubstanzen) zusammensetzt. Hinzu kommen flüssige Bestandteile (hauptsächlich Wasser) und gasförmige (hauptsächlich Luft), die sich in den Hohlräumen zwischen den festen Bodenpartikeln verteilen. Durch diese Zusammensetzung ergeben sich im Boden gute Lebensbedingungen für Organismen. Aufgrund des geringen Raumangebots im Boden ist er besonders für Kleinstlebewesen geeignet wie z.B. Bakterien, Pilze und Algen (d.h. Mikroorganismen) aber auch z.B. für

Regenwürmer und Tausendfüßler (d.h. Makroorganismen). Der von Organismen belebte oberste Teil der Pedosphäre ist der *Boden* [21]. Die oberste Schicht des Bodens wird außerdem auch vom Menschen zum Siedeln und zum Anbauen von Nahrungsmitteln verwendet. Zusammengefasst ist die Pedosphäre „*der schmale Grenzbereich der Erdoberfläche, in der sich Litosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre überlagern*“ [20].

Der feste Teil des Bodens setzt sich zusammen aus dem *Mineralkörper*, der aus den anorganischen Materialien entsteht und dem *Humuskörper*, der aus den toten, organischen Materialien bzw. deren Abbauprodukten gebildet wird. Die einzelnen Prozesse zur Bildung dieser Bodenbestandteile sind zahlreich und komplex und sollen hier nicht weiter einzeln erläutert werden.

Der Humuskörper

Der Aufbau des Humuskörpers erfolgt über die *Mineralisierung* [21] bzw. *Zersetzung* [16] und *Humifizierung* der zugeführten organischen Substanz. Bei der Mineralisierung (auch als *Mineralisation* bezeichnet) werden die Pflanzenreste durch die Arbeit von Organismen, d.h. durch Verstoffwechslung, abgebaut und zwar in der Reihenfolge: erst die großen Tiere, dann die kleineren, dann die ganz kleinen. Die enthaltenen Mineralstoffe werden in einfache anorganische Verbindungen umstrukturiert. Die organischen Produkte der Mineralisierung werden anschließend weiteren Prozessen durch Arbeit von Bodenorganismen ausgesetzt und weiter abgebaut. Werden die organischen Stoffe jedoch nicht ab-, sondern umgebaut, spricht man von *Humifizierung* [16]. Kennzeichnend für das Produkt, die *Huminstoffe*, ist die amorphe Struktur und der aromatische Aufbau der Kohlenstoffverbindungen. Die aromatischen Ringe sind schwerer angreifbar und somit sind Huminstoffe weitgehend stabil, d.h. resistent gegenüber weiterem mikrobiellem Abbau [16].

Die Definition von Humus ist in der Literatur nicht einheitlich. Unterschieden wird, ob noch frisches und unzersetztes organisches Material (d.h. Streugut) auch schon als Humus bezeichnet wird oder nur das bereits abgebaute bzw. sogar nur die ausgebildeten Huminstoffe. Bei allen handelt es sich um wichtige organische Bestandteile des Bodens mit folgenden Funktionen [16], [21]:

- *Nährhumus* = frische organische Substanz in den obersten Bodenlagen mit einer sehr kurze Verweildauer (Zersetzung innerhalb weniger Wochen bis Monate)
 - Nahrung und Lebensgrundlage für Bodenorganismen
 - kurzfristige Nährstofflieferung für das Pflanzenwachstum

- *Dauerhumus* = hauptsächlich aus stabilen Huminstoffen bestehende Substanz mit einer mittleren bis hohen Verweildauer im Boden (Zersetzung innerhalb von Jahrhunderten bis von Jahrtausenden)
 - Wasserspeicher
 - Nährstoffspeicher durch Ionenaustausch
 - mittelfristige Bodenfruchtbarkeit
 - Stabilisierung des Bodengefüges
 - Beitrag zur Puffer- und Filterfunktion des Bodens (z.B. Bindung von Schadstoffen)

Hauptaufgabe des Bodens

Neben der Bereitstellung von Lebensraum für Organismen aller Art (Pflanzen, Menschen, Tiere, Mikro- und Makroorganismen) bildet der Boden außerdem die Grundlage einer land- und forstwirtschaftlichen Nutzung. Hauptaufgabe des Bodens ist die **Regelung**: Böden regeln natürliche Kreisläufe (von Wasser, Luft, Nährstoffen, organischen Stoffen) indem sie sowohl die Funktion der Quelle als auch der Senke einnehmen und wichtige Aufgaben wie Speicherung, Filterung, Pufferung und Stoffumwandlungen übernehmen [16], [21]:

- *Wasserspeicher*: Eintreffender Niederschlag aus der Atmosphäre wird vom Boden im Rahmen seiner *Wasserspeicherkapazität* im Bodengefüge eingelagert und zwischengespeichert. Hier steht es Pflanzen und Bodentieren zur Verfügung (Verteilung des Wassers an die Biosphäre). Anschließend wird das Wasser in das Grundwasser oder in Oberflächengewässer geleitet (Verteilung an die Hydrosphäre).
- *Wasserfilter*: Im Wasser enthaltene Nähr- oder Schadstoffe werden im Boden gebunden und aufgeschlossen, sodass diese nicht ins Grundwasser ausgespült werden.
- *Nährstofflieferant*: Im Boden wird tote organische Masse zersetzt. Dabei werden die gebundenen Nährstoffe wieder in den Nährstoffkreislauf gegeben (*Mineralisation*).
- *Nährstoffzwischenpeicher*: Die bei der Zersetzung von organischem Material freigesetzten Nährstoffe können kurzfristig im Boden zwischengespeichert werden um so zu einem zukünftigen Zeitpunkt Pflanzen zum Wachstum zur Verfügung zu stehen. Die Zwischen Speicherung von Nährstoffen funktioniert also über einen *Ionenaustausch*.

Manche Feststoffe gehen leicht Bindungen ein, die zu einer Ladungsänderung führen. Sie geben dafür ein Proton ab, sodass sie anschließend negativ geladen

sind und mit anderen Kationen Bindungen eingehen können. So können Nährstoffe, die im Boden meist in positiv geladener Form vorliegen, aufgenommen und auch wieder abgegeben werden. Die Summe der austauschbaren Kationen, d.h. die Anzahl der für einen Kationenaustausch zur Verfügung stehenden negativen Bindungsplätze im Boden wird als *Kationenaustauschkapazität* (KAK) bezeichnet. Umgekehrt können auch Anionen, z.B. Schadstoffe, an positiv geladenen Bodenpartikeln gespeichert werden.

- *Pufferung*: Speichern von basisch wirkenden Stoffen im Boden um beim Eindringen von Säure durch neutralisierende Reaktionen den pH-Wert im Boden konstant halten zu können.

Die im Boden befindlichen Huminstoffe sind aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Funktion negativ geladen, wobei die Ladungen variabel sind. Mineralien sind meist nur schwach geladen wobei, sowohl positive als auch negative Ladungen vorkommen. Die negative Ladung der Huminstoffe ist deutlich höher als z.B. die der Tonmineralien. Aus diesem Grund haben diese organischen Substanzen im Boden für das Pflanzenwachstum eine besonders starke Bedeutung. Sie binden aufgrund ihrer negativen Ladung die positiv geladenen Nährstoffe und vermeiden damit, dass diese mit dem Niederschlag aus dem Boden ins Grundwasser ausgespült werden. Deshalb ist es vor allem in der oberen Bodenschicht, in der sich die Wurzeln der Pflanzen befinden, wichtig, dass der Gehalt an organischer Substanz ausreichend ist, um die für die Pflanzen notwendigen anorganischen Nährstoffkationen verfügbar zu halten.

Bei der Zersetzung von Biomasse im Boden durch biochemische Abbauprozesse werden (bei gegebenem Boden-pH-Wert zwischen 5 und 7) Protonen und Säuren (hauptsächlich Kohlensäure) freigesetzt, die zu einer Senkung des pH-Wertes führen [21].

Damit der Boden nicht versauert, laufen zahlreiche chemische Reaktionen ab, die zur Neutralisierung beitragen. Dabei werden die sinkenden pH-Werte gepuffert, indem Protonen chemisch gebunden werden und dafür andere Kationen abgegeben werden. Ab einem pH-Wert unter 5 wird die steigende Anzahl der Protonen z.B. dadurch neutralisiert, dass austauschbares Aluminium freigesetzt wird. Mit weiter sinkendem pH-Wert wird schließlich auch Eisenoxid zur Pufferung freigesetzt. Allerdings darf die Konzentration des freigesetzten Aluminium bzw. Eisen im Boden nicht zu hoch werden, da dadurch das Pflanzenwachstum negativ beeinflusst wird und es zu Toxizitätserscheinungen kommen kann [16], [21].

Allgemein kann man sagen, dass bei einem pH-Wert zwischen 5 und 6 die negativen Auswirkungen noch in einem erträglichen Rahmen gehalten werden und gleichzeitig die möglichen Erträge im maximalen Bereich liegen [16].

3.2 Probleme der tropischen Böden Afrikas

Das Klima Kageras

Das Klima hat einen bedeutenden Einfluss auf die im Boden wirkenden Mechanismen. Die klimatischen Bedingungen der Region Kagera sind wie folgt [21], [22], [23]:

- Klimazone: Tropen mit wechselfeuchtem Klima
- Vegetationszone: Savanne mit vielfältiger Vegetation und einer Mischung aus Langgräsern und ein- und mehrjährigen Pflanzen, z.B. Bohnen und Bananen
- vorherrschende Bodenarten:
 - Planosol in wasserreichen Ebenen
 - Ferralsol an Böschungen und Hängen
- Regenzeit: „kurzer Regen“ Februar bis Mai und „langer Regen“ September bis Dezember
- Jahresniederschlagsmenge: 1500 mm mit großen Schwankungen des zeitlichen und mengenmäßigen Anfalls
- Jahresdurchschnittstemperatur: 21 bis 25 °C, wobei große tägliche Schwankungen möglich sind (12 bis 34 °C), kühle Trockenzeit
- Höhenlage: 1142 bis 1800 m über dem Meeresspiegel

Wirkung des tropischen Klimas auf die Bodenprozesse

Zusammengefasst hat das tropische Klima, gekennzeichnet durch starke Regenfälle und somit hohe Niederschlagsmengen, anhaltende Trockenperioden und hohe Durchschnittstemperaturen, folgende Einflüsse auf die Prozesse zur Bodenbildung und die Bodeneigenschaften [16], [24]:

- Auswaschung von Kationen
 - sinkender pH-Wert
 - Versauerung sowie Belastung durch Erhöhung des Aluminiumgehaltes durch Pufferreaktionen
- Auswaschung von Nährstoffen
 - Nährstoffmangel
- thermische Energie führt zu hoher Aktivität der Bodenorganismen = intensive Zersetzung
 - vollständiger Abbau des organischen Materials
 - langfristiger Abbau von Huminstoffen
 - Verringerung der Bodenfestigkeit
 - Zunahme von Erosion

- intensive Verwitterung, d.h. Abbau von mineralischer Substanz
 - Mangel an Mineralien mit guter KAK, da diese besonders leicht abbaubar sind
 - Nährstoffmangel in den oberen pflanzenverfügbaren Schichten
- Wassermangel in der Trockenzeit
 - Hemmung der Aktivität der Mikroorganismen
 - geringere Zersetzungsleistung und kurzfristiger Mangel an verfügbaren Nährstoffen

Die intensiven Bedingungen der tropischen Klimaverhältnisse resultieren hauptsächlich in einer geringen Bodenfruchtbarkeit. Die für tropische Böden charakteristische Rotfärbung der Erde basiert auf einem hohen Gehalt an Eisen- und Aluminiumoxiden aus den Pufferreaktionen zur Vermeidung der Versauerung des Bodens [21], [25].

Außerdem wird organische Substanz durch eine stärkere Aktivität der Bodenorganismen schneller und vollständig abgebaut, sodass es, wenn nicht genug organische Substanz nachgeliefert wird, zu einem Humusmangel im Boden kommt. Humus besitzt eine sehr viel höhere KAK (ca. Faktor 100) als der in tropischen Böden enthaltene Ton und ist somit elementar für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit [26]. In tropischen Regionen, in denen noch Regenwald vorhanden ist, wird durch die natürliche Vegetation ausreichend organisches Material nachgeliefert, sodass die höhere Zersetzung kompensiert werden kann und Nährstoffe und Kohlenstoff in einem geschlossenen Kreislauf geführt werden. Wo der Regenwald jedoch zur Bereitstellung von Ackerfläche abgeholzt wurde, kann es zu Humusmangel im Boden und somit zu erheblichen Fruchtbarkeitsproblemen kommen. In Savannenlandschaften, wie z.B. in Kagera, hängt es dementsprechend von der vorherrschenden Vegetation und der Bewirtschaftungsart an, ob der Humus- und Nährstoffgehalt im Boden für den Erhalt der Fruchtbarkeit ausreicht.

Da neben der Zersetzung auch die Mineralisierung, d.h. das Auslösen der Nährstoffe aus der organischen Verbindung, durch die vorherrschenden wechselhaften Bedingungen zwischen feucht und trocken gefördert wird [16], kann durch konsequente Rückführung von organischen Ernteresten in Kagera die kurzfristige Versorgung mit Nährstoffen soweit erreicht werden, dass ökologisch wirtschaftende Bauern bisher noch auf den Einsatz künstlicher Düngemittel verzichten können. Jedoch wird der Kohlenstoff nahezu vollständig abgebaut und der Gehalt an langfristigem Dauerhumus im Boden mit seinen wichtigen Funktionen zur Speicherung von Wasser und Nährstoffen und zur Stabilisierung des Bodengefüges ist für eine nachhaltige Sicherstellung der Bodenfruchtbarkeit nicht ausreichend.

Risiken und Probleme

Problematisch wird es, wenn zu den klimatischen Einflüssen noch anthropogene hinzukommen. Durch intensive landwirtschaftliche Nutzung werden den Böden mehr Stoffe entnommen als zurück gegeben und es kommt zu einer weiteren Bodendegradation. Die Böden Afrikas leiden insbesondere unter starkem, anthropogen bedingtem Humusverlust [27]. Dadurch werden die oben beschriebenen Folgen der klimatischen Einflüsse zusätzlich verstärkt, wodurch die Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit weiter abnimmt, Bodenverdichtung und Strukturverlust zunehmen und die Erosionsanfälligkeit steigt. In der Folge nimmt die Bodenfruchtbarkeit weiter ab, sodass auch die Erträge sinken.

Bodenerosion ist eine Folge des Verlustes organischer Substanz im Bodengefüge und somit auch von einem Verlust der Bodenstabilität. Dadurch steigt die Anfälligkeit des Bodens dafür, dass die oberen Schichten von Wind oder Wasser abgetragen werden. In der Region Kagera ist Bodenerosion ein häufiges und großes Problem, das außerdem durch das Relief der hügeligen Landschaft zusätzlich verstärkt wird (siehe auch Abbildung 1.1). Auch durch die Abholzung von Bäumen und ganzen Wäldern (z.B. zur Bereitstellung von landwirtschaftlicher Fläche, Feuerholz oder Holz zur Charcoal-Produktion) steigt die Erosionsanfälligkeit, da die stabilisierende Wirkung der Wurzeln im Boden wegfällt.

Im Hinblick auf die Herausforderungen unseres Jahrhunderts, nämlich die Ernährung einer stetig wachsenden Weltbevölkerung sicherzustellen (= MDG Nr. 1) [28], kann die zunehmende Degradation der Böden schlimme Folgen haben. Da die für die Landwirtschaft verfügbaren Flächen weltweit begrenzt sind, liegt der Schlüssel einer nachhaltigen Nahrungsmittelversorgung und somit langfristigen Ernährungssicherheit in der Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Böden. Dies kann entsprechend der oben beschriebenen Probleme nur erreicht werden, wenn die Wiederherstellung des Humuszustandes und die Zufuhr der mit den Ernten entzogenen Nährstoffmengen konsequent verfolgt werden. Maßnahmen der modernen Landwirtschaft im industriellen Maßstab, bei der die Deckung des Nährstoffbedarfs durch den Einsatz von künstlichem Mineraldünger erreicht werden soll, tragen jedoch nicht zum Humusaufbau bei und bieten somit keine nachhaltige Lösung des Problems [27].

Chancen

Um die Bodendegradation und die damit einhergehenden Ernährungsprobleme aufzuhalten, ist nach Kiers *et al.* eine radikale Umkehr der Managementmethoden in der Landwirtschaft erforderlich. Kleinbäuerliche Nutzungssysteme, in denen Stoffkreisläufe geschlossen werden, können effizient zum nachhaltigen Erhalt der Bodenfruchtbarkeit beitragen [29]. Eine Möglichkeit ist, die Produktion von Biokohle und

deren Anwendung als Biochar in die landwirtschaftliche Praxis zu integrieren. So kann Bodenverschlechterung (z.B. durch Nährstoffmangel, KAK-Mangel, Erosionsverluste) abgewendet und eine nachhaltige Nahrungsmittelproduktion gesichert werden [2]. Das prominenteste Beispiel und Vorbild ist die Terra Preta der Ureinwohner Amazoniens.

3.3 Anthropogene Mutterböden

Terra Preta

Die Entdeckung der Schwarzerden in Amazonien half Historikern ein lange ungelöstes Rätsel zu klären, nämlich wie es den Inkas gelungen sein konnte, auf der im Regenwald nur begrenzt vorhandenen landwirtschaftlichen Fläche ausreichend Nahrungsmittel zu produzieren um die Bewohner größerer Städte (deren Existenz zu Zeiten der Hochkultur durch archäologische Funde belegt wurde) zu versorgen. Die offensichtlichen Charakteristika der Terra Preta sind:

- hohe Fruchtbarkeit bzw. Produktivität des Bodens
- bis in die tieferen Bodenschichten schwarze Farbe statt gewöhnlich roter oder gelber

Die schwarze Farbe dieser Böden und vor allem die Tiefe, bis in die sie sich durchsetzt, ist vor allem charakteristisch für diesen Bodentyp. Der Name dieses Bodens auf Portugiesisch ist „Terra Preta do Indio“, was auf deutsch „Schwarze Erde der Ureinwohner“ bedeutet [30]. Dabei kommt die Schwarzfärbung der Böden von einem besonders hohen Anteil an Kohlenstoff im Boden. Aufgrund der klimatischen Bedingungen in den Tropen ist es allerdings auf natürlichem Wege eigentlich nicht möglich, solch hohe Kohlenstoffkonzentrationen im Boden zu erreichen. Der signifikant hohe Kohlenstoffanteil in diesen Böden wird demnach auf anthropogene Einflüsse zurückgeführt, die mittlerweile auch durch die Wissenschaft belegt werden konnten. Verantwortlich für die schwarze Farbe und die hohe Fruchtbarkeit wird pyrogener Kohlenstoff gemacht, der seine Stabilität im Boden mittlerweile über einen langen Zeitraum beweisen konnte. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff liegt bei Terra Preta, je nach Tiefe, zwischen 250 und 500 Tonnen pro Hektar. Im Vergleich dazu liegt der Kohlenstoffanteil beim tropentypischen Ferralsol-Boden nur zwischen 100 und 150 Tonnen pro Hektar [31].

Der Beginn der Anwendung dieses besonders nachhaltigen Bodenmanagements durch die Inkas liegt voraussichtlich weit vor Beginn unserer Zeitzählung und dauert an bis die Entdeckung Lateinamerikas im 16. Jahrhundert zur weitgehenden Auslöschung

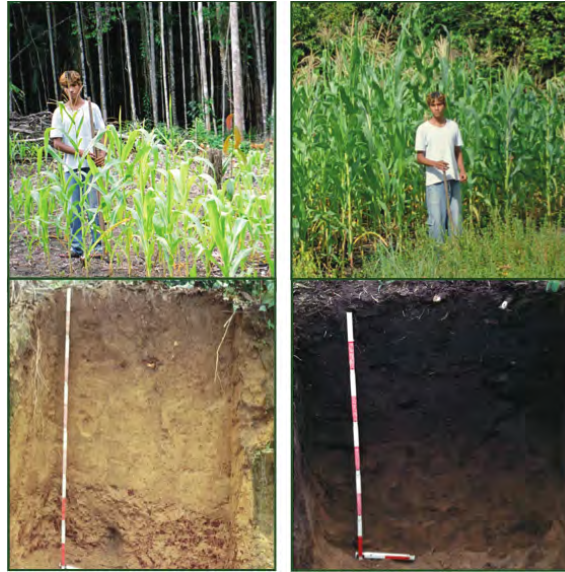


Abb. 3.1: Die Böden Amazoniens: links Ferralsol, rechts Terra Preta [2]

des indigenen Volkes und seiner Kultur und seiner Traditionen führte. Da die Spanier in ihrem Handeln sehr konsequent waren, ist es nicht einfach, die einzelnen Komponenten und Mechanismen bzw. deren Zusammenspiel bei der Pedogenese der Terra Preta zu rekonstruieren. Zur Entstehung gibt es verschiedene Theorien, die das Vorgehen der Inkas als bewusstes Stoffstrommanagement sehen, um die Produktivität des Bodens unter den gegebenen tropischen Bedingungen zu erhöhen. Andere gehen davon aus, dass die Terra Preta eher ein Zufallsprodukt ist und sozusagen die Überreste von alten Mülldeponien darstellt. Die Forschung zur Entstehungsgeschichte sowie zu den Prinzipien bzw. zu der Philosophie der Terra Preta begann Ende des 19. Jahrhunderts und wurde in den vergangenen Jahren stets intensiver. Die bereits gewonnenen Erkenntnisse der Forschung zur Terra Preta lassen sich wie folgt zusammenfassen [5], [26], [32]:

- teilweise Beimischung von keramischen Scherben
- hoher Kohlenstoffgehalt des Bodens von durchschnittlich $50 \frac{g}{kg}$ bis maximal $150 \frac{g}{kg}$ (zum Vergleich: Ferrasol durchschnittlich $25 \frac{g}{kg}$ bis maximal $50 \frac{g}{kg}$) der sich zusammensetzt aus:
 - organischen Substanzen wie Kompost, Ernteresten, Essensresten oder menschlichen und tierischen Fäkalien
 - pyrogenem Kohlenstoff (ca. 35 % des gesamten C-Gehaltes)
- durchschnittliche Mächtigkeit: 40 bis 50 cm
- hohe Fruchtbarkeit mit den folgenden charakteristischen Bodenkenngrößen:
 - hohe Nährstoffgehalte (vor allem Phosphor, Stickstoff, Magnesium und Calcium)

- geringer Gehalt an mobilem Aluminiumoxid
- pH-Wert zwischen 5 und 6
- hohe KAK, resultierend aus der Zugabe von Biochar mit einer sehr hohen spezifischen KAK

Bei den bisher entdeckten Feldern mit Terra-Preta-Boden konnten Unterschiede in der Zusammensetzung des Bodens festgestellt werden, die zu einer Differenzierung bei der Namensgebung der Terra Preta führten. Dabei zeichnet sich die *Terra Preta* durch die oben beschriebenen Charakteristika aus und vor allem durch einen hohen Nährstoffgehalt, der wahrscheinlich durch die konsequente Rückführung von teilweise kompostierten Fäkalien sowie Essens- und Ernteresten erreicht wurde. Um diese hohen Nährstoffgaben auch speichern zu können, wurden dem Boden vermutlich Ton- und Keramikscherben zugegeben. Die *Terra Mulata* hingegen zeichnet sich durch einen deutlich geringeren Gehalt an Nährstoffen aus organischen Zusätze aus. Auch Ton- oder Keramikzugaben im Boden fehlen. Dafür ist der Gehalt an pyrogenem Kohlenstoff deutlich höher. Es wird vermutet, dass die Terra Mulata entstand, indem bei der Rodung von Regenwald zur Bereitstellung landwirtschaftlicher Fläche das dabei anfallende Holz und Gestrüpf nicht einfach verbrannt sondern verkohlt wurde, und die Kohle anschließend in den Boden eingebracht wurde (d.h. „Slash-and-Char-Prinzip“¹) [30], [33], [34], [35].

Plaggenesch

Auch in Europa gibt es ein Beispiel für einen anthropogenen Mutterboden, der sich durch eine tiefschwarze Färbung und hohe Fruchtbarkeit auszeichnet. Es handelt sich dabei um den hauptsächlich in nördlichen Ländern vorkommenden *Plaggenesch*, der auch Plaggenboden genannt wird. Die Entstehung dieses Bodens geht auf bestimmte Anwendungen der Plaggenwirtschaft zurück, die vermutlich im frühen Mittelalter vermehrt praktiziert wurde. Als *Plaggen* werden Bodenstücke bezeichnet, die einen hohen Humusgehalt und noch Heide- oder Grasbewuchs haben. Sie stammen meist von weiter entfernten Heiden und Wiesen. Sie werden dem Oberboden mit dem Spaten entnommen und dann in den Ställen als Einstreu bei der Viehhaltung verwendet. Anschließend wird der nun durch Mist mit organischen Substanzen angereicherte Plaggen wieder hinaus auf die Felder gebracht. Die Felder in der Nähe der Dörfer werden als *Esch* bezeichnet und so bekam dieser Boden seinen Namen. Durch das Auftragen der gedüngten Plaggen konnten die Bodeneigenschaften hinsichtlich des Nährstoffhaushalts und der Wasserspeicherfähigkeit stark verbessert werden, sodass sandige und nicht mehr bewirtschaftbare Böden wieder fruchtbar gemacht wurden [21].

¹Slash and Char (engl) = „Rodung und Verkohlung“

3.4 Wirkung von Kohle als Bodenverbesserer

Wirkung von Biochar und Black Carbon

Das Einbringen von Biochar in den Boden und die anschließende Aktivierung zu Black Carbon mit positiver Wirkung auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt im Boden sowie damit einhergehende positive Einflüsse auf die Vegetation wurden bereits bewiesen. Aufgrund der langfristigen Stabilität von Biochar im Boden hat diese Anwendung auch Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffhaushalt, indem der Boden zur Kohlenstoffsänke wird. Vorteilhaft sind dabei Konzentrationen von 0,5 Tonne pro Hektar bis maximal 100 Tonnen pro Hektar [31].

Die vorteilhafte Wirkung von Biochar im Boden lässt sich nach dem Stand der Forschung wie folgt zusammenfassen [2], [5], [31], [32]:

- verbesserte Bodenfruchtbarkeit
 - Lieferant von pflanzenverfügbaren Nährstoffkationen
 - wirkt Versauerung entgegen (pH-Wert vglw. 0,5 bis 1 Einheit höher)
 - deutlich höhere KAK
 - Verminderung der Nährstoffauswaschungen (da höhere Speicherkapazität für Nährstoffe und Wasser)
- höhere Wasserspeicherkapazität durch aromatische Kohlestruktur mit großer Anzahl an Mikroporen (Anstieg von 12 auf 18 % bei einem Anstieg der Konzentration von Biochar im Boden von 0 auf 50 $\frac{g}{kg}$)
- Reduktion der durch Bodenprozesse verursachten Treibhausgasemissionen (vor allem N_2O und CH_4)
- Stabilisierung des Bodengefüges durch organisch-mineralische Komplexbildung
- Verminderung der Auswaschung von Stickstoff ins Grundwasser² (Kombination aus erhöhter Wasserspeicherkapazität und dem möglichen Verzicht auf künstliche Düngemittel)
- verbesserte Lebensbedingungen für Mikroorganismen durch den Kohlenstoff (z.B. ist Wasser in der Kohlestruktur auch in der Trockenzeit vorhanden)
- langfristige Speicherung von Kohlenstoff im Boden, da Black Carbon im Boden nahezu stabil ist (d.h. C-Sequestrierung)

²Wenn künstliche Düngemittel zum Einsatz kommen, werden Stickstoff und Phosphat in die Hydrosphäre ausgetragen, da sie vom Boden nur sehr begrenzt aufgenommen werden können. Mit dem Grundwasser gelangen hohe Konzentrationen in den Wasserkreislauf, die dort zu verstärktem Algenwachstum mit der Folge von Sauerstoff- und Nährstoffmangel für die übrigen Wasserlebewesen führen. 54 % der Stickstoffeinträge im Oberflächengewässer gehen auf die landwirtschaftliche Nutzung von Düngemitteln zurück [16].

Aktivierung = chemische Umwandlung von Biochar zu Black Carbon

Die Wirkung von Biokohle im Boden kann in zwei Phasen beschrieben werden. Die erste Phase beginnt direkt nach der Einbringung von Biochar in den Boden. Aufgrund der physischen Struktur trägt die Kohle dabei schon zu Strukturstabilität bei und bringt direkt Nährstoffe als Kationen in den Boden ein. Diese sind den Pflanzen verfügbar und tragen zu einer Erhöhung des pH-Wertes bei. Außerdem erhöht sich die Wasserspeicherfähigkeit. Die makroskopisch charakteristische Struktur der Kohle erinnert an einen Schwamm (siehe Abbildung 4.3 auf Seite 26), der in seinen Poren viel Wasser aufnehmen kann. Das Wasser ist nun für Pflanzen und Lebewesen verfügbar und trägt außerdem zur Festigkeit des Bodens bei, da dieser schwerer wird. Dieser Effekt von Biochar ist abhängig vom spezifischen Bodengefüge und der eingebrachten Menge Biochar. Es hat sich gezeigt, dass durch Zugabe von Biochar in vorwiegend sandige Böden die Wasserhaltekapazität erhöht werden kann, während bei Böden mit hohem Tongehalt kein Effekt auf die pflanzenverfügbare Wassermenge erkennbar ist. Das liegt daran, dass Ton an sich schon sehr viel Wasser aufnehmen kann. Bei der Anwendung auf Lehmboden, der viel Schluff enthält, wurde sogar ein negativer Effekt, d.h. ein Rückgang des verfügbaren Wassers beobachtet [31].

Hinzu kommen in einer zweiten Phase die langfristigen Wirkungen des Black Carbon im Boden. Im Übergang zwischen beiden Phasen findet eine chemische Veränderung der Kohle von Biochar zu Black Carbon statt, die als *Aktivierung* bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um eine chemische Oxidation der Randgruppen, d.h. um einen partiellen Abbau der Biokohle an der Oberfläche, wodurch diese vergrößert wird und gleichzeitig die Anzahl der von Kationen erreichbaren Außenplätze, die variabel besetzbar sind, steigt [31]. Der Prozess kann unterstützt werden durch die Arbeit von Mikroorganismen. Eine Aktivierung der Biokohle gelingt z.B. wenn diese zusammen mit organischen Reststoffen unter Sauerstoffabschluss einem Fermentationsprozess zugeführt wird. Dabei übernehmen Milchsäurebakterien die Zersetzungsarbeit an den Randgruppen. Es wird angenommen, dass für den Aufbau der Terra Preta die Aktivierung von Biochar zu Black Carbon durch Mikroorganismen sowohl im Boden als auch durch Kompostierungsprozesse vor der eigentlichen Bodenapplication stattgefunden hat [31], [36].

In der zweiten Wirkphase der Biokohle im Boden tragen nun die Eigenschaften des Black Carbon. Durch den Aktivierungsprozess wird die KAK der Kohle und somit auch des Bodengefüges erhöht. Außerdem wurde beobachtet, dass Black Carbon im Boden das Potential erhöht, dass organische Substanzen mit Mineralstoffen Bindungen eingehen [31], was die Stabilität des Bodens erhöht und ihn somit widerstandsfähiger gegenüber Wind- und Wassererosion macht.

Möglichkeit zur C-Sequestrierung

Aufgrund der chemischen Struktur ist Biochar langfristig im Boden stabil, denn die aromatischen Verbindungen sind sowohl resistenter gegenüber mikrobiellem Abbau als auch gegenüber chemischen Abbaureaktionen zu CO_2 . In der ersten Zeit nach der Einbringung in den Boden kommt es noch zu den oben beschriebenen oxidativen Reaktionen, die Biochar zu Black Carbon machen. Black Carbon ist dann aber stabil gebundener Kohlenstoff. Organische Substanzen hingegen, die nicht verkohlt wurden, werden über die Zeit durch chemische und bio-chemische Prozesse zersetzt, sodass der Kohlenstoffanteil (der Kohle und somit auch des Bodens) kontinuierlich sinkt und Emissionen an die Atmosphäre abgegeben werden. Obwohl bei der Produktion von Biokohle über Pyrolyse bereits 50 % des ursprünglich enthaltenen Kohlenstoffs emittiert werden, ist die langfristige Kohlenstoffeffizienz (im Sinne einer angestrebten C-Sequestrierung im Boden respektive Verringerung der C-Emissionen in die Atmosphäre) bei Biochar höher als bei einer direkten Rückführung der Biomasse (siehe Abbildung 3.2) [31].

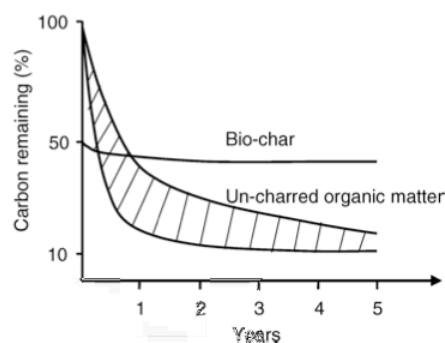


Abb. 3.2: Langfristige Stabilität von Black Carbon im Vergleich zum Abbau organischer Substanz [5]

Zusammenfassung

Kohle kann bei einer Einbringung in den Boden zum Aufbau des Humuskörpers beitragen und den Boden resistenter gegen Wassererosion machen. Dies wird durch eine Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeit erreicht. Um die Bodenproduktivität zu steigern müssen außerdem Nährstoffe zurückgeführt und die Kationenaustauschfähigkeit gesteigert werden [5]. Durch den Einsatz von Biochar kann das Ertragspotenzial der Böden gesteigert werden, sodass auf den Einsatz künstlicher Düngemittel verzichtet werden kann [2]. Außerdem birgt die Einbringung von Biokohle in den Boden das Potenzial langfristig Kohlenstoff im Boden zu speichern.

Die Verkohlung von Biomasse

4.1 Prinzipien der Verkohlung

Biomasseaufbau

Pflanzenwachstum geschieht über den natürlichen biochemischen Prozess der Photosynthese. Dabei werden anorganische Verbindungen mit geringem chemischen Energieniveau (hauptsächlich Kohlendioxid und Wasser) zu chemisch höhermolekularen organischen Verbindungen wie Kohlenhydraten zusammengesetzt [3]. Die Sonne stellt die für diesen Prozess notwendige Energie zur Verfügung. Von bestimmten Zellen der Pflanzen (hauptsächlich den Chloroplasten, die grüne Chlorophyllen enthalten) wird die Sonnenenergie zunächst absorbiert und dann in chemische Energie umgewandelt [7]. Die solare Energie ist somit nun in Form von chemischer Energie in der Biomasse gespeichert. Biomasse ist auch definiert als „erneuerbare Quelle kurzfristig, d.h. über wenige bis einige Jahre, fixierten Kohlenstoffs“ [37]. Die gebildeten Kohlenhydrate, insbesondere Glucose, polymerisieren und bilden so die Hauptbestandteile der Biomasse. Der Aufbau eines Biomassepartikels aus typischen Pflanzenbestandteilen ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Cellulose bildet den größten Anteil bei der Zusammensetzung pflanzlichen Materials, der je nach Art der Biomasse zwischen ca. 30 % bei Gras bis zu ca. 50 % (der TS) bei Holz betragen kann [3], [5], [7]. Sie besteht aus einer sehr großen Anzahl an zusammengesetzten Glucose-Verbindungen (mehrere Tausend), die eine lange unverzweigte Mehrfachzuckerketten bilden. So weist Cellulose einen faserartigen bis kristallinen Aufbau auf, der in Abbildung 4.1 dargestellt ist und der das Material in die Lage versetzt, Zugkräfte aufzunehmen [7].

Bei *Hemicellulose* handelt es sich ebenfalls um polymere Zuckerketten, die sich jedoch im Vergleich zur Cellulose aus einem größeren Spektrum verschiedener Kohlenhydrate und Verbindungsmuster. Hemicellulosen sind generell niedermolekularer

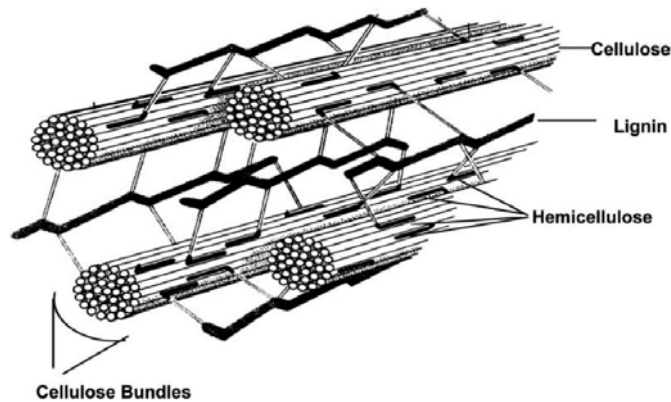


Abb. 4.1: Aufbau einer Pflanzenzelle aus Cellulose, Lignin und Hemicellulose [3]

als Cellulosen. Die Verbindungen können dabei außerdem viele Verzweigungen bilden, sodass Hemicellulose amorphe Eigenschaften besitzt. Hemicellulose besteht aus über 100 zusammengesetzten Einfachzuckern, die thermisch leicht spaltbar sind [3]. In Pflanzenmaterial macht Hemicellulose etwa 20 bis 30 % (der TS) aus und übernimmt die Aufgabe, die pflanzlichen Zellen zu stützen und zu festigen [7].

Lignin besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher zusammengesetzter Gruppen und aromatischen Grundbausteinen, die dreidimensional vernetzt sind. Aufgrund dieses chemischen Aufbaus kann Lignin hohe Druckkräfte aufnehmen und trägt so wesentlich zur Steifigkeit des Materials bei [7]. Im Vergleich zu Cellulose bzw. Hemicellulose ist es jedoch wesentlich schwieriger abbaubar [5]. Lignin ist vor allem am Aufbau holzartiger Biomasse beteiligt, bei welcher der Anteil zwischen 20 und 30 % (der TS) beträgt, während dieser bei halmartiger Biomasse meist unter 20 % (der TS) liegt [3], [7]. Lignin bildet den Verbindungskitt zwischen den Cellulosesträngen und den Hemicellulosen.

Gemeinsam bilden Cellulose, Hemicellulose und Lignin ein polymeres Netzwerk, das in Abbildung 4.1 dargestellt ist und als *Lignocellulose* bezeichnet wird. Lignin kommt natürlich nicht ohne Cellulose vor und ist in seiner Haupteigenschaft sozusagen der Zement, in den die langen Cellulosefasern eingebunden und somit stabilisiert werden [3], [7]. Neben den beschriebenen Hauptkomponenten, die bis zu 95 % der Trockenmasse ausmachen können, besteht Biomasse außerdem zu einem geringen Anteil aus weiteren organischen Bestandteilen wie Fetten, Harzen und Proteinen sowie aus anorganischen Elementen wie z.B. den mineralischen Nährstoffen Phosphor, Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel sowie weiteren anorganischen Substanzen in sehr geringen Konzentrationen, den sog. Spurenelementen, u.a. Silizium, Natrium, Eisen, Zink, Kupfer [5], [7].

Natürlicher Inkohlungsprozess

Sowohl Bergius als auch van Krevelen hatten zunächst akademisches Interesse daran, den Prozess der natürlichen Inkohlung zu erforschen. Durch ihre Arbeiten wurde schließlich die Grundlage für eine technische Verkohlung geschaffen. Aus diesem Grund soll im Folgenden kurz auf den Prozess der natürlichen Inkohlung eingegangen werden.

1. Phase: biochemische Umwandlung

In der Natur geschieht die Umwandlung von Pflanzenmaterial zu Kohle in zwei Phasen und über lange Zeiträume [38]. Grundlegend ist dabei zu Beginn, dass größere Mengen bereits abgestorbener Biomasse von Wasser bedeckt werden (oder Erde, Sand, Schutt) bzw. im Sumpf versinken und so von dem in der Umgebung vorhandenen Sauerstoff abgeschlossen werden. Die anaeroben und hydrothermalen Bedingungen bieten Mikroorganismen (z.B. Pilzen und anaeroben Bakterien) gute Lebensbedingungen. Durch Stoffwechselarbeit dieser Organismen wird die Biomasse abgebaut, indem vor allem Kohlenhydrate und Proteine zersetzt werden. Das Produkt dieser mikrobiologischen und chemischen Umwandlungsphase, die in geringen Tiefen von bis zu einigen Metern (d.h. bei geringen Temperaturen und einem geringen Druck) stattfindet, ist Torf [18]. Die erste Phase, in der eine chemische Umwandlung durch Arbeit von biologischen Mikroorganismen stattfindet, wird als *Diagenese* bezeichnet [38].

2. Phase: thermo-chemische Umwandlung

Über die Zeit kommt es zu weiteren Ablagerungen auf der Oberfläche. Die vertorfte Biomasse wird von neuen Schichten abgestorbener Biomasse und Wasser bedeckt, wobei die Belastung von oben durch die neuen Schichten zunimmt und somit der Druck steigt. Durch das Absinken der gebildeten Torfschicht verringert sich gleichzeitig die Distanz zum heißen Erdinnern, sodass die Umgebungstemperatur steigt. Über die Zeit und mit steigender Temperatur kommt es zu einer fortschreitenden thermo-chemischen Umwandlung des Materials, wobei vor allem H_2O und CO_2 sowie Kohlenwasserstoffverbindungen aus dem Gefüge entweichen. Der Wasser- und der Sauerstoffgehalt des Materials sinken, wodurch der relative Kohlenstoffanteil steigt [39] und Torf sich zu Braunkohle (ab ca. $40\text{ }^\circ\text{C}$), Steinkohle (40 bis ca. $100\text{ }^\circ\text{C}$) und schließlich Graphit (100 bis ca. $330\text{ }^\circ\text{C}$) entwickelt [18]. In dieser geologisch bedingten thermo-chemischen Umwandlungsphase erfolgt außerdem die strukturelle Veränderung der Kohlenstoffbindungen, die nun aromatisieren und sich dreidimensional vernetzen. In dieser zweiten Phase der natürlichen Inkohlung findet im Prinzip eine „*milde, natürliche, thermische Pyrolyse*“ statt [38].

Chemische Veränderung der Biomasse bei der Verkohlung

Mit *Verkohlung* wird die Erhöhung des relativen Kohlenstoffanteils in organischen Verbindungen bezeichnet. Dabei findet teilweise ein Umbau von *Kohlenstoffketten*-verbindungen zu Kohlenstoffverbindungen in Form *vernetzter Ringe* statt. Der aromatische Aufbau ist charakteristisch für fossile Kohle (siehe Abbildung 4.2). Die Produkte der technischen Verkohlung unterscheiden sich jedoch stark hinsichtlich der Aromatisierung. Während sich Pyrolysekohle durch viele Aromaten auszeichnet, weist HTC-Kohle nur wenige aromatische Verbindungen auf.

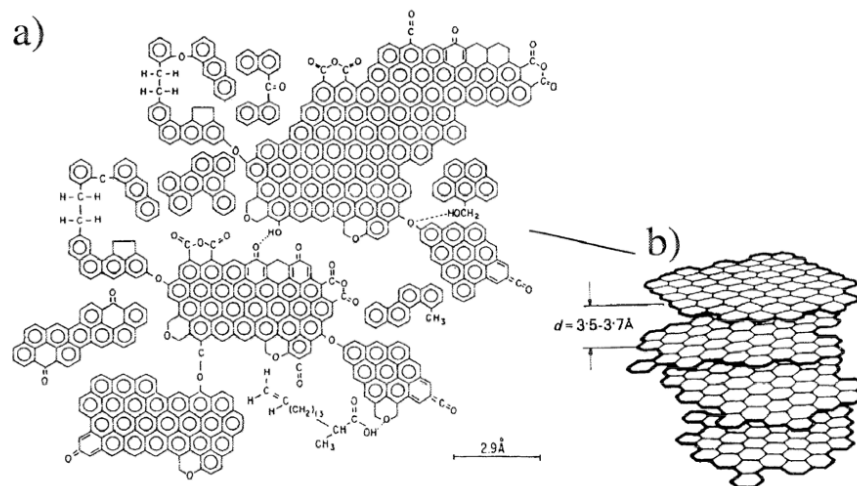


Abb. 4.2: Molekularer Aufbau (a) und strukturelle Anordnung (b) von Black Carbon [4]

Die für fossile Kohle charakteristischen aromatischen Ringe sind wesentlich schwerer für Mikroorganismen aufzubrechen und somit besonders stabil gegen biologische Abbauprozesse. Aus diesem Grund ist auch z.B. Holz in Biogasanlagen nur schlecht abbaubar. Holz enthält viel Lignin, das ebenfalls durch ringförmige Kohlenstoffverbindungen gekennzeichnet ist. Durch die dreidimensional vernetzten Kohlenstoffverbindungen ergibt sich eine große Anzahl an Poren, d.h. eine hohe Porosität der Kohle. Bildlich beschrieben hat die Kohle die Struktur eines Schwammes, die sie für den Einsatz als Bodenverbesserer auszeichnet (siehe auch Abschnitt 3.4 auf S. 19). Diese typische Struktur sieht man der Kohle von außen nicht an, sie kann jedoch unter einem Elektronenmikroskop sichtbar gemacht werden (siehe Abbildung 4.3).

Die Verkohlung von natürlicher Biomasse zeichnet sich zusammengefasst durch folgende Veränderungen der Biomasse aus [5], [38], [39]:

- sinkender Wasserstoffgehalt
- sinkender Sauerstoffgehalt
- mechanische Entwässerbarkeit steigt
- Anstieg des relativen Kohlenstoffgehalts

- Anstieg des relativen Energiegehalts (Heizwert, Brennwert)
- Aromatisierungsgrad und Vernetzung der Kohlenstoffverbindungen:
 - Aromaten sind weitgehend stabil gegen chemischen und biochemischen Abbau
 - Anstieg der Porosität des Produktes durch Aufbau einer dreidimensional vernetzten Kohlestruktur

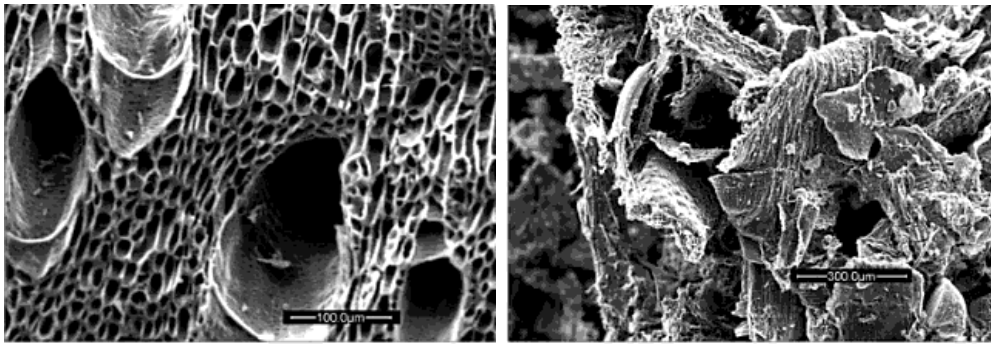


Abb. 4.3: Elektronenmikroskopaufnahmen der porösen Struktur einer Holzkohle (links) und einer Biokohle aus Geflügelmist (rechts) [5]

4.2 Eigenschaften von Kohle und Biochar

Charakteristik von Kohle

Kohle zeichnet sich generell durch eine hohe Porosität aus und unterscheidet sich im Aufbau hinsichtlich der Struktur aus Kohlenstoffverbindungen. Braunkohle und Lignite haben eine amorphe, d.h. ungeordnete Anordnung während Steinkohle und Grafit einen kristallinen, d.h. geordneten Aufbau haben. Die Charakterisierung von Kohle (und Biokohle) erfolgt anhand einiger Kenngrößen, die für die Klassifizierung der Produkte der technischen Verkohlung sowie für die Bewertung deren Eignung als Bodenverbesserer verwendet werden. Die signifikantesten physikalischen und chemischen Eigenschaften der Kohle sind [5]:

- *Porenvolumen*: Das Volumen, das sich aus der Summe der Mikro- und Makroporen¹ im Gefüge ergibt. Ein hohes Porenvolumen steht demnach für eine hohe Porosität der Kohle. Mikroporen tragen zu einer hohen Reaktivität an der Oberfläche bei und Makroporen stellen einen möglichen Lebensraum für Mikroorganismen im Boden dar. Das Volumen der Mikroporen stellt den Großteil des gesamten Porenvolumens und verhält sich somit proportional zur spezifischen Oberfläche der Kohle.

¹Bis 2 nm Durchmesser werden Poren als *Mikroporen* bezeichnet; ab 50 nm als *Makroporen*; dazwischen spricht man von *Mesoporen* [5]

- Die *Spezifische Oberfläche* charakterisiert die Interaktionsfähigkeit der Kohle mit ihrer Umgebung, da die Oberfläche der Kohle gleich der Kontaktfläche zu anderen Materialien ist.
- *Aschegehalt*: Gehalt an anorganischen Verbindungen, der somit auch den *Nährstoffgehalt* beinhaltet. Der Aschegehalt ist abhängig von der elementaren Zusammensetzung der ursprünglichen Biomasse sowie den Temperaturen, denen diese bei der Verkohlung ausgesetzt wurde. Bei einer Erhitzung gehen ab bestimmten Temperaturen auch anorganische Stoffe in die Gasphase über. Die meisten Nährstoffe verdampfen bereits bei geringen Temperaturen und der Aschegehalt sinkt entsprechend.
- Da der Prozess der Inkohlung eine Veränderung von Biomasse zu Kohle durch eine Veränderung der elementaren Zusammensetzung beschreibt, lässt sich Kohle bzw. Biokohle anhand der *Verhältnisse der Hauptelemente* charakterisieren:
 - H/C-Verhältnis: sinkt mit zunehmendem Inkohlungsgrad, da der Wasserstoffgehalt durch Dehydratation reduziert wird
 - O/C-Verhältnis: sinkt mit zunehmendem Inkohlungsgrad, durch Decarboxylierung und Decarbonylierung

Der Aschegehalt der Biokohle sollte bei einer anschließenden energetischen Nutzung aus Gründen der Energieeffizienz und der Prozessführung relativ gering sein. Bei einer stofflichen Nutzung der Biokohle ist dies jedoch anders zu bewerten, da der Aschegehalt den Anteil an anorganischen Elementen in der Kohle beinhaltet. Unter diese anorganische Fraktion fallen u.a. die Hauptnährstoffe und somit lässt der Aschegehalt einer Biokohle auch eine qualitative Aussage über die Bodenwirkung zu.

Das H/C-Verhältnis kann als Anhaltspunkt für die Aromatisierung der Kohle angesehen werden wobei gilt: je geringer das H/C-Verhältnis, desto mehr aromatische Kohlenstoffverbindungen liegen tendenziell vor. Das H/C- und das O/C-Verhältnis sind die bedeutendsten Kenngrößen zur Klassifizierung von Kohle und werden klassischerweise im sog. Van-Krevelen-Diagramm aufgezeichnet. Abbildung 4.4 zeigt ein solches Diagramm, in dem verschiedene typische Kohlestoffprodukte eingetragen sind (die rote und die grüne Linie zeigen den Verlauf einer möglichen Inkohlung von Cellulose bzw. Glucose) [6].

Wichtige Eigenschaften von Biochar

Spezifische Eigenschaften von Biokohle, die im Zusammenhang mit einer positiven Wirkung bei der Einbringung in den Boden gesehen werden [5], [31], [40]:

- Porosität, d.h. hohes Porenvolumen

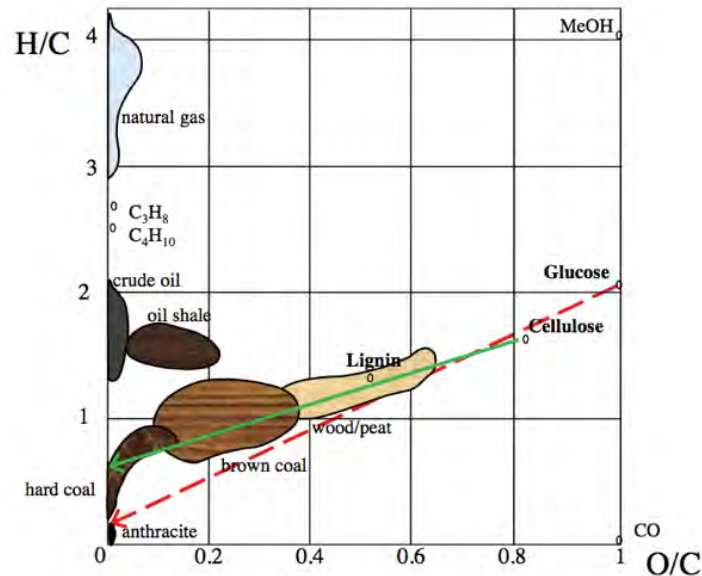


Abb. 4.4: Van-Krevelen-Diagramm zur Charakterisierung von Biomasse sowie festen, flüssigen und gasförmigen fossilen Energieträgern [6]

- hohe spezifische Oberfläche
- hohe Wasserspeicherkapazität
- O/C-Verhältnis zwischen 0,2 und 0,6
- H/C-Verhältnis zwischen 0,25 und 1,0
- Rekalzitranz, d.h. chemische Stabilität, da hoher Anteil von Kohlenstoff in langfristig stabilen Bindungen
- Elementarzusammensetzung mit hohem Nährstoffanteil
- hohe KAK (die KAK von Biochar ist dreimal höher als die organischer Bodensubstanz)
- hydrophile Eigenschaft
- pH-Wert ausgleichende Wirkung

4.3 Überblick über die Verfahren zur Nutzung von Bioenergie

Nun soll ein kurzer Überblick über die verschiedenen Verfahren der Bioenergienutzung gegeben werden, um das in dieser Arbeit betrachtete Verfahren in einen energetischen Kontext zu bringen. Abbildung 4.5 zeigt ein vereinfachtes Schema der anthropogenen Nutzung von Bioenergie².

Bioenergie und Energieträger

Bei der Sonnenenergie (also der Solarstrahlung) handelt es sich um eine Form von

² zu Abbildung 4.5: PME = Pflanzenölmethylester bzw. RME = Rapsölmethylester

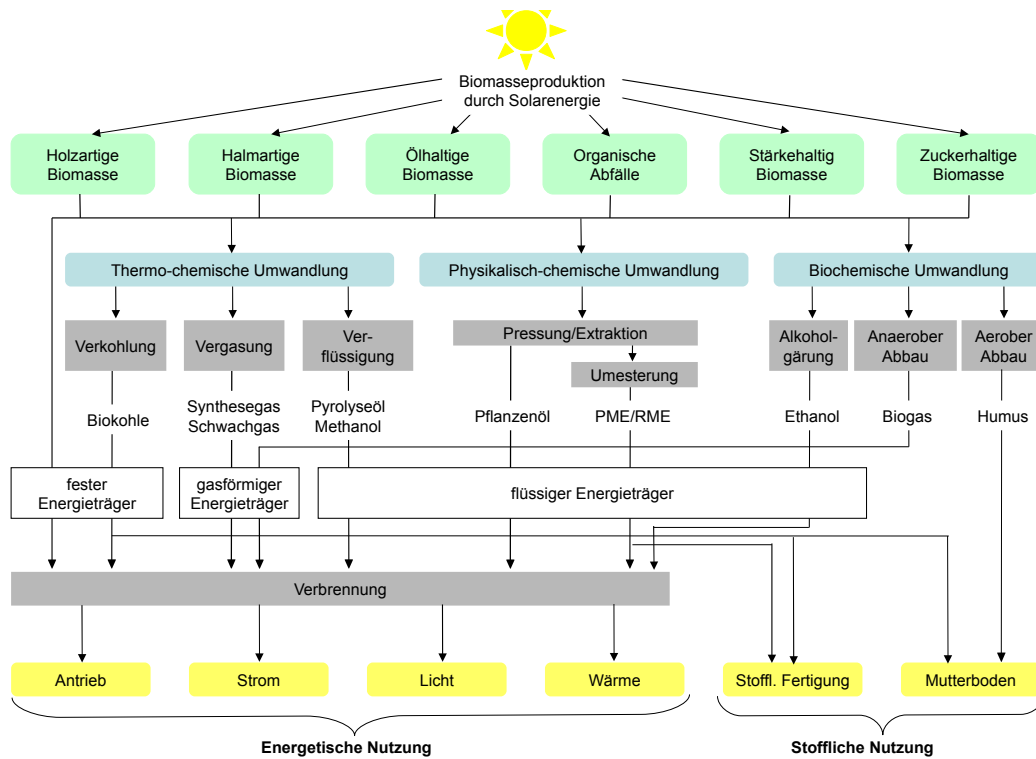


Abb. 4.5: Schema der technischen Bioenergienutzung (eigene Darstellung angelehnt an [7])

Primärenergie. Pflanzen, die Sonnenenergie über Photosynthese gespeichert haben, werden in ihrem natürlichen Vorkommen als Primärenergieträger bezeichnet, z.B. ein Baum. Sobald ein Primärenergieträger eine erste technische Umwandlung durch den Menschen erfährt, d.h. strukturell verändert wird, wird er zum *Sekundärenergieträger*, z.B. ein Holzsplit. Erste Umwandlungsschritte bei der Bereitstellung von Energie aus Biomasse sind die Ernte der Biomasse sowie darauf folgende Aufbereitungsschritte wie Trocknen, Zerkleinern, Vermischen oder Pressen und der Transport zur nachgeschalteten Umwandlungsanlage [7]. Pellets, die vom Endverbraucher zur energetischen Nutzung gekauft werden, werden als *Endenergieträger* bezeichnet und schließlich zur Generation von Wärme und Strom, der eigentlichen *Nutzenergie*, verwendet [7].

Die in Abbildung 4.5 aufgeführten Umwandlungsverfahren können aufgrund der Art der dabei ablaufenden Prozesse in thermo-chemische, physikalisch-chemische und biochemische Umwandlung unterteilt werden. Prinzipiell können alle Biomassearten verbrannt werden (d.h. direkte thermo-chemische Umwandlung). Holz eignet sich aufgrund des vergleichsweise geringen Wassergehalts respektive des hohen Energiegehalts sowie der äußeren Erscheinungsform besonders für die Verfahren der thermo-chemischen Umwandlung. Ölhaltige Biomasse wie z.B. Raps und Ölpalmen werden vorrangig eingesetzt, um über eine physikalisch-chemische Umwandlung flüssige Endenergieträger herzustellen. Biomasse mit hohem Zucker- bzw. Stärkegehalt, z.B.

Kartoffeln, Zuckerrohr oder -rübe, können Mikroorganismen ausreichend Nahrung für deren Stoffwechsel zur Verfügung stellen und werden somit als Ausgangsstoff in biochemischen Verfahren eingesetzt. Hinzu kommen auch neue Nutzungspfade für organische Abfälle, wie z.B. die Biogaserzeugung aus Klärgas oder Ernte- und Essensresten.

Die Biomasse liegt nach der Umwandlung als fester, flüssiger oder gasförmiger Energieträger vor, dessen gespeicherte Energie nun zeitlich und/oder räumlich versetzt genutzt werden kann. Bei den meisten Verfahren handelt es sich um sog. Veredelungsverfahren [7], da die biogenen Energieträger in bestimmten Eigenschaften für eine anschließende Verwendung aufgewertet werden. So kann zum einen ein Nutzen darin liegen, dass der Aggregatzustand oder die Form eines Energieträgers geändert wird, z.B. kann das energiehaltige flüssige Öl, das aus festen Rapskörnern gepresst wird, gepumpt und direkt ohne technische Modifikationen in herkömmlichen Motoren verbrannt werden. Zum anderen wird die Aufwertung der Biomasse durch eine *Erhöhung der Energiedichte* erreicht, was einen Vorteil für den Transport der Biomasse unter wirtschaftlichen Kriterien bedeutet. Neben der energetischen Nutzung kommt auf einigen Pfaden auch eine stoffliche Weiterverwendung in Frage, z.B. Sonnenblumenöl zum Kochen oder Palmöl in der Kosmetikindustrie.

Zum Stand der Technik

Die Verfahren zur Umwandlung über den physikalisch-chemischen bzw. biochemischen Weg sind bereits anlagentechnisch umgesetzt und ausreichend erprobt und somit auch Stand der Technik. Die Verfahren zur thermo-chemischen Umwandlung hingegen, sind bis auf Ausnahmen, wie Verbrennung und traditionelle Holzkohleherstellung, noch nicht ausgereift und befinden sich noch in der Test- bzw. Demonstrationsphase. Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Forschung liegt derzeit hauptsächlich auf der energetischen Nutzung von Biomasse, wobei das Interesse an Umwandlungsverfahren von Biomasse zur synthetischen Herstellung von Materialien, die bisher aus Rohöl produziert wurden (wie z.B. Aktivkohle, verschiedene Öle und industrielle Grundchemikalien) stark steigt.

Im Folgenden werden die verschiedenen Verfahren zur Nutzung von Bioenergie kurz erläutert, wobei der Schwerpunkt auf den Verfahren der thermo-chemischen Umwandlung, insbesondere der Verkohlung, liegt.

Biochemische Umwandlung

Bei Verfahren der biochemischen Umwandlung wird die Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Biomasse durch den Einsatz von Mikroorganismen und

somit durch biologische Prozesse bewerkstelligt. Bei der *alkoholischen Gärung* werden die in der Biomasse enthaltenen Kohlenhydrate durch Mikroorganismen aufgespalten und Ethanol produziert. Der Prozess läuft anaerob ab. Beim *aeroben Abbau* wird die Biomasse durch die Arbeit von Bakterien aufgespalten und dabei Wärme abgegeben. Z.B. findet ein aerober Abbau bei der Kompostierung oder bei der Abwasserbehandlung statt. Der aerobe Abbau findet in einer Luftumgebung statt und durch die Atmung der beteiligten Mikroorganismen wird ein Teil des pflanzlichen Kohlenstoffs oxidiert und so neben H_2O auch CO_2 freigesetzt. Beim aeroben Abbau wird die Biomasse vollständig zersetzt und es entsteht Humus, der landwirtschaftlich genutzt werden kann. Der *anaerobe Abbau* von Biomasse geschieht hingegen unter Ausschluss von Sauerstoff und durch die Arbeit von Mikroorganismen, die an diese Bedingungen angepasst sind. Durch das Abspalten von Sauerstoff aus dem Biomassesubstrat entsteht CO_2 , sodass die Mikroorganismen auch unter anaeroben Bedingungen „atmen“ und Stoffwechselprozesse durchführen können. Die organische Substanz wird beim anaeroben Abbau von den Mikroorganismen nicht vollständig abgebaut und es entsteht ein energetisch höherwertiges Gasgemisch aus ca. einem Drittel CO_2 und zwei Dritteln CH_4 [7]. Das Biogas aus den Kleinstbiogasanlagen des BiogaST-Projektes wird direkt in Kochern bzw. Gaslampen verbrannt und somit zur Bereitstellung von Wärme zum Kochen und Licht genutzt.

Physikalisch-chemische Umwandlung

Ziel der physikalisch-chemischen Umwandlungsverfahren ist es, die flüssigen und energiereichen Öle von den festen Bestandteilen der Biomasse physikalisch zu trennen und diese somit für eine energetische Verwendung verfügbar zu machen. Bei der *Pressung* geschieht dies durch mechanische Einwirkung; bei der *Extraktion* findet ein zusätzlicher chemischer Aufschluss durch Zugabe eines Lösungsmittels statt. Die Prozesse finden ohne Zufuhr von Wärme statt, da sich das Pflanzenöl sonst zersetzen würde. Bei der anschließende *Umesterung* wird das gewonnene Pflanzenöl zu Biokraftstoff aufgearbeitet [7].

Thermo-chemische Umwandlung

Die thermo-chemische Behandlung von Biomasse führt je nach Verfahren und Prozessführung zu gasförmigen, flüssigen oder festen Produkten, wobei die Anteile abhängig von den Prozessbedingungen signifikant voneinander abweichen können. In Tabelle 4.1 sind die Verfahren zur thermo-chemischen Umwandlung von Biomasse zu festen, flüssigen oder gasförmigen Energieträgern anhand der charakteristischen Prozessparameter zusammengetragen³.

³ *pyrolytisch (pyr.)* = „die Pyrolyse betreffend, auf ihr beruhend“ [17]

Tab. 4.1: Vergleich der thermo-chemischen Umwandlungsverfahren anhand charakteristischer Prozessgrößen [7] [6]

Umwandlung	Temperatur	Aufheizrate	Verweilzeit	Druck
pyr. Verkohlung	200 bis 500 °C	niedrig	bis mehrere h	≈ 1 bar
pyr. Verflüssigung	450 bis 600 °C	hoch	niedrig	≈ 1 bar
pyr. Vergasung	700 bis 900 °C	hoch	hoch	≈ 1 bar
HTC	170 bis 220 °C	k.A.	120 bis 200 Min.	10 bis 20 bar
HTL	250 bis 350 °C	k.A.	10 bis 30 Min.	50 bis 200 bar
HTG	400 bzw. 600 bis 700 °C	k.A.	1 bis 5 Min.	200 bis 350 bar

Pyrolytische Verfahren zur Umwandlung von Biomasse zielen auf eine Reihe von Transformationen ab, um aus festen Energieträgern höherwertige, vorwiegend flüssige oder gasförmige Produkte zu gewinnen. Die wichtigsten Unterscheidungsparameter pyrolytischer Verfahren sind Druck, Temperatur, Reaktionsdauer und Aufheizrate. Abbildung 4.6 zeigt den Zusammenhang zwischen der anteiligen Zusammensetzung der Pyrolyseprodukte und der erreichten Prozesstemperatur sowie der Aufheizrate bei Normaldruck.

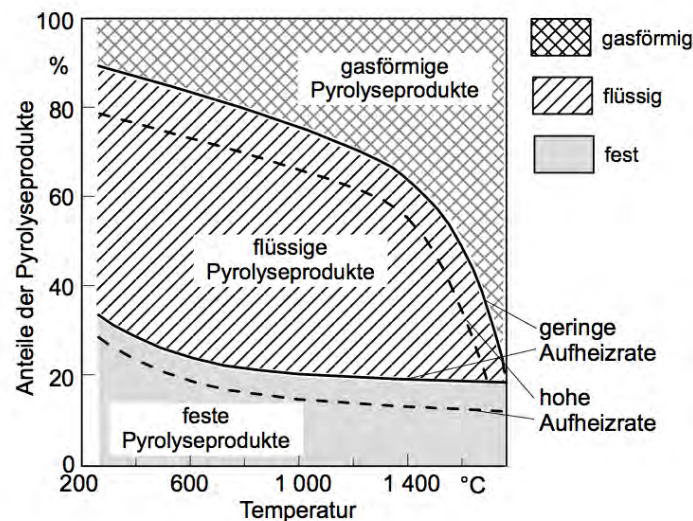


Abb. 4.6: Produkte der thermo-chemischen Umwandlung durch Pyrolyse (am Beispiel Holz) [7]

Generell erzeugen kurze Verweilzeiten, hohe Aufheizraten und moderate bis hohe Temperaturen bevorzugt flüssige Produkte (schnelle Pyrolyse). Lange Verweilzeiten und hohe Temperaturen begünstigen gasförmige Produkte (Vergasung) wohingegen bei moderaten bis geringen Temperaturen vorwiegend feste Stoffe entstehen (klas-

sische Pyrolyse). Die konventionelle, langsame Pyrolyse ist schon im Altertum zur Herstellung von Holzkohle sowie zur Gewinnung von Holzkohleteer zum Abdichten von Booten bekannt gewesen [41].

Neben der klassischen Pyrolyse gibt es andere innovative Verfahren zur thermochemischen Umwandlung von Biomasse, die zusammengefasst bei vergleichsweise niedrigeren Temperaturen aber dafür unter teilweise hohem Druck sowie in Gegenwart von Wasser stattfinden. Die *hydrothermalen Verfahren* sind wissenschaftlich interessant, da sie sich auch für den Einsatz von feuchter Biomasse eignen. Auch unter hydrothermalen Bedingungen kann Biomasse je nach Prozessgestaltung in feste, flüssige oder gasförmige Produkte mit unterschiedlichen Anteilen umgewandelt werden. Die HTC als hydrothermales Verfahren zu künstlicher Verkohlung ist weiter in Abschnitt 4.5 behandelt.

Vergleich der klassischen Pyrolyse und der HTC

Zur technischen Verkohlung von Biomasse kommen somit generell zwei Umwandlungsprozesse in Frage die in Tabelle 4.2 unterschieden werden.

Tab. 4.2: Vergleich der beiden Verkohlungsverfahren klassische Pyrolyse und HTC

technisches Verfahren	klassische Pyrolyse	HTC
eingesetzte Biomasse	trocken	nass
Temperaturbereich	über 200 °C	unter 200 °C
Druck	normal	erhöht
Umgebung	ohne Sauerstoff	mit Wasser
Entwicklungsstand	Stand der Technik (historisch)	Grundlagenforschung

4.4 Pyrolyse zur Verkohlung von Biomasse

Charakteristik

Typische Bereiche der Prozessgrößen der klassischen Pyrolyse zur Verkohlung von Biomasse sind [7], [37]:

- Temperatur: unter 400 °C
- Aufheizrate: sehr niedrig (0,01 bis 2 °C pro Sekunde)
- Verweilzeit (nach Aufheizung): mehrere Stunden bis Tage
- langsames Abkühlen der Produkte über Stunden

- Sauerstoffabschluss
- Normaldruck

Tab. 4.3: Aufteilung der Pyrolyseverfahren in zwei Gruppen [7] [5]

Merkmal	Gruppe 1	Gruppe 2
Herstellungspraxis	traditionell/herkömmlich	modern/innovativ
Einsatzregion	ärmere Länder	Industrienationen
Betriebsweise	Batch und quasi-kontinuierlich	Kontinuierlich
Entwicklungsstand	Stand der Technik	Labor- bis Demonstrationsphase
Technologisierungsgrad	niedrig (low-tech)	hoch (high-tech)
Verfahrensweise (Handhabung)	manuell bzw. händisch	automatisiert
Materialbedarf	einfache Materialien	hohe Ansprüche an die Bau- und Betriebsstoffe
Energiebedarfdeckung	Teilverbrennung der eingesetzten Biomasse	Verbrennung der entstehenden Gasphase
Kernproblem	Belastung für Mensch und Umwelt durch Schwelgase	technisch aufwendig und nicht wirtschaftlich
Anlagentypen	Unter- oder überirdische Erdmeiler, transportable Metallmeiler, gemauerte oder betonierte Meiler	Retortenverfahren, Wander- oder Wirbelschichtreaktor, Flugstaubvergaser, Flash-Pyrolyse

Pyrolyseanlagen

Für die technische Umsetzung der Verkohlung über Pyrolyse gibt es eine Vielzahl von anlagentechnischen Lösungen, die im Laufe der Zeit realisiert wurden. Dabei hat eine stetige Weiterentwicklung der Anlagentechnik stattgefunden, die sich vor allem auf die zusätzliche Nutzung der gasförmigen und flüssigen Produkte sowie Effizienzsteigerungen bezieht. Fast alle Verkohlungsanlagen haben jedoch gemeinsam, dass sie bei Normaldruck betrieben werden. Die technisch realisierten Anlagen zur Bio-kohleherstellung über Pyrolyse lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen aufteilen, die in Tabelle 4.3 aufgelistet sind und sich anhand bestimmter Merkmale unterscheiden lassen.

Bei der ersten Gruppe von Pyrolyseanlagen handelt es sich um herkömmliche, d.h. traditionelle Verfahren, die derzeit vor allem in ärmeren Ländern in großem Umfang eingesetzt werden. Die meisten Anlagen werden *quasi-kontinuierlich* betrie-

ben, indem mehrere Reaktoren zeitversetzt im sog. *Batch-Betrieb*⁴ laufen, d.h. die Reaktionsräume werden nacheinander mit Biomasse, meist Holz, beladen und der Prozess gestartet. Für die Verkohlung von Holz werden weltweit hauptsächlich die folgend beschriebenen Anlagentypen der Pyrolyse betrieben. Bei den Anlagen der zweiten Gruppe handelt es sich um innovative Verfahren im Bereich der Grundlagenforschung, die technisch im Labormaßstab realisiert sind. Einige Verfahren wurden auch schon im Demonstrationsbetrieb umgesetzt, konnten sich jedoch noch nicht etablieren. Kennzeichnend für die Verfahren der zweiten Gruppe ist die Weiterentwicklung der Betriebsweise vom Batch-Betrieb zu einem *kontinuierlichen Betrieb*, wodurch hauptsächlich eine Steigerung der Effizienz sowie eine Senkung der Umweltbelastungen erreicht werden soll.

Die klassische Variante der Holzkohleproduktion erfolgt in Meilern, die unter- oder oberirdisch gebaut sein können. Für die *Meilerverfahren* ist charakteristisch, dass die notwendige Prozesswärme über die Verbrennung eines Teils des eingesetzten Materials erzeugt wird. *Erdmeiler* werden als solche bezeichnet, weil das zu verkohlende Holz über oder unter der Erde gestapelt und dann mit einer Erdschicht bedeckt wird, um es vom umgebenden Sauerstoff abzugrenzen und Wärmeverluste zu reduzieren. Abbildung 4.7 zeigt typische Erdmeileranlagen, wie sie auch in Kagera hauptsächlich zur Charcoal-Produktion eingesetzt werden.

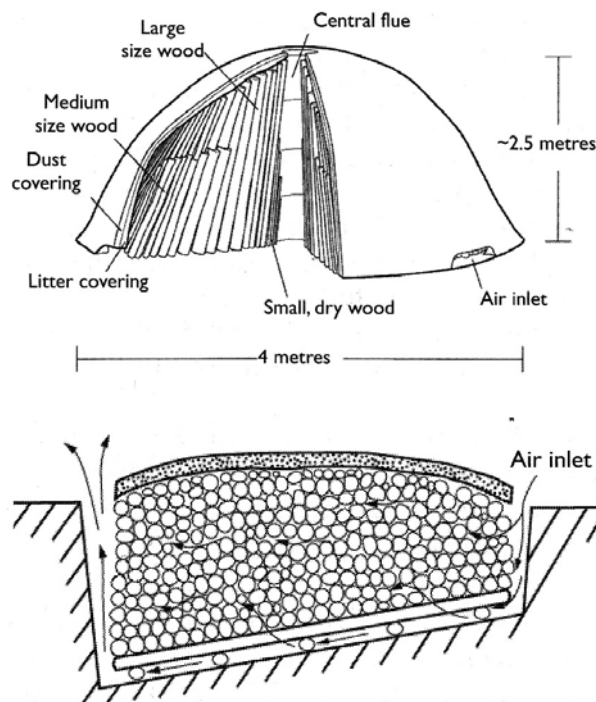


Abb. 4.7: Traditionelle Holzkohleproduktionsanlagen: ober- und unterirdischer Erdmeiler [5]

⁴batch (engl.) = „abgeteilte Menge, Stapel“

Die klassischen Erdmeiler wurden schließlich weiterentwickelt und andere Materialien eingesetzt, sodass die Arbeitszeit zum Errichten der Meiler vor jedem Prozess entfällt und die Produktion erhöht werden kann. Die Meiler können **gemauert** sein (siehe Abbildung 4.8) bzw. die Wände **aus Beton** bestehen (z.B. Missouri-Meiler; siehe Abbildung 4.9) und werden somit immer am selben Ort betrieben.

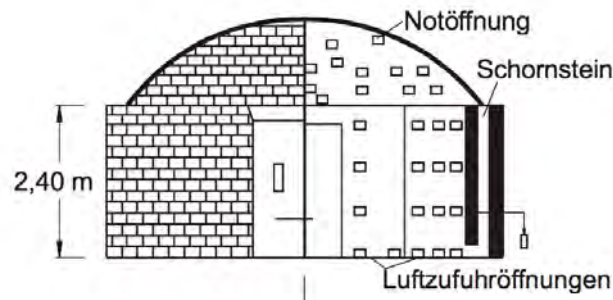


Abb. 4.8: Traditioneller gemauerter Meiler [7]

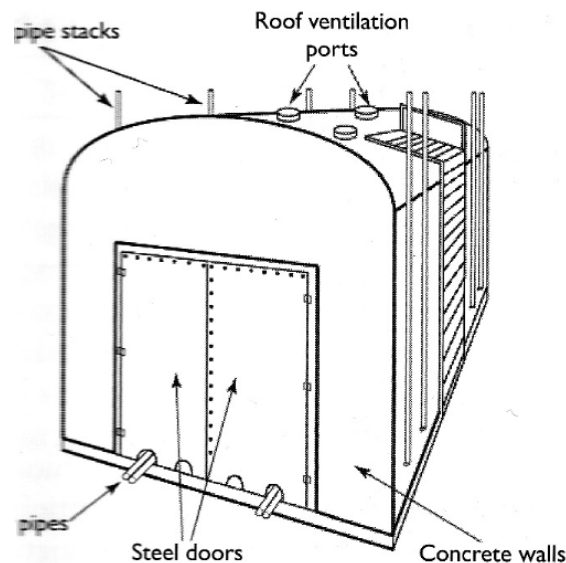


Abb. 4.9: Traditionelle Holzkohleproduktion im „Missouri“ Meiler aus Beton [5]

Eine weitere Modifikation des traditionellen Meilverfahrens im Rahmen der kontinuierlichen Weiterentwicklung ist der transportabel gestaltete Meiler aus Metall, der an verschiedenen Orten einsetzbar ist, sodass der Biomassetransport entfällt. Dafür muss jedoch der **Metallmeiler** z.B. mit einem LKW von einem Ort an einen anderen transportiert werden. Abbildung 4.10 zeigt ein Bild eines typischen Metallmeilers.

In der folgenden Tabelle 4.4 sind die traditionellen Meilverfahren anhand einiger wichtiger Kriterien und Kenngrößen vergleichend dargestellt.

Tab. 4.4: Charakterisierung der klassischen Holzverkohlungsanlagen [5] [7] [10]

Kriterium	Erdmeiler	Mauer- bzw. Betonmeiler	Metallmeiler
Kohleertrag	20 bis 25 %	25 %	20 bis 30 %
Beladungsraum	bis 30 m ³ und 6 t Kohle pro Ladung	bis 60 m ³ (gemauert), ca. 180 m ³ und 16 t (Missouri)	ca. 10 m ³
Betriebsdauer (inkl. Be- und Entladung)	10-13 Tage	3 Tage (gemauert), 1-3 Wochen (Missouri)	k.A.
Schwelgasnutzung	nein, gehen in Atmosphäre	werden abgefangen und nachverbrannt (Missouri)	k.A.
Vorteile	einfache Bauweise und Bedienung, keine Technik erforderlich, nicht ortsgebunden, ggf. keine bis kurze Transportwege für Biomasse, geringe Kosten	höhere Ausbeute, gleichmäßige, gute Qualität der Kohle, wiederverwendbar, geringe Kapital- und Arbeitskosten, einfache Beladung, geringere Umweltbelastung durch Schwelgasnutzung	transportabel und wiederverwendbar, kontrollierte Strömung der Frischluft und Rauchgase, höhere Ausbeute, gute Kohlequalität, Prozess kann auch ohne permanente Betreuung laufen, Betrieb wetterunabhängig
Nachteile	hoher Arbeitseinsatz, begrenzt wiederverwendbar, Kohleprodukte sind unvollständig und ungleichmäßig verkohlt und mit Erde verunreinigt, hohe Belastung für Arbeiter und Umwelt durch Rauch- und Schwelgasemissionen	geringe Lebensdauer wegen thermischer Belastungen in den Wänden, stationärer Betrieb erfordert Holztransport	hohe Emissionen (ca. $\frac{1}{3}$ der TS des eingesetzten Holz), erfordert Stahl (u.U. teuer), LKW zum Transport notwendig, höherer Wartungsaufwand

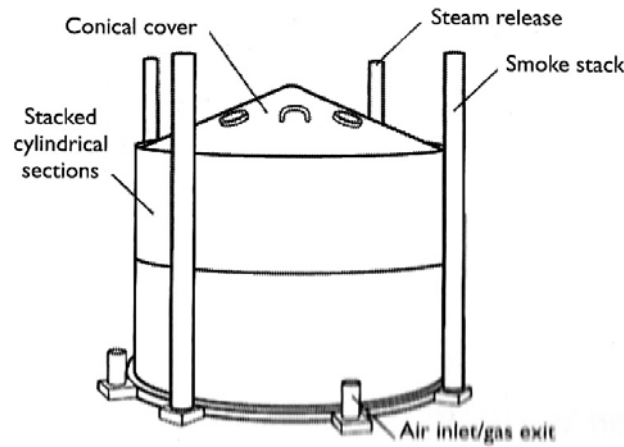


Abb. 4.10: Transportable Pyrolyseanlage aus Metall [5]

Schlußfolgerungen

Zusammengefasst zeichnen sich die Pyrolyseverfahren der Gruppe 1 durch folgende Eigenschaften aus:

- einfache Bauweise
- einfache Handhabung (erfordert nur angeleitetes Personal)

Nachteile sind jedoch:

- sehr geringe Effizienz ohne Nutzung der anderen Produkte (ca. 10 bis teilweise 36 % [10])
- hohe Emissionen und somit Belastung für Mensch und Umwelt
- Notwendigkeit des Einsatzes von Biomasse mit hohem TS-Gehalt von über 70 % (respektive geringem Wassergehalt um 26 %) erfordert hauptsächlich Einsatz von Holz, was zur Abholzung und Wüstenausbreitung führt mit den bekannten negativen Auswirkungen für die Landwirtschaft und den Klimawandel

Charakteristisch an pyrogener Kohle ist bspw. folgendes:

- C-Gehalt 75 bis 83 %
- geringer Stickstoffgehalt
- geringer Aschegehalt (4 bis 15 %)
- enthält kein Schwefel und kein Quecksilber
- hohe Porosität
- hohe Reaktivität, d.h. Neigung durch Reaktionen chemische Bindungen mit anderen Stoffen einzugehen

Nachteilig für eine Anwendung als Bodenverbesserer sind der geringe Stickstoffgehalt sowie die hohe Reaktivität, die unter bestimmten Umständen auch zur langfristigen Bindung von Nährstoffen im Boden führen kann, sodass diese dann den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung stehen.

Obwohl Biochar als Produkt der klassischen Pyrolyse bereits eine gute Bodenwirksamkeit bewiesen hat, sollten auf Grund der offensichtlichen Nachteile dieses Herstellungsverfahrens (energetisch uneffizient, unwirtschaftlich und umweltschädigend, nur trockene Biomasse verwendbar) neue Ansätze gefunden werden. Auch Antal *et al.* fordert neue technische Möglichkeiten zur Biokohleherstellung und bezeichnet Pyrolyse als „Verschwendung von Holz“ [10]. Deshalb wird im Folgenden das innovative Verfahren der HTC vorgestellt.

4.5 Hydrothermale Carbonisierung (HTC)

Einleitung

Bereits Anfang des vergangenen Jahrhunderts entdeckte Friedrich Bergius das Verfahren der HTC zur Verkohlung von Biomasse und erhielt 1931 den Nobelpreis für Chemie „für die Entwicklung von chemischen Hochdruckverfahren“ [42]. Seine Intention war, die natürliche Entstehung von Kohle aus terrestrischer Biomasse zu verstehen. Anschließend erforschte er Hochdruckverfahren zur künstlichen Herstellung von Substituten für fossile Energieträger. Bei der HTC findet eine Zersetzung des biogenen Materials unter Wärmeeinfluss in der Umgebung von Wasser ohne Kontakt zu Luft-Sauerstoff in einem geschlossenen Behälter unter Druck statt.



Abb. 4.11: Carbonisierung von Gras (links) zu HTC-Kohle (rechts) [9]

Die Biomasse wird bei der HTC „zu Kohle ausgekocht“ [43]. Eine Umwandlung bei welcher der relative Anteil von Kohlenstoff in einer organischen Verbindung erhöht wird (wobei hauptsächlich H_2O entfernt wird), wird als *Carbonisierung* bezeichnet [44]. Da HTC in Wasser als Reaktionsmedium stattfindet, eignet sich insbesondere feuchte Biomasse als Ausgangssubstrat. Die Vorteile der HTC, die sie auch im be-

trachteten Anwendungsfall für die Aufbereitung von Gärresten als Bodenverbesserer interessant machen, sind die Folgenden [45], [46]:

- keine Beschränkung auf Biomasse mit hohem TS-Gehalt
- keine Notwendigkeit einer technischen Trocknung vor der Umsetzung
- geringere Prozesstemperaturen im Vergleich zur Pyrolyseverkohlung
 - Nährstoffe (inkl. N) bleiben weitgehend im festen Reaktionsprodukt erhalten
 - es findet keine pyrolytische Zersetzung statt und es bilden sich somit keine Pyrolyseöle

Die Forschung zur HTC, sowohl was das Verständnis und die Kenntnisse der ablaufenden Prozesse als auch was die anlagentechnische Realisierung betrifft, befindet sich noch weitgehend im Grundlagenbereich.

Prozessablauf

Bei der HTC wird Biomasse mit Wasser in einem geschlossenen Druckbehälter bei einer Temperatur zwischen 180 und 200 °C über einen Zeitraum von mehreren Stunden thermisch behandelt. Der anliegende Druck im geschlossenen System liegt über Sattedampfbedingungen. Im Bereich der bereits genannten typischen maximalen Prozesstemperaturen steigt der Reaktorinnendruck auf ca. 10 bis 20 bar. Während der HTC von Biomasse werden organische Säuren abgespalten, die das Reaktionsmedium ansäuern. Der Prozess findet üblicherweise bei pH 3 bis 6 statt.

Bei der HTC läuft eine Vielzahl von chemischen Reaktionen parallel und sequenziell ab, was die Bestimmung aller Intermediate und Endprodukte unmöglich macht. Die Carbonisierung wird dabei hauptsächlich durch eine Senkung des O-Gehaltes sowie teilweise des H-Gehaltes erreicht [47]. Über die genauen Reaktionsmechanismen und deren Verlauf liegt bisher nur ein geringer Kenntnisstand vor, d.h. die Wissenschaft zur HTC beschäftigt sich vor allem mit der Erforschung der grundlegenden Reaktionen und den Zusammenhängen sowie den Einflüssen, die durch eine technische Prozessgestaltung steuerbar sind. Abbildung 4.12 zeigt ein Schema der wichtigsten Reaktionspfade, der Biomassehauptkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf die einzelnen bei der HTC ablaufenden chemischen Reaktionen und die dabei entstehenden Zwischenprodukte aufgrund deren Komplexität und Vielzahl nicht einzeln eingegangen, sondern es werden nur die Prozessphasen zusammenfassend, soweit bekannt, beschrieben.

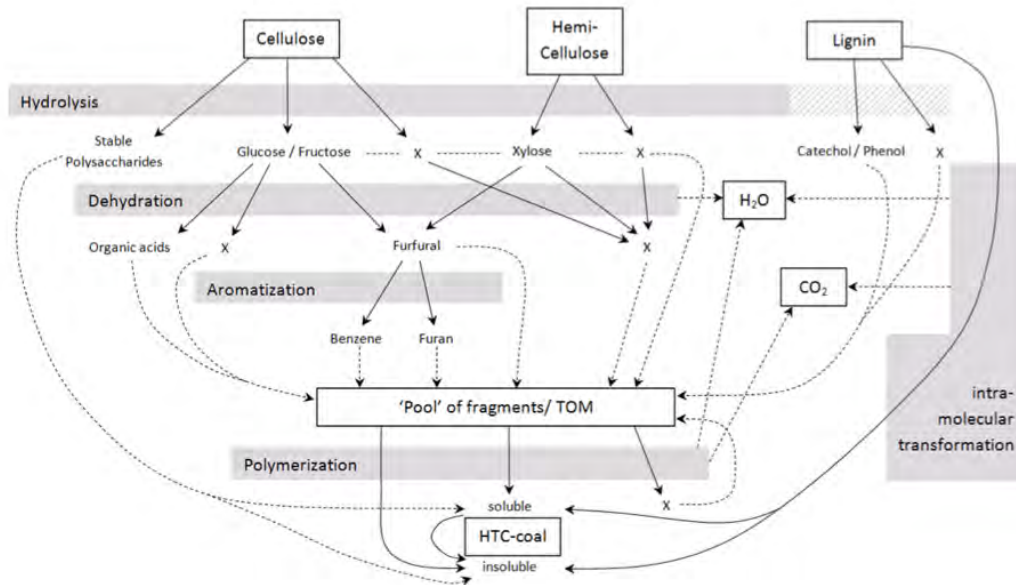


Abb. 4.12: Schema wichtiger Reaktionsmechanismen bei der HTC [8]

Bei der **Hydrolyse**⁵ werden durch chemische Reaktion mit Wasser die Moleküle des komplexen Polymers Biomasse in kleinere Bausteine, vor allem Mehrfachzuckerverbindungen, zersetzt. Dabei ist die erforderliche Mindesttemperatur je nach Zusammensetzung für verschiedene Biomassearten unterschiedlich [3]. Bei der Hydrolyse verliert die Biomasse großteils ihre makroskopische Struktur [48].

Als **Dehydratisierung** werden Reaktionen bezeichnet, durch die es zu einer Wasserabspaltung in der Biomasse kommt.

Bei der **Decarboxylierung** werden Carboxyl-Gruppen abgespalten. Experimentell wurde bisher erkannt, dass die Decarboxylierung bei Temperaturen von unter 200 °C kaum stattfindet [49].

Mit der **Aromatisierung** wird der Kohle der strukturelle Charakter gegeben. Aromatische Verbindungen sind ringförmige chemische Verbindungen, die sich durch eine gute chemische Stabilität auszeichnen. Eine Aromatisierung findet meist erst ab 270 °C statt.

In der **Polymerisation** rekombinieren reaktionsfähige Intermediate, die bei der Depolymerisation der Biomasse entstanden sind.

Die Verkohlung von Biomasse findet bei der HTC hauptsächlich über den Weg der Zersetzung mit anschließender Polymerisation statt. Allerdings können auch direkte

⁵Mit *Hydrolyse* wird auch ein komplettes energietechnisches Verfahren bezeichnet, das zur Direktverflüssigung von Biomasse eingesetzt werden kann und sich von der HTC durch vergleichsweise deutlich kürzere Verweilzeiten im Sekundenbereich abgrenzt, um die Phase der Polymerisation und somit der Ausbildung einer festen Phase zu vermeiden [3].

chemische Umstrukturierungen, d.h. durch **Intramolekulare Umformungsreaktionen** stattfinden. Dies betrifft vor allem Lignin, da dieser Pflanzenbestandteil bei der Hydrolyse nur schwer zersetzbar ist [3]. Unter bestimmten Umständen, wie z.B. wenn die Biomasse nicht komplett mit Wasser bedeckt ist, kann es bei Temperaturen von über 200 °C auch zu Reaktionen der pyrolytischen Zersetzung kommen [48].

Produkte

Bei der HTC entsteht ein Kohleschlamm, der im Reaktor im Gemenge mit dem Reaktionswasser vorliegt sowie ein gasförmiges Gemisch [48], [50]:

- *HTC-Kohle* als ein mit Kohlenstoff angereichertes Produkt mit einer atomaren Zusammensetzung und Qualitäten, die Braunkohle ähnlich sind. Die HTC-Kohle stellt mit ca. 40 bis 50 % das Hauptprodukt der HTC dar.
- *HTC-Wasser* enthält in wässriger Lösung ein komplexes Gemisch größtenteils oxygenierter organischer Verbindungen, die summarisch als *total organic matter* (TOM) bezeichnet werden. Die wässrige Phase macht ca. 30 bis 40 % des Gesamtprodukts aus.
- *Gasphase* enthält hauptsächlich CO₂ sowie zusätzlich CO und CH₄ und Spuren von H₂ und höherwertigen, gasförmigen Kohlenwasserstoffen. Ca. 10 bis 20 % der Produkte sind gasförmig.

In der Elementarzusammensetzung ähnelt HTC-Kohle, je nach Einstellung der Prozessbedingungen, den Produkten, die bei der natürlichen Inkohlung entstehen, d.h. mit zunehmender Reaktionsschärfe hat das Produkt Ähnlichkeit mit Humus, Torf, Braunkohle und schließlich kann sogar nahezu die Zusammensetzung von Steinkohle erreicht werden. Die Ähnlichkeit in der Elementarzusammensetzung wurde auch beobachtet, wenn Biomasse eingesetzt wurde, die eine sehr gemischte Zusammensetzung aus Substanzen aufweist [45].

In Abhängigkeit von der eingesetzten Biomasse sowie der Prozessbedingungen, insbesondere Temperatur, Druck und Verweilzeit, geht ein wechselnder Anteil an organischen Verbindungen ins Prozesswasser über. Die Essigsäure hat mit Abstand den größten Anteil an Gesamtorganik im Wasser. Die Essigsäure entsteht bei der Hydrolyse, genauer bei der Abspaltung von Acetatgruppen aus den Hemicellulosen. Ebenfalls Folgeprodukte bei der Umsetzung der chemisch nicht sehr stabilen Hemicellulosen, d.h. Pentosen, sind die Furane [50]. Abhängig von der Dauer der Hydrolyse und unterstützt durch saure Bedingungen kann sich bei der Zersetzung von Cellulose auch Ameisensäure bilden, die bei Einbringung in den Boden fatale Wirkungen für Bodenorganismen haben kann. Am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und

Verpackung in Freising wurden von der flüssigen Phase Aufnahmen mit einem Massenspektrographen durchgeführt und verschiedene Verbindungen mit Hydroxy- bzw. Aminogruppen identifiziert, wobei die Aminogruppen vermutlich aus der Zersetzung von Proteinen stammen. Ebenfalls am Institut durchgeführte aerobe Abbauprobungen haben gezeigt, dass ein Teil der organischen Fracht der flüssigen Phase abgebaut werden konnte. Ein vollständiger Abbau konnte jedoch nicht erreicht werden. Zudem wurde eine deutliche Veränderung hinsichtlich Art und Zusammensetzung und schließlich das komplette Absterben der Mikroorganismen beobachtet [51].

Die *Exothermie* als charakteristische Eigenschaft des HTC-Prozesses, d.h. die Möglichkeit, mit der Herstellung von Kohle aus Biomasse auch noch Energie „zu gewinnen“ begeistert viele Wissenschaftler und Studenten. Die HTC-Forschergruppe des Max-Planck-Instituts in Potsdam benennt eine mögliche Exothermie von ca. einem Drittel des Heizwertes der Kohlenhydrate [45]. Ziel wäre es also, die während des Prozesses entstehende Wärme effektiv zu nutzen. Allerdings erscheint nach einer analytischen Betrachtung meines Betreuers Axel Funke *„eine substanzielle Gewinnung von Energie aus dem Prozess heraus als nicht wahrscheinlich“* [49].

Exogene Prozessgrößen

Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wie sich die Wahl und die Einstellung der charakteristischen Prozessgrößen auf die HTC auswirken.

Das Vorhandensein von Wasser spielt bei der HTC eine wesentliche Rolle. Wasser hat dabei die Funktion des Reaktionsmediums und Wärmeübertragers. Dabei wird bei der Hydrolyse Wasser für die Reaktion benötigt und bei der anschließenden Polykondensation wird wieder Wasser freigesetzt. Der optimale Wassergehalt bei der HTC im Hinblick auf die Produkteigenschaften ist bisher nicht bekannt. Allerdings wurde bereits erforscht, dass beim Vorhandensein von zu viel Wasser der Prozess, insbesondere die Polykondensation, gehemmt werden kann. Somit könnte eine kontinuierliche Entnahme des freigewordenen Wassers den Prozessablauf positiv beeinflussen [48].

Um den Kohleertrag bei der Verkohlung über HTC in einem Reaktor bestimmter Größe zu maximieren, sollte das Volumenverhältnis von Biomasse zu Wasser, d.h. die *Beladung*, so hoch wie möglich gewählt werden, sodass jedoch die eingesetzte Menge Biomasse stets noch mit Wasser bedeckt ist. Bei der Ermittlung der optimalen Wassermenge müssen somit sowohl die Volumenverhältnisse der Biomasse und des Wassers im gesamten Reaktionsvolumen als auch der Verbrauch bzw. die Produktion von Wasser während des Prozesses beachtet werden.

Der Zusammenhang zwischen *Temperatur* und *Verweilzeit* ist für die Prozessgestaltung sehr wichtig. Die bisher zur HTC durchgeführten Experimente zeigen, dass obwohl ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Zeit besteht, der Einfluss der

Temperatur jedoch ab einer von der Biomasse und der Partikelgröße abhängigen Schwellentemperatur überwiegt. Das Temperaturniveau, ab dem erste Reaktionen bei der HTC stattfinden, ist hauptsächlich von der Zusammensetzung der eingesetzten Biomasse abhängig. Bei cellulosehaltiger Biomasse wurden bei einer HTC mit Temperaturen unterhalb von 180 °C bisher kaum Veränderungen beobachtet [45]. An anderer Stelle wird jedoch berichtet, dass auch schon erste Reaktionen knapp über 100 °C beobachtet werden konnten [48].

Es wurde außerdem beobachtet, dass bei einer höheren Verweilzeit der erzielbare Kohlertrag steigt. Dieser Zusammenhang wird auf die langsame Reaktionsrate der Polymerisation zurückgeführt, sodass bei einer längeren Verweilzeit mehr Zeit für diese Prozessphase zur Verfügung steht, in der die festen Produkte gebildet werden [48].

Für den *Druck* gilt: je höher die Prozesstemperatur, desto höher auch der sich einstellende Prozessdruck (siehe Tabelle 4.5).

Tab. 4.5: *Thermodynamische Zusammenhänge zwischen Prozesstemperatur und Sattedampfdruck (Auszug aus der Dampftafel für Wasser [11])*

Temperatur (in °C)	Sattedampfdruck (in bar)	Temperatur (in °C)	Sattedampfdruck (in bar)
100	1,0	180	10,0
120	2,0	190	12,6
130	2,7	200	15,6
140	3,6	210	19,1
150	4,8	230	28,0
160	6,2	240	33,5

Der Prozess der HTC läuft in einem geschlossenen Druckbehälter ab, der es ermöglicht, auch bei höheren Temperaturen das Wasser im Inneren des Reaktors flüssig zu halten. Die HTC findet dabei bei Sattedampfdruck⁶ statt. Mit ansteigendem Druck respektive mit steigender Prozesstemperatur steigen auch die Anforderungen an die anlagentechnische Realisierung.

Wird der Druck zu hoch gewählt, werden die Reaktionen bei der Hydrolyse sowie der Decarboxylierung gehemmt, da die Abspaltung unter Druck erschwert wird. Dies kann sich negativ auf den erzielbaren Kohlertrag auswirken [48].

⁶Der Sattedampfdruck ist der Druck, bei dem bei einer bestimmten Temperatur Wasser sowohl flüssig als auch gasförmig in einem Raum vorhanden ist, wobei beide Zustände im Gleichgewicht sind, d.h. an der Grenzfläche zwischen dem flüssigen Wasser und der mit Wasserdampf angereicherten Luft findet netto kein mengenmäßiger Übergang von Wassermolekülen mehr statt [11].

In den frühen Jahren der HTC-Forschung wurden außerdem Versuche gemacht, in denen zusätzlich zum Sattedampfdruck auch ein mechanischer Druck auf die Biomasse bzw. die Biokohle ausgeübt wurde. Dabei konnten zwar Steigerungen im Kohleertrag beobachtet werden, jedoch wurde dieser Ansatz nicht weiter untersucht, wobei er durchaus interessant erscheint.

Der *pH-Wert* gibt die Konzentration der Protonen im Biomasse-Kohle-Wasser Gemisch an. Freie Ionen unterstützen und beschleunigen den Ablauf von chemischen Reaktionen. Wie bei der natürlichen Inkohlung sollte die Carbonisierung in einer neutralen bis schwach-sauren Umgebung stattfinden. Die Meinungen über den Einsatz von sauren oder eisenoxidreichen Produkten zur Beschleunigung des Prozesses gehen dabei auseinander. Dabei sind sich die Wissenschaftler uneinig, ob der Einsatz von Zitronensäure einen katalytischen Effekt auf die HTC hat. Die Beimischung von Säuren beeinflusst das Prozessverhalten nicht nur katalytisch, sondern ändert auch die Reaktionsbedingungen und somit den Prozessablauf [48]. Saure Bedingungen erhöhen sowohl den Kohleertrag als auch den Kohlenstoffgehalt der HTC-Kohle [47]. Hinzu kommt, dass das Kohleprodukt so ein deutlich höheres Porenvolumen und bessere hydrophile Eigenschaften aufweist [52]. Allerdings können die ablaufenden Reaktionen durch einen zu tiefen pH-Wert auch gehemmt werden. Besonders bei einer favorisierten Bodenanwendung sollte der pH-Wert während des HTC-Prozesses nicht zu tief sinken, da sonst die bodenrelevanten Eigenschaften der HTC-Kohle negativ beeinflusst werden [53].

An die Zusammensetzung der eingesetzten Biomasse werden bei der HTC prinzipiell keine besonderen Anforderungen gestellt, sodass *jede Art von Biomasse* eingesetzt werden kann. Besonders eignet sich nasse Biomasse [45], deren Verwendung außerdem den Vorteil mit sich bringt, dass kein zusätzliches Frischwasser verwendet werden muss.

Wird bei der HTC Biomasse verwendet, die wenig Lignin enthält, dafür eine Vielzahl anderer Substanzen, wird die ursprüngliche physische Struktur des Materials im Prinzip komplett aufgelöst. Die HTC-Kohle besteht aus vielen kleinen Kohlepartikeln mit einer Größe zwischen 20 und 200 Nanometern, sodass als Produkt ein feines Kohlepulver entsteht, das sich durch eine hohe spezifische Oberfläche auszeichnet [45]. Beim Einsatz von Biomasse, die viel Lignin enthält, bleibt die physische Struktur des Pflanzenmaterials weitgehend erhalten, z.B. bei Holz. Dabei wird das Gefüge „ausgehöhlt“, in dem Wasser entfernt wird. Die Masse reduziert sich um ca. 40 %, das gesamte Porenvolumen steigt und es entsteht die charakteristische Schwammstruktur der Kohle [45].

Zusammenfassung

Eine Erhöhung des Kohleertrags kann zusammenfassend durch folgende Prozessbedingungen erreicht werden:

- Haupteinfluss haben die Prozesstemperatur und die Verweilzeit
- bisher keine Hinweise zum Einfluss der Aufheizrate bei der HTC, jedoch Annahme, dass möglichst gering
- möglichst hohe Verweilzeit
- möglichst geringer Druck
- zusätzlicher mechanischer Druck
- Beladung (= Verhältnis von eingesetzter TS-Biomasse und Wasser) so hoch wie möglich
- kontinuierliche Entnahme des freigewordenen Wassers durch Dampfablassen
- Zirkulation des Prozesswassers

Eine eindeutige kritische Temperaturschwelle, ab der eine Carbonisierung stattfindet, konnte bisher nicht gefunden werden. Bergius kalkulierte mit 170 °C [39]. Experimentell wurde beobachtet, dass eine wesentliche Carbonisierung erst über 200 °C stattfindet. Je nach Zusammensetzung beginnt die Carbonisierung auch schon bei geringeren Temperaturen, wobei diese nicht zu einer vollständigen Carbonisierung der Biomasse führen. Die für das Eintreten der chemischen Reaktionen zur Aromatisierung notwendigen Temperaturen liegen deutlich höher [47]. Deshalb weist HTC-Kohle auch nur teilweise den für fossile Kohle typischen Aufbau aus dreidimensional vernetzten Aromaten auf.

Typische Bereiche der Prozessgrößen der HTC sind [45], [47], [48]:

- Temperatur: 180 bis 220 °C
- Verweilzeit (nach Aufheizung): zwischen 1 und 72 Stunden
- Sattdampfdruck (temperaturabhängig): zwischen 10 und 16 bar
- Gegenwart von Wasser
- pH-Wert unter 7 (mit sinkendem Wert über die Prozessdauer)
- Wichtigste Prozessphasen: Dehydratation und Decarboxylierung zur Senkung des O- und H-Gehaltes sowie Aromatisierung und Polymerisation zum Aufbau der Kohlestruktur

Die HTC-Kohle zeichnet sich zusammengefasst durch folgende Eigenschaften aus [45], [47], [48], [53]:

- H/C-Verhältnis von 0,6 bis 1 und O/C-Verhältnis zwischen 0,15 und 0,25.

- Chemische Struktur ist ähnlich der von Braunkohle, wobei HTC-Kohle über eine größere Anzahl funktioneller Gruppen verfügt.
- hohe Porosität durch Mesoporen
- amorph
- hohe Stabilität der Kohlenstoffbindungen
- geringe Partikelgröße
- hohe Wasserspeicherkapazität
- (wahrscheinlich) hydrophil

Anlagentechnische Umsetzung

Wie auch die Pyrolyse kann die HTC in einem einzelnen oder mehreren quasi-kontinuierlich laufenden Batch-Reaktoren (siehe Abbildung 4.13) und in kontinuierlich betriebenen Anlagen realisiert werden. Tabelle 4.6 zeigt einen Überblick über die technischen Anlagenprinzipien des HTC-Verfahrens anhand einiger wichtiger Eigenschaften.

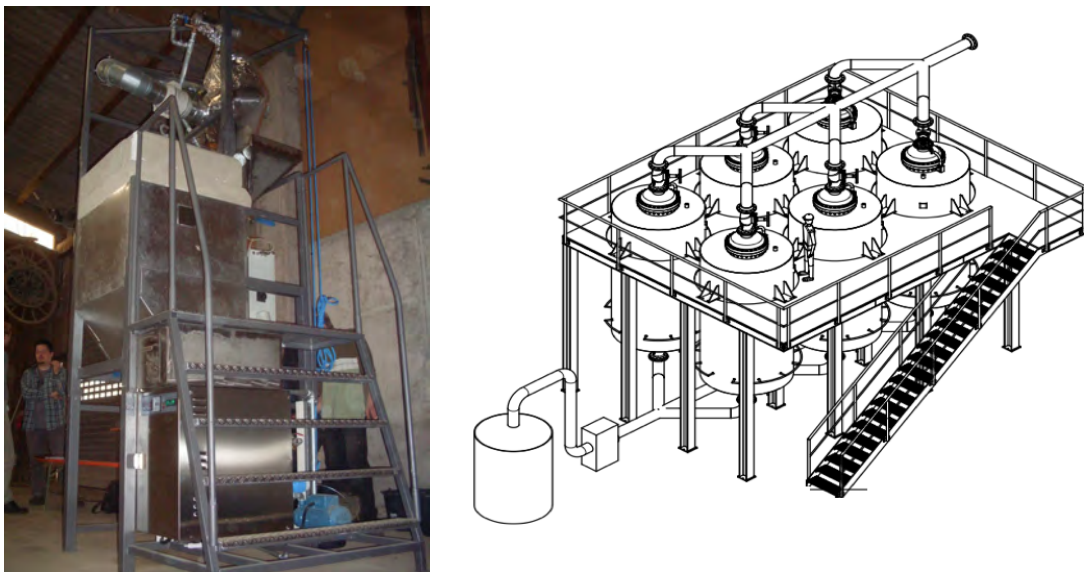


Abb. 4.13: HTC-Batch-Reaktor (links) und Entwurf einer quasi-kontinuierlichen HTC-Anlage (rechts) [9]

Lösungen für das Hauptproblem des kontinuierlichen Betriebs, der automatischen Förderung der Biomasse in den Reaktor während des Betriebs, d.h. bei erhöhter Temperatur und Druck, sind folgende:

- Herstellung einer Mischung aus Biomasse in Wasser mit sehr hohem Wasseranteil (fast 100 %), die gepumpt und mit einem Sprühkopf in den Reaktor eingebracht werden kann [54].

- Einsatz quasi-kontinuierlicher Schleusensysteme, d.h. die Biomasse wird Schritt für Schritt über mehrere Schleusen, in denen ein jeweils höherer Druck herrscht, in den Reaktor befördert.

Durch den Reaktor kann das Substrat z.B. mit einer Schneckenförderung geleitet werden. Der Austritt aus dem Reaktor wird ebenfalls über eine Schleusenanordnung am Auslassrohr gestaltet [54]. Die anlagentechnische Umsetzung dieser Verfahrensweisen erwies sich jedoch bisher als problematisch.

Im Vergleich zur Pyrolyse müssen bei der HTC neben der eingesetzten Biomassemenge auch größere Mengen Wasser auf eine erhöhte Temperatur gebracht werden. Allerdings entfällt die bereitzustellende Wärme zum Verdampfen des Restwassers in der Biomasse (die sog. „Verdampfungsenthalpie“) und das Temperaturniveau ist deutlich geringer. Kernproblem bei der Bereitstellung der Wärmeenergie im Reaktor sowie bei der Nutzung der Abwärme ist die Bildung von Ablagerungen an den Kontaktflächen der Wärmetauscher (bei indirekten Systemen) sowie in den Rohrleitungen (bei direkten Systemen) und der damit verbundene deutlich erhöhte Wartungsaufwand. Die Ablagerung bilden sich vor allem im Temperaturbereich zwischen 100 und 120 °C.

Eine Konstruktion, welche die Zirkulation des Prozesswassers beinhaltet, verspricht Vorteile, da somit auch die im Prozesswasser nach Beendigung des Prozesses noch enthaltene Wärmemenge genutzt werden kann. Außerdem erhöht sich so die absolute Verweilzeit der TOC, sodass diese evtl. nach Ablauf mehrerer Prozesszyklen auch noch zu Kohle polymerisiert werden kann [47].

Tab. 4.6: Vergleich der HTC-Verfahren nach technischen Anlagenprinzipien

Betriebsweise	Batch bzw. quasi-kontinuierlich	kontinuierlich
Entwicklungsstand	Demonstrationsanlage	haupts. Pilotanlagen, auch industrielle Anlage
Technologisierungsgang	niedrig	mittel bis hoch
Bedienung (Handhabungsweise)	manuell oder (teil-)automatisch	automatisiert
Anforderungen an Prozesstechnik	Druckbehälter, Wärmerückgewinnung	Druckbehälter, Förderung der Biomasse während Betrieb gegen Druck (d.h. Pumpen oder Druckschleuse erforderlich), Wärmerückgewinnung
Energieeffizienz	hoch	hoch
Deckung Energiebedarf	Einblasen von Wasserdampf aus Druckkessel, elektrische Heizung, Abwärmenutzung parallel betriebener Reaktoren	Wasserdampf aus Druckkessel
Kernproblem	hoher Aufwand für Be- und Entladung	Förderung gegen Druck
Vorteile	einfache Prozessführung	erreichbarer Durchsatz, d.h. produzierte Kohlemenge pro Zeit (wird vglw. höher angenommen)
Nachteile	Ablagerung an Wärmetauscherflächen	Förderung in Reaktor gegen Betriebsdruck, Investitionskosten, Ablagerungen an Wärmetauscherflächen

Machbarkeitsbetrachtung

Die folgende Machbarkeitsbetrachtung orientiert sich an den von der *International Biochar Initiative* (IBI)¹ erarbeiteten „Allgemein anerkannten Regeln der Technik“ zur Entwicklung und Erprobung von Verkohlungsstechniken. Die IBI betont darin ausdrücklich die Notwendigkeit für die Entwicklung „innovativer Techniken in allen Baugrößen“ da die traditionelle Biochar-Produktion per Pyrolyse mit starken Belastungen für Mensch und Umwelt verbunden ist. Explizit fordert die IBI eine „angepasste Produktion von Biochar für die stoffliche Verwendung im Boden“ [40].

Eine *angepasste* Produktion erfolgt durch die Anpassung der Technik sowohl an die lokal gegebenen Möglichkeiten und Grenzen als auch zur Beeinflussung der Eigenschaften der Biokohle hinsichtlich ihrer Eignung als Bodenverbesserer. Dieser Ansatz wurde auch in diesem Vorhaben gewählt. Dabei soll nun in einer ersten Phase die Machbarkeit der Anpassung der HTC-Technik an die lokalen Gegebenheiten geprüft werden und die konkrete Fragestellung, die dieser Machbarkeitsbetrachtung zu Grunde liegt ist:

Was gilt es für eine technische Realisierung von HTC zu beachten und erscheint diese unter gegebenen Umständen in Tansania machbar?

Um eine Aussage über die Machbarkeit der HTC in Tansania treffen zu können, werden die *technischen Anforderungen*, die sich aus dem Stand der Technik der HTC ergeben, den *Möglichkeiten und Grenzen* aus der Betrachtung des Umfeldes gegenübergestellt.

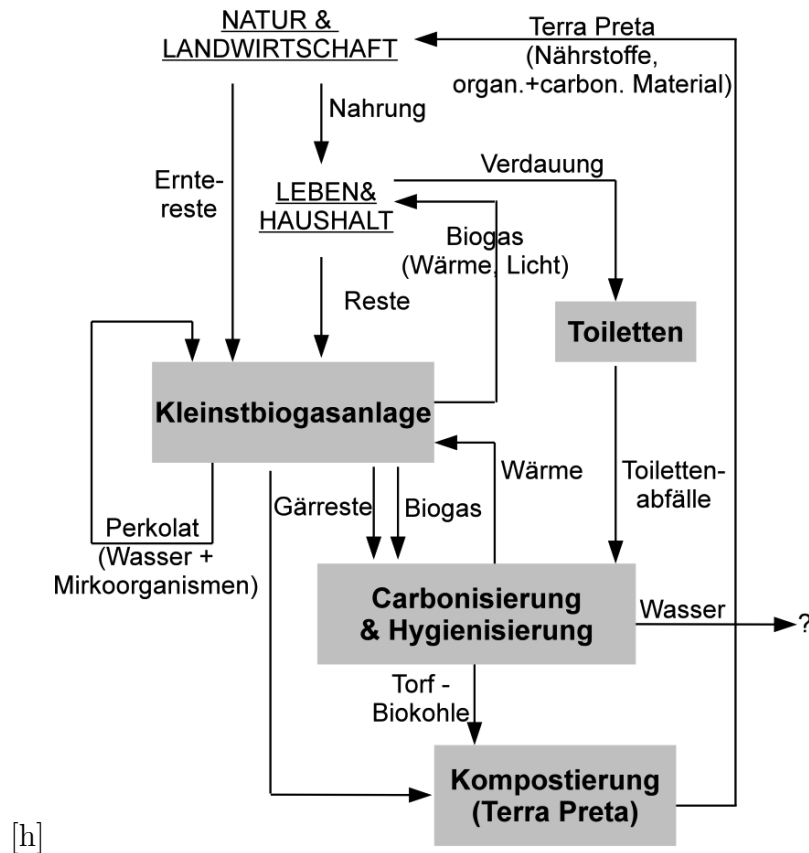
Um die vor Ort gegebenen Möglichkeiten und technischen Umsetzungshindernisse konkretisieren zu können wurde parallel zu dieser Arbeit im April 2010 eine Erkundungsreise nach Tansania gemacht².

¹Die IBI wurde 2006 im Rahmen des „World Soil Science Congress“ als Non-Profit-Organisation mit Sitz in Philadelphia, USA, gegründet. Den Vorsitz hält Johannes Lehmann [55].

²Die praktische Machbarkeitsbetrachtung, insbesondere die Erkundungsreise und der Bau eines HTC-Testmodells, sind von der Heidehof Stiftung GmbH, Stuttgart, unter dem Projekttitel

5.1 Beschreibung des betrachteten Systems

Die Machbarkeitsbetrachtung bezieht sich auf das folgende System:



[h]

Abb. 5.1: Kopplung von Biogaserzeugung und Carbonisierung durch die Nutzung von organischen Reststoffen in Tansania

Außerdem wurden folgende *Randbedingungen* festgelegt:

- Zielgruppe: lokale Bevölkerung einer ländlichen Region in Kagera, Tansania
- Kopplung mit BiogaST-Projekt → Verwendung der Gärreste
- Nährstoffrückführung und Verbesserung der sanitären Situation angestrebt → Verwendung der Toilettenabfälle

Nach dem letzten durchgeführten Zensus von 2002 haben in der Region Kagera 5 % der ländlichen Bevölkerung gar keine Toilette; im Distrikt Karagwe sind es sogar 10 %. Über 90 % der Haushalte in Kagera haben in Hausnähe eine einfaches Hock-Klo mit einem Loch darunter [12]. Menschliche Exkrememente werden somit als Abfall unkontrolliert in der Landschaft verteilt bzw. in der Erde deponiert³. Der Prozess

„Ressourcenschutz und nachhaltige Nahrungsproduktion kleinbäuerlicher Betriebe in Afrika durch Kopplung von Biogasproduktion und hydrothormaler Carbonisierung“ gefördert.

³Aus diesem Grund wurde hier die Bezeichnung *Toilettenabfälle* gewählt. Üblich ist auch die Verwendung der englischen Bezeichnung *humanure*.

der Carbonisierung läuft bei Temperaturen über 120 °C ab, was bedeutet, dass das eingesetzte Material bei einer entsprechenden Verweildauer hygienisiert wird. Unter diesem Aspekt ist es nun anstrengenswert, die menschlichen Toilettenabfälle durch eine Carbonisierung für eine Weiterverwendung der darin enthaltenen Nährstoffe aufzuwerten.

5.2 Betrachtung der HTC-Technik: Technische Anforderungen

Die Betrachtungen des Stands der Technik der HTC können wie folgt gegliedert werden:

- Anforderungen an Anlagendesign und -aufbau
- Anforderungen an zu verwendende Baumaterialien und Betriebsstoffe
- Anforderungen zur Deckung des Energiebedarfs

Anforderungen an Anlagendesign und -aufbau

Eine technische Realisierung der HTC erfordert prinzipiell folgende Systemkomponenten:

- Aufbereitung der Biomasse vor dem Prozess, z.B. Mischtank oder Substratvorwärmung
- Substratförderung, zur Beschickung der HTC-Anlage mit den Gärresten und den Toilettenabfällen sowie zur Entnahme der HTC-Produkte
- Reaktor: Druckbehälter
- Wärmebereitstellung: Dampfkessel, solarthermisch (Kollektor), Parabolspiegel/oder -rinne
- Wärmeträgermedium: Wasser (flüssig und dampfförmig), Öl, Heat-Pipe
- Wärmeleitungen: Wasser-, Dampfleitungen, Rohre
- Wärmeübertragung: direkt über „Einblasen“ von Wasserdampf oder indirekt per Wärmetauscher oder Heat-Pipe
- Prozesswasserrecycling
- Abwärmenutzung: Leitungen, Wärmetauscher
- Einrichtung zur (mechanischen) Trocknung des Kohleschlammes
- Ventile und Sicherheitsventil

Je nach Wahl der Betriebsweise (Batch-Betrieb oder kontinuierlicher Betrieb) kommen noch Komponenten zur Einschleusung bzw. zum Einspritzen des Substrats in den Reaktor unter Betriebsdruck hinzu. Hinsichtlich der Energieeffizienz sowie

der potentiellen Kohleausbeute sind keine bedeutenden Unterschiede abhängig vom Anlagendesign bekannt. In der Praxis hat sich jedoch bisher die Batch-Anlage als deutlich einfach realisierbar sowie zuverlässiger im Betrieb erwiesen. Bei einem kontinuierlichem Betrieb erfordern beide Varianten zur Förderung des Materials gegen Druck den Einsatz von elektrischem Strom; die erste Variante erfordert zudem große Mengen Wasser.

Als Reaktionsraum der HTC, muss ein Druckbehälter gefertigt werden. Daraus ergeben sich sowohl Anforderungen an die zu verwendenden Materialien als auch an den Ausbildungsgrad des Betriebspersonals. Während die Pyrolyse meist von angelegerten Arbeitern durchgeführt werden kann, erfordert der Umgang mit einem erhöhten Betriebsdruck eine spezielle Ausbildung des Personals.

Anforderungen an zu verwendenden Baumaterialien und Betriebsstoffe

Die Wahl der exogenen Prozessparameter bestimmt die thermischen und korrosiven Belastungen der Anlagentechnik und somit die Anforderungen, die an die zu verwendenden Baumaterialien und Betriebsstoffe gestellt werden. Aufgrund der hydrothermalen Bedingungen und den mechanischen Belastungen durch den Betriebsdruck im Reaktorinneren ist die Verwendung von Edelstahl Stand der Technik.

Der Wasserbedarf der HTC ist gering, wobei u.U. beim Einsatz nasser Biomasse ganz auf die zusätzliche Zufuhr von Wasser verzichtet werden kann.

Die potentielle „Gewinnung“ von Wasser aus dem Prozess heraus ist noch nicht geklärt, da zum jetzigen Stand der Forschung noch keine konkrete Aussage über die Qualität des Wassers sowie dessen Weiterverwendungsmöglichkeiten getroffen werden kann.

Anforderungen zur Deckung des Energiebedarfs

Der Energiebedarf der HTC setzt sich zusammen aus:

- Wärme zur Aufwärmung von Biomasse, Wasser, Reaktor und anderen Komponenten
- Wärme zum Aufrechterhalten des Prozesses, d.h. zum Ausgleich der Wärmeverluste
- elektrischer Strom z.B. für die Prozessführung bzw. -regelung, Kesselpumpe, Messanalytik, Substratförderung

Zur Wärmebereitstellung kommen prinzipiell folgende anlagentechnischen Möglichkeiten in Frage:

- direkte Beheizung mit Dampf
- indirekte Beheizung über Wärmetauscher
- elektrische Beheizung durch Heizplatte, -mantel oder -stab
- einstufig vs. mehrstufig (d.h. mit Vorwärmung und stufenweiser Aufwärmung)
- Art der Energiedeckung: solar, elektrisch, fossil befeuert, Biogasverbrennung
- Zirkulation des Prozesswassers

Bei der direkten Beheizung mit Dampf, wird dieser in einem Kessel erzeugt und in den Reaktor geführt. Diese Variante erfordert die Verwendung eines Dampfkessel und einen erhöhten Druck im gesamten System.

Bei einer anlagentechnischen Realisierung sollte die Nutzung der entstehenden Abwärme integriert werden. Abwärme fällt bei der HTC an, wenn ggf. während dem Prozessablauf zur Senkung des Wassergehaltes im Reaktor Wasserdampf entlassen wird bzw. wenn der exotherme Bereich erreicht wird. Nach Beendigung des Prozesses steht außerdem die noch im Produktschlamm enthaltene Wärme zur Verfügung.

Da der Energiebedarf für die Erwärmung von Wasser einen großen Anteil des gesamten Energiebedarfs der Aufheizphase ausmacht, sollte das Verhältnis von Biomasse zu Wasser möglichst hoch sein.

Zusammenfassung der technischen Anforderungen

Aus den Betrachtungen des HTC-Prozesses und dem Stand der Technik ergeben sich zusammengefasst folgende Anforderungen an eine technische Realisierung:

- Wasserbedarf: bei der Verwendung von Biomasse mit geringem Wassergehalt und bei Realisierung eines kontinuierlichen Betriebs, wofür das Substrat durch zusätzliche Wasserzugaben pumpfähig gemacht werden muss
- keine Anforderungen an das zu verwendende Substrat
- Strombedarf für (teil-)automatische Prozessführung, Pumpen
- Fertigung eines Druckbehälters: gemäß Stand der Technik aus Edelstahl
- Erarbeitung eines detaillierten energietechnischen Konzepts der Wärmebereitstellung
- bei direkter Beheizung mit Dampf: Kessel muss Betriebsdruck der HTC erfüllen, Leitungen ebenso
- Integration einer technischen Abwärmenutzung
- bei Anlagendesign mit kontinuierlichem Betrieb: hoher Aufwand für Förderung gegen Druck
- Isolation erforderlich um Wärmebedarf zu senken
- Umgang mit hohem Druck erfordert Ausbildung und Schulung der Anlagenbetreiber

5.3 Umfeldbetrachtung: Möglichkeiten und Grenzen vor Ort

Die Betrachtung der vor Ort gegebenen Möglichkeiten und Grenzen ist wie folgt gegliedert:

- Möglichkeiten und Grenzen bei den zur Verfügung stehenden Substraten
- Möglichkeiten und Grenzen bei den zur Verfügung stehenden Baumaterialien und Betriebsstoffe
- Möglichkeiten und Grenzen durch die gegebene Infrastruktur

Möglichkeiten und Grenzen bei den zur Verfügung stehenden Substraten

Ziel der Einführung der Biogastechnik in Kagera im Rahmen des Projektes „BiogaST“ ist die Bereitstellung eines Substitutes für die alltägliche Energieerzeugung. Bisher wird in Kagera die Energie zum Kochen von 95 % der Bevölkerung durch das Verbrennen von Holz gedeckt. Der damit einhergehende hohe Bedarf an Feuerholz hat folgende negativen Folgen:

- Abrodung der Wälder
- Kinder müssen weite Wege gehen um noch Feuerholz zu suchen und es bleibt wenig Zeit für Schule und Bildung
- Probleme mit Bodenerosion nehmen zu
- damit einhergehende fortschreitende Bedrohung der Wüstenausbreitung und Abnahme der Bodenfruchtbarkeit

Hinzu kommt der Ressourcenverbrauch zur traditionellen Holzkohleherstellung.

Ein wichtiges Ziel ist die Schonung der wenigen noch existierenden Bäume um eine Wiederaufforstung möglich zu machen. Aus diesem Grund wird ein neuer Ansatz verfolgt, der die Verwendung folgender Substrate beinhaltet:

- Gärreste aus der Fermentation von Ernteresten
- Toilettenabfälle

Die Verwendung von Gärresten aus Ernteresten zusammen mit Toilettenabfällen erfüllt die Bedingungen einer nachhaltigen Bereitstellung der bei der Verkohlung eingesetzten Biomasse, da es sich ausschließlich um Abfallprodukte handelt und keine landwirtschaftliche Fläche zur Produktion der Substrate notwendig ist [40]. Durch die Umwandlung der Toilettenabfälle wird außerdem die Möglichkeit geschaffen, die darin enthaltenen Nährstoffe wieder auf die Felder zurückzubringen, sodass kein Einsatz künstlicher Düngemittel nötig ist.

Als Substratzugaben mit potentieller katalytischer Wirkung auf den Prozess stehen bspw. Ananasschalen (gestampft mit einem gemessenen pH-Wert des Fruchtwassers von 3,3) oder eisenoxidreiche Erde zur Verfügung.

Klimatisch bedingt ist das Wasserangebot in der Region sehr gering und die Bedrohung einer Wasserknappheit zunimmt.

Möglichkeiten und Grenzen bei den zur Verfügung stehenden Baumaterialien und Betriebsstoffen

Zur Verfügung stehende Baumaterialien sind:

- Baustoffe: Zement, Lehm, Tonziegelsteine, Steine, Kies, Sand
- Metall: Stahlblech, Weißblech, Bewehrungsstahl (Rippenstahl und Q-Gitter, Binding Wire), Aluminiumblech und -töpfe, Hasendraht
- Ventile, Kugelventile
- Plastikrohre (Kaltwasser und Warmwasser), Kupferrohre
- Bitumen, Bautenschutzmatten

Edelstahl ist ausschließlich in der Hauptstadt Dar Es Salam und meist nur in schlechter Qualität erhältlich. Edelstahl wird auf Bestellung aus China importiert und ist sehr teuer.

Im Rahmen der durchgeführten Reise nach Tansania wurde außerdem in Erfahrung gebracht, ob für den erforderlichen Druckbehälter alte U-Boote, Gastanks oder andere Druckbehälter zur Verfügung stehen, die zu einem HTC-Reaktor „umgebaut“ werden könnten. Allerdings konnten in der Region nur einige ausgediente Kessel zur Energiebereitstellung sowie ein alter Kessel einer Dampflokomotive ausgemacht werden. In größerer Anzahl und zu bezahlbarem Preis stehen alte Ölfässer zur Verfügung.

Solarthermische Module zur Erwärmung von Wasser sind im Handel erhältlich und in der Lage Wasser auf ca. 80 °C zu erwärmen.

Möglichkeiten und Grenzen durch die gegebene Infrastruktur

Charakteristik der gegebenen Infrastruktur:

- Häuser stehen einzeln und verteilt
- Häuser haben meist kein Straßenzugang „Trampelpfade“ verbinden Häuser mit der Straße und untereinander
- nur wenig Transportmittel, z.B. Auto oder Pick-Up; meist nur Fahrrad

- begrenzter Zugang zur Stromversorgung
- keine zuverlässige Stromversorgung

In der Region Kagera, und vor allem im Distrikt Karagwe ist für die ländliche Bevölkerung der Zugang zu einer elektrischen Stromversorgung nur sehr selten möglich, da der technische Anschluss sehr teuer ist. Weniger als 1 % der Bevölkerung verfügen über einen Anschluss an das Stromnetz [12]. Wo vorhanden, kann es täglich mehrere Unterbrechungen der Stromversorgung geben.

Zusammenfassung der Möglichkeiten und Grenzen

Möglichkeiten und Grenzen, die aus der Betrachtung des Umfelds abgeleitet werden können, sind zusammengefasst:

- dringende Notwendigkeit Holzressourcen zu schonen
- Verwendung organischer Reststoffe
- saure Substratzugaben möglich durch Verwendung von Resten, z.B. sauren Ananasschalen
- Als Baumaterialien stehen einfache Materialien wie z.B. Beton, Wasserleitungen, Bewehrungsstahl und Ventile zur Verfügung.
- Sicherheitsventil muss u.U. importiert werden.
- Edelstahl ist teuer und muss importiert werden.
- knappes Wasserangebot
- begrenzte Infrastruktur (Stromversorgung, Straßenzugang, Transportmittel)

5.4 Synthese

Im Folgenden werden die genannten technischen Anforderungen den Grenzen und Möglichkeiten, die vor Ort gegeben sind, gegenübergestellt und daraus resultierende Schlüsse gezogen.

Die Synthese der Machbarkeitsbetrachtung bezieht sich auf die folgenden Bereiche:

- Auswahl des Anlagendesigns mit Komponenten
- Auswahl potentieller Baumaterialien und Betriebsstoffe
- Deckung des Energiebedarfs

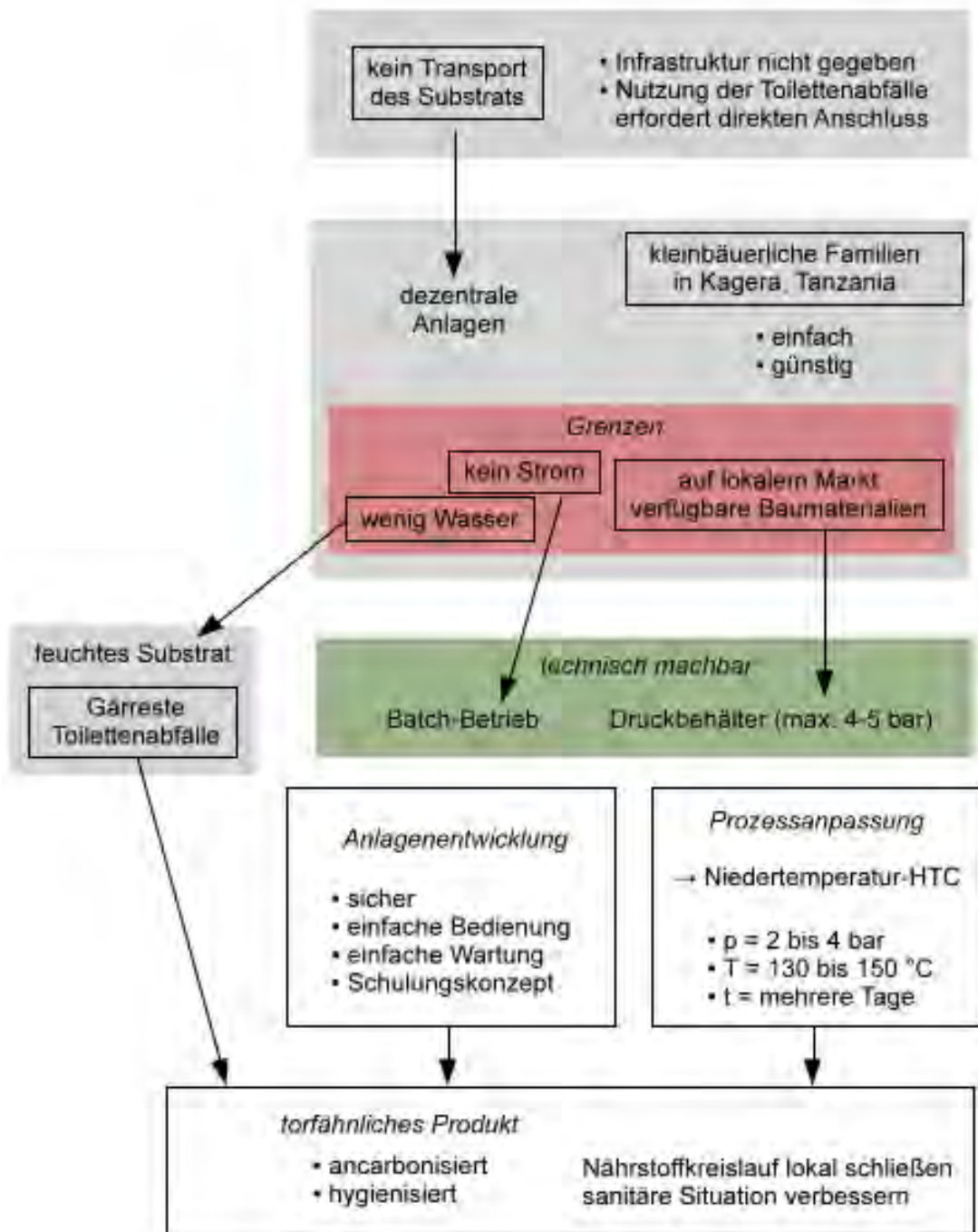


Abb. 5.2: Systematische Darstellung der Machbarkeitsbetrachtungen (eigene Darstellung)

Auswahl des Anlagendesigns mit Komponenten

Zunächst wird das Anlagendesign auf einen *Batch-Betrieb* festgelegt. Eine Anlage im kontinuierlichen Betrieb scheint unter den Bedingungen in Tansania nicht realisierbar und bietet außerdem keinen wesentlichen Vorteil. Dabei kann der Reaktor manuell (d.h. händisch oder durch eine einfache mechanische Einrichtung wie z.B. einem Flaschenzug) zur Beschickung sowie Kohleschlammabnahme geöffnet und wieder verschlossen werden.

Zur Einschleusung der Fäkalien ist eine technische Möglichkeit der Substratförderung erforderlich, bei der jeder Kontakt mit dem Substrat vermieden wird. Eine Möglichkeit wäre z.B. Höhenunterschiede auszunutzen und unterhalb der Toiletten einen Tank zur Zwischenspeicherung zu verwenden. Dieser kann dann vor der Carbonisierung z.B. mit einem Schubboden geöffnet werden und das Substrat gelangt durch Fallrohre und Nutzung der Schwerkraft in den noch tiefer gelegenen Reaktor.

Problematisch ist vor allem die technische Realisierung des erforderlichen Druckbehälters. Da die Verwendung von Edelstahl ausgeschlossen wird, muss eine andere Möglichkeit gefunden werden, einen Druckreaktor mit den gegebenen Bedingungen zu bauen.

Das Prinzip die Anlage unterirdisch zu bauen und die stabile Einbettung in der Erde zur Druckaufnahme zu nutzen, ist interessant. Das Fraunhofer-Institut in Freising plant den Beginn eines Projekts zur Entwicklung einer solchen Technik für ärmere Länder, dem sog. „Deep Shaft“-Verfahren.

Experimentell überprüfenswert ist außerdem die Annahme, dass eine Verdichtung der Biomasse den Prozess beschleunigen kann, z.B. indem Steine auf die Gärreste im Reaktor gelegt werden. Zur Verfügung stehen Tonziegelsteine, die in der Region einfach und günstig selbst produziert werden. Es wird angenommen, dass die Verwendung von Mineral-Ton-Komplexen eine zusätzliche positive Wirkung auf die Carbonisierung bzw. die Produkteigenschaften haben kann.

Die Variante einer zentralen Anlage (mit Import eines Edelstahldruckreaktors) verlangt, dass entweder der Reaktor zu den Häusern der Familien oder die Gärreste bzw. Toilettenabfälle in Behältern gesammelt und zu einem zentralen Anlagenstandort transportiert werden müssen. Aufgrund der schlechten Infrastruktur mit einem Mangel an zur Verfügung stehenden Transportmitteln und Straßenzugang der meisten Häuser, wird diese Idee jedoch ausgeschlossen. Diese Variante würde die Verwertung der Toilettenabfälle ausschließen, da diese nur direkt und ohne Transport verwendet werden sollen.

Aus dem Einsatz der Toilettenabfälle ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Anlagentechnik, da bei der Substratförderung stets der Kontakt zwischen Substrat

und Menschen vermieden werden muss. Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Toilettenabfälle auf den HTC-Prozess kann nicht theoretisch abgeschätzt werden sondern muss experimentell ermittelt werden. Zur gemeinsamen Verarbeitung von Gärresten und Toilettenabfällen per HTC gibt es bisher keine Erfahrungen.

Auswahl potentieller Baumaterialien und Betriebsstoffe

Die Anwendung der HTC-Technik erfordert den Bau eines Druckbehälters. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Materialien ist eine Realisierung der HTC-Technik auf low-tech Ebene nötig. Eine Möglichkeit wäre z.B. die Verwendung von Beton. Dabei gilt allerdings zu beachten, dass Beton zwar hoch druckfest ist, jedoch sehr schlechte Eigenschaften aufweist Zugkräfte aufzunehmen. Wegen des erhöhten Betriebsdrucks sollte eine Konstruktion aus Stahlbeton gefertigt werden, sodass der Bewehrungsstahl die wirkenden Zugkräfte aufnehmen kann und Rissbildung bzw. Zerbröckeln des Betons vermieden wird. Als Reaktionsraum kann z.B. ein Aluminiumtopf verwendet werden. Diese Töpfe sind auf dem Markt bis zu einem Durchmesser von über einem Meter erhältlich. Allerdings sollte ermittelt werden, ob das Material des Topfes den Prozess bzw. die Produktqualität beeinflusst.

Es wird erwartet, dass es mit einer solchen Konstruktion möglich ist, einen Reaktordruck im Bereich zwischen 2 und 4 bar Überdruck zu realisieren. Eine genaue Dimensionierung und die praktische Überprüfung stehen jedoch noch aus.

Die Möglichkeit, alte Aggregate zu einem geeigneten Druckbehälter umzubauen, wird ausgeschlossen, da diese nur sehr begrenzt und somit für eine Realisierung im kleinen, dezentralen Maßstab mit hoher Stückzahl nicht ausreichend sind.

Energiebedarf

Zur Umsetzung der HTC-Technik in Kagera ist es notwendig, ein genaues Konzept zur Bereitstellung der notwendigen Wärmeenergie zu erarbeiten. Dabei sollte zur Wärmebereitstellung hauptsächlich die Energie der Sonne genutzt und einfache Komponenten eingesetzt werden. Darüberhinaus kann der Energiebedarf durch Verbrennen von Biogas gedeckt werden.

Die Nutzung der Abwärme könnte z.B. durch Wärmeabgabe an die Biogasanlage umgesetzt werden. Es wird erwartet, dass die Biogasproduktion durch die zugeführte Wärme erhöht wird und so der Biogasertrag steigt. Die Abwärme kann dabei durch Wasser oder Dampf in einem Schlauch, der durch die Bodenplatte der Biogasanlage geführt wird, an diese abgegeben werden. Der zu erwartende Mehrertrag an Biogas kann genutzt werden, um durch Verbrennung zusätzlich Wärme zum Aufheizen des Reaktors bereitzustellen.

Eine technische Realisierung der HTC muss unter den gegebenen Bedingungen ohne Strom auskommen. Dies erfordert ein System ohne Pumpen, sodass ein Thermo-Syphon-Kreislauf realisiert werden sollte.

Erfordernisse

Eine Realisierung der HTC in Tansania erfordert:

- Eine low-tech Realisierung da hochwertige Materialien und Baustoffe in Tansania sehr knapp und teuer sind bzw. extra importiert werden müssen und somit für eine breite, dezentrale Anwendung nicht weiter in Frage kommen.
- Gewährleistung, dass durch den erhöhten Betriebsdruck der HTC kein Risiko für die Anlagenbetreiber sowie Menschen in der Umgebung entsteht.
- Kompromisse bei der Beschaffung der Materialien über den lokalen Markt hinaus, z.B. Überdruckventil
- alternative Bauweisen eines Druckbehälter mit lokalen Baumaterialien
- Anpassung der Prozessgrößen der HTC (geringerer Druck, geringere Temperatur, längere Verweilzeit) und experimentelle Überprüfung der Auswirkungen auf das Produkt
- Intensive Ausbildung und Schulung von Personen, die für den Betrieb und die Wartung der Anlage spezialisiert werden.

Schlußfolgerung & Handlungsempfehlungen

6.1 Machbarkeitsaussage

Eine technische Realisierung der HTC nach dem Stand der Technik ist in Tansania nicht umsetzbar.

Kernproblem ist, dass es mit den gegebenen Mitteln nicht möglich ist, einen Druckbehälter zu fertigen, der die Belastungen durch den erhöhten Druck (über 10 bar) und die hydrothermalen Bedingungen langfristig und ohne Sicherheitsrisiko möglich macht.

Die Betrachtungen und Erfahrungen der Möglichkeiten und Grenzen vor Ort, lassen es jedoch möglich erscheinen, mit den gegebenen Mitteln eine Konstruktion zu realisieren, die einen Betriebsdruck bis 3 oder 4 bar möglich macht.

Dies führt über eine *Prozessanpassung* zu einem Prozess, der unter hydrothermalen Bedingungen, bei leichtem Überdruck, niedriger Temperatur und hoher Verweilzeit stattfindet.

Die technische Realisierung einer „Niedertemperatur-HTC“ scheint unter den gegebenen Bedingungen machbar.

Es wird erwartet, dass durch den Prozess ein torfähnliches Produkt entsteht. Die eingesetzte Biomasse wird dabei ancarbonisiert und hygienisiert.

Durch eine Realisierung der Niedertemperatur HTC kann das Ziel, einen Beitrag zur Schließung der lokalen Nährstoffkreisläufe zu leisten, erreicht werden. Außerdem kann durch eine Verwertung der Toilettenabfälle die sanitäre Situation in der Region erheblich verbessert werden. Allerdings führt die Technik nicht zu einer Produktion von Biokohle, die nach dem Terra Preta Prinzip verwendet werden kann.

6.2 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Der identifizierte weitere Forschungsbedarf bezieht sich auf folgende Bereich:

- Prozessanpassung
- Anlagenentwicklung
- Ökologische Forschung

Prozessanpassung

Zunächst sollte eine experimentell gestützte Anpassung des HTC-Prozesses erfolgen. Durch den realisierbaren aber geringeren Druck ändert sich auch das Temperaturniveau des Prozesses. Die niedrigere Prozesstemperatur kann dabei teilweise durch eine Verlängerung der Verweilzeit ausgeglichen werden. In Versuchen mit dem Autoklaven sollten die Zusammenhänge dieser Prozessparameter und die Auswirkungen der „Niedertemperatur-HTC“ auf das Produkt untersucht werden.

Im betrachteten System ist der Einsatz von bereits fermentierten Gärresten zusammen mit Toilettenabfällen angestrebt. Da die genauen chemischen Reaktionen der HTC noch weitgehend unbekannt sind und stark von der Zusammensetzung der eingesetzten Biomasse sowie den gewählten Prozessbedingungen bestimmt werden, kann eine genaue Aussage über die Veränderung der Biomasse nur experimentell erforscht, jedoch nicht theoretisch hergeleitet werden.

Um abschätzen zu können, wie sich das einzusetzende Substratgemisch bei der Niedertemperatur-HTC verhalten wird bzw. welche Produkte dabei entstehen werden (hinsichtlich Art, Anteil und Zusammensetzung), muss zunächst soweit möglich eine Analyse der Edukte stattfinden. Anschließend sollten mit diesen Substraten getrennt und gemeinsam Experimente durchgeführt werden und die Produkte ebenfalls analysiert werden. Diese Versuche sollten im Laborautoklaven durchgeführt werden.

Der positive Einfluss durch das Aufbringen eines zusätzlichen Drucks sollte experimentell erforscht werden. Interessant erscheint dabei der Ansatz wie er bei der Herstellung von Sauerkraut angewandt wird, in dem auf die Biomasse im Reaktor Steine gelegt werden.

Zur Analyse und wissenschaftlichen Vergleichbarkeit sollten bei den Experimenten folgende Daten erfasst werden [5], [10], [40], [49]:

- Menge, Wassergehalt und Elementarzusammensetzung (inkl. Aschegehalt) der Trockenmasse der eingesetzten Biomassen
- Bestimmung der Partikelgröße des eingesetzten Materials

- zugeführte Wassermenge
- Aufnahme der wichtigsten Prozessgrößen über gesamte Zeit des Experiments, z.B. Temperatur, Druck, Aufheizzeit, Energieverbrauch
- Elementaranalyse der HTC-Kohle (Hauptelementen C, O und H und wichtigste Nährstoffe wie z.B. N, P, K und S)
- Ermittlung der Elementarverhältnisse O/C, H/C, C/N
- Menge, Volumen und Zusammensetzung der Gasprodukte
- Menge des im Wasser gelösten CO₂
- Menge und Zusammensetzung (inkl. TOC-Gehalt) des Prozesswassers
- Messung der Emissionen durch Leckagen
- verwendete Messmethoden

Aus den erfassten Daten können schließlich vergleichbare Berechnung aufgestellt werden wie z.B. eine ausführliche Massen- und Energiebilanz sowie eine Ökobilanz zur Erfassung der Wirkung im Bezug auf den Klimawandel.

Anlagenentwicklung

Für die weitere Anlagenentwicklung muss eine detaillierte Liste aller anlagentechnischen Systemkomponenten, deren Aufgaben und Fertigungsmöglichkeiten erarbeitet sowie ein Strukturplan der Massen- und Energieströme erstellt werden. Das Aufstellen der Liste beinhaltet außerdem die Identifikation derjenigen Komponenten, die von Facharbeitern in der Region gefertigt und zugekauft werden müssen bzw. sogar evtl. importiert werden müssen.

Dabei muss auch der Energiebedarf ermittelt werden und ein angepasstes Konzept zur Deckung erarbeitet werden. Die Machbarkeit der HTC-Technik ist auch abhängig von der Machbarkeit der technischen Energieversorgung der Anlage.

Um die „Sicherheit für Anlagenbetreiber und die aller Personen der Öffentlichkeit während des gesamten Prozesses“ gewährleisten zu können, sollte bei der Anlagenentwicklung Folgendes beachtet werden [40]:

- genaue Analyse der Belastungen
- verantwortungsvolle Konstruktion und Dimensionierung
- geeignete Wahl zu verwendender Materialien, Komponenten und Fertigungsverfahren
- Verwendung von Sicherheitsventilen (d.h. Überdruckventilen)
- Einplanen geeigneter anlagentechnischer Maßnahmen um Risiken rechtzeitig zu erkennen bzw. zu vermeiden (Risiko durch Explosionen oder Feuer, durch Emissionen von Feinstaubpartikeln oder Gasen und Belästigung durch Geräusche oder Gestank)

Ökologische Forschung

Die notwendige ökologische Forschung geht über den Bereich der Begleitforschung hinaus und sollte bei Projektfortführung als eigenständiger und wichtiger Bereich Beachtung finden.

Zunächst sollte eine umfangreiche Abschätzung und Untersuchung der Toxizität der technisch erzielbaren Produkte erfolgen, sodass mögliche umwelt- und gesundheits-schädliche Wirkungen erfasst und abgeschätzt werden können. Kann ein sicherer Einsatz nicht gewährleistet werden, darf auch eine technisch machbare Realisierung der HTC in Tansania nicht durchgeführt werden.

Aufgabe der ökologischen Forschung ist es auch, die Handhabung der Nebenprodukte aus dem Prozess, d.h. Möglichkeiten zur Entsorgung oder Weiterverwendung zu prüfen. Z.B. sind nach der HTC die Nährstoffe im Prozesswasser gelöst, das jedoch auch Substanzen mit unbekannter Wirkung enthalten kann. Fragen, die noch geklärt werden müssen betreffen vor allem die Zusammensetzung des Prozesswassers und insbesondere potentielle Wirkungen auf Mensch, Tier und Umwelt. Es sollte außerdem geprüft werden, welche ökologischen Methoden der Wasseraufbereitung angewendet werden könnten.

Um eine Wirkung im Boden abschätzen zu können, sollten folgende Kenngrößen des Produkts bestimmt werden:

- KAK
- Stabilität der Kohlenstoffverbindungen über Bestimmung der Abbaurate
- Bestimmung der Gehalte der wichtigsten Nährstoffe und Spurenelemente
- ggf. Porenvolumen bzw. Porosität

Mit den carbonisierten Produkten sollten anschließend Anbauversuche (Topfversuche und Freilandversuche) gemacht werden, um die Bodenwirkungen experimentell zu prüfen.

An der Philosophie der Terra-Preta-Herstellung orientiert, besteht weiterer Forschungsbedarf z.B. darin die Wirkung einer biochemische Aktivierung des HTC-Kohle bzw. -Torfs durch Einschleusen in den Fermentationsprozess und/oder einer Kompostierung gemeinsam mit Ernteresten und Tonmineralien zu untersuchen.

Ausblick

Um bei der Anlagenentwicklung (inkl. Prozessanpassung und ökologischer Forschung) einen nachhaltigen Einsatz der Technik in Tansania umsetzen zu können, ist die Erarbeitung eines ausführlichen Schulungs- und Ausbildungskonzepts sehr wichtig. Dieses sollte sowohl den Betrieb als auch die Wartung der Anlage beinhalten

und außerdem eine Sensibilisierung der gesamten Bevölkerung für die Prozessbedingungen erreichen.

Wichtige Schritte sind dabei [40]:

- Identifikation der notwendigen und angemessenen Ausbildungsmaßnahmen der Anlagenbetreiber und Erarbeitung eines ausführlichen Schulungskonzeptes
- Durchführung von Qualifizierungsmaßnahmen
- Gewährleistung, dass alle Personen (Betreiber sowie Personen im Umfeld) ausreichend Kenntniss über den Prozess an sich, den Ablauf, notwendige Sicherheitsmaßnahmen sowie mögliche Gefahren und Risiken haben
- Gewährleistung einer zuverlässigen Wartung im Rahmen der vorherrschenden Möglichkeiten (z.B. intensive Schulung und Betreuung zur Vermittlung des notwendigen Wissens, Hilfe und Kontrolle bei der Wartungsplanung und -durchführung)

Um die gewünschte Multiplikation, d.h. selbstständige Verbreitung der Technik zu erreichen, ist es wichtig, dass das Konzept wirtschaftlich tragfähig ist. Dies erfordert schon während der Entwicklungs- und Planungsphase die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.



Abb. 6.1: Modell eines möglichen Niedertemperatur-HTC-Reaktors

Danksagung

Drei „Dinge erfüllen mein Herz mit immer neuer und zunehmender Bewunderung und Ehrfurcht, je öfter und anhaltender sich das Nachdenken damit beschäftigt: der bestirnte Himmel über mir, das moralische Gesetz in mir“ und die Menschen um mich herum.

Literaturreferenzen

- [1] University of Texas Libraries. Karte Tanzania. http://www.lib.utexas.edu/maps/africa/tanzania_ol2003.jpg 11.05.2010, 2010.
- [2] IBI. Biochar use in the field. www.biochar-international.org.
- [3] Johannes Lehmann, Stephen Joseph. Biochar for Environmental Management - Science and Technology. Earthscan, London, Sterling, 2009.
- [4] Yun Yu, Xia Lou, Hongwei Wu. Some Recent Advances in Hydrolysis of Biomass in Hot-Compressed Water and Its Comparisons with Other Hydrolysis Methods. Energy & Fuels, Vol. 22, p. 46 -60, 2008.
- [5] Michael W. I. Schmidt, Angela G. Noack. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications and current challenges. Global Biochemical Cycles, Vol. 14, No. 3, p. 777-793, 2000.
- [6] Mike Kleinert, Tobias Wittmann. Carbonisation of biomass using hydrothermal approach: State-of-the-art and recent developments. Vortrag zur 17. Europäischen Biomasse Konferenz, Hamburg, June 29 - July 3, 2009.
- [7] Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann, Hermann Hofbauer (Hrsg.). Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [8] Dave Tjiok. Utilizing the process of the hydro-thermal carbonization for converting biological waste and residues into carbon material. Vortrag in Riga, Oktober, 2009.
- [9] Axel Funke. Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse. Zweiter Zwischenbericht für das Stipendiatenprogramm der DBU, 2010.
- [10] Michael J. Antal, Morten Gronli. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. Ind. Eng. Chem. Res. Vol 42, No.8, 2003, p. 1619-1640, Published on Web 03/14/2003, 2003.
- [11] Hans Dieter Baehr, Stephan Kabelac. Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.

- [12] United Republic of Tanzania. Regional Report: Kagera Region, Band V. National Sample Census of Agriculture 2002/2003, 2007.
- [13] Eigene Datenerhebung im Rahmen der durchgeführten Erkundungsreise, 2010.
- [14] Philipp Becker. Potenzial und Realisierungsmöglichkeiten von Kleinstbiogasanlagen in Kagera (Tansania). Diplomarbeit im Fachbereich Umweltverfahrenstechnik an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, 2008.
- [15] Bruno Glaser. Biochar: Bodenverbesserung und C-Sequestrierung. Vortrag am Kolloquium "Kohle im Bodenäm Institut für Ökologie der TU Berlin am 26. Januar.
- [16] neubearb. und erw. von Hans Peter Blume et al. Scheffer/Schachtschnabel - Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 2002.
- [17] Bibliographisches Institut GmbH, Dudenverlag, Mannheim. Duden - deutsches Universalwörterbuch. <http://www.duden.de>, 2010.
- [18] Ulrich Förster, Peter Grathwohl. Ingenieurgeochemie - Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [19] David Montgomery, Robert E. Baron, Sugandha D. Tuladhar. Cut black carbon emissions - A summary: the analysis paper. <http://fixtheclimate.com/component-1/the-solutions-new-research/black-carbon/c500> am 22.07.2010, 2009.
- [20] Ulrich Gisi. Bodenökologie. Die deutsche Bibliothek, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1997.
- [21] Gerd Hintermaier-Erhard, Wolfgang Zech. Wörterbuch der Bodenkunde - Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Böden. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1997.
- [22] Urs Blösch. Thicket Clumps: A characteristic feature of the Kagera savana landscape, East Africa. *Journal of Vegetation Science* Vol. 19; p. 31-44; doi: 10.3170/2007-8-18315, 2008.
- [23] Ibrahim Bitakwate. Persönliche Mitteilung. E-mail vom 1. Juni 2010, 2010.
- [24] Jürgen Schultz. Handbuch der Ökozonen. Uni Taschenbücher für Wissenschaft, Ulmer-Verlag, Stuttgart, 2000.
- [25] Christine Müller-Beblavy. Die Bedeutung von Böden und Humus im Kohlenstoffkreislauf. www.das-gold-der-erde.de.

- [26] E.H. Novotny. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the utilisation of charcoal for soil amendment. *Journal of Brazilian Chemical Society*, Vol. 20, No. 6, p. 1003-1010, 2009.
- [27] Rattan Lal. Soils and world food security. *Soil Tillage Research*, Vol. 102, Editorial, S. 1-4, 2009.
- [28] The United Nations. We can end poverty 2015 - Millenium Development Goals. <http://www.un.org/millenniumgoals/>, 2010.
- [29] E.Toby Kiers et al. Agriculture at a Crossroads. *Science* 320, p. 320-321, 2008.
- [30] William I. Wood, Wenceslau G. Teixeira, Johannes Lehmann et al. *Amazonian Dark Earth: Wim Sombroek's Vision*. Springer Science and Business Media B.V., 2009.
- [31] Bruno Glaser, Johannes Lehmann, Wolfgang Zech. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biol Fertil Soils*; Vol. 35, p. 219–230 DOI 10.1007/s00374-002-0466-4, 2002.
- [32] Bruno Glaser. *Biochar: C-Einlagerung in Ackerböden*. Abteilung Bodenphysik, Universität Bayreuth, 2009.
- [33] Lothar Frenz, Marc Steinmetz. Amazoniens schwarze Sensation. *Geo*, Vol. 3, S. 64-80, 2009.
- [34] Johannes Lehmann, John Gaunt, Marco Rondon. Bio-Char sequestration in terrestrial ecosystemy - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 11 S. 403–427, 2006.
- [35] Emma Marris, Johannes Lehmann. Black is the new green. *Nature Magazin*, Vol. 442/10, S. 624-626, August 2006.
- [36] Joachim Böttcher. *Terra Preta - die Schlüsselinnovation des Jahrhunderts*. www.das-gold-der-erde.de, 2009.
- [37] Cordner Peacocke, Stephen Joseph. Notes on Terminology and Technology in Thermal Conversion. <http://www.biochar-international.org> am 28.07.2010, k.A.
- [38] Dirk Willem Krevelen. Coalification revisited.
- [39] Friedrich Bergius. Beiträge zur Theorie der Kohleentstehung. *Die Naturwissenschaften*, Heft 1, 16. Jahrgang, 1928.
- [40] Jane Lynch, Stephan Joseph. Guidelines for the Development and Testing of Pyrolysis Plants to Produce Biochar. www.biochar-international.org, 2010.

- [41] Mike Kleinert. Konvertierungsverfahren von Biomasse unter besonderer Berücksichtigung flüssiger Treibstoffe für den Automobilssektor, 2008.
- [42] Friedrich Bergius. Chemical reactions under high pressure. Nobel Lecture, May 21, 1932, 1932.
- [43] Brigitte Röthlein. Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf. Max Planck Forschung, Vol. 2, S. 20-25, 2006.
- [44] Meyers Enzyklopädisches Lexikon. Bibliographisches Institut, Mannheim, 2002.
- [45] Maria-Magdalene Titirici et al. A direct synthesis of mesoporous carbons with bicontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization. Chem. Material, Vol. 19, No. 17, 2007.
- [46] Axel Funke, Felix Ziegler. Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Literature Survey Focussing on Its Technical Application and Prospect. 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29 June - 3 July, 2009, Hamburg, 2009.
- [47] Mike Kleinert, Tobias Wittmann. Carbonisation of biomass using hydrothermal approach: State-of-the-art and recent developments. Paper zur 17. Europäischen Biomasse Konferenz, Hamburg, June 29 - July 3, 2009.
- [48] Axel Funke, Felix Ziegler. Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Summary and Discussion of Chemical Mechanisms for Process Engineering. Biofuels, Bioprod. Bioref. Vol. 4, p. 160-177; Society of Chemical Industry and John Wiley Sons, Ltd, 2010.
- [49] Axel Funke. Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse. Kapitel 2, bisher unveröffentlichte Dissertation, 2009.
- [50] Mike Kleinert. Persönliche Mitteilung vom 14. Juli, 2010.
- [51] Andreas Stähler. Persönliche Mitteilung. E-mail vom 12. Juli 2010, 2010.
- [52] Maria-Magdalene Titirici, Arne Thomas, Markus Antonietti. Back in the Black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO₂ problem? New Journal of Chemistry, Vol. 31, p. 787-789, 2007.
- [53] Jakob Geffers. Hydrothermal carbonized sugarmill waste as soil amendment. Diplomarbeit im Fachbereich Bodenkunde, Institut für Ökologie, TU Berlin, 2010.
- [54] Dominik Peus. Offenlegungsschrift: Aus Biomasse hergestellter Werk- und/oder Brennstoff. Deutsches Patent- und Markenamt, 2008.
- [55] IBI. International Biochar Initiative - IBI Mission. <http://www.biochar-international.org/about> am 28.07.2010, 2010.

- [56] Markus Antonietti. Wissenschaftliche Grundlage der hydrothermalen Karbonisierung von Biomasse. Vortrag, k.A.
- [57] Rattan Lal. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science*, Vol. 60, S. 158–169; doi: 10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x, April 2009.
- [58] Rattan Lal. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. *Energy and Environmental Science*, Vol. 1, S. 86-100; DOI: 10.1039/b809492f, 2008.
- [59] Johannes Lehmann, Marco Rondon. Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. *Biological approaches to sustainable soil systems*, chapter 36, 2006.
- [60] Alberte Bondeau et al. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* Vol 13, p. 1–28, 2007.
- [61] Joachim Böttcher, Haiko Pieplow, Alfons-E. Krieger. Verfahren zur Herstellung von humus- und nährstoffreichen sowie wasserspeichernden Böden oder Bodensubstraten für nachhaltige Landnutzungs- und Siedlungssysteme. Veröffentlichte Internationale Anmeldung bei der Weltorganisation für geistiges Eigentum, Int. Veröffentlichungsnummer WO 2009/021528 A1, 2009.
- [62] Mark J. Prins. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. Dissertation, 2005.
- [63] Patrick C.A. Bergmann, Jacob H.A. Kiel. Torrefaction for biomass upgrading. 14th European Biomass Conference Exhibition, Paris, France, 17-21 October 2005, 2005.