

Schlussbericht **Mai 2003**

Vergärung von Pulpa aus der Kaffee-Produktion

Ausgearbeitet durch

M. Hofmann, U. Baier

HSW Hochschule Wädenswil

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie
Forschungs- und P+D-Programm Biomasse

Auftragnehmer:

HSW Hochschule Wädenswil
Einsiedlerstrasse 31
CH 8820 Wädenswil

Autoren:

Markus Hofmann
Urs Baier

Dieses Dokument ist im Auftrag des BFE Bundesamt für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind alleine die Autoren verantwortlich

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3036 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb:**ENET**

Egnacherstrasse 69, CH-9320 Arbon
Tel. 071 440 02 55, Fax 071 440 02 56, enet@temas.ch • www.energieforschung.ch • www.energie-schweiz.ch

Zusammenfassung

Bei der Ernte von Kaffeekirschen und der Produktion von getrockneten Kaffeebohnen fallen am Produktionsstandort pro Tonne Kaffeebohnen ca. 2 Tonnen feuchte Kaffeeschalen (**Pulpa, Broza**) an. Dieses Material stellt eine wertvolle **Energiequelle** dar und kann anaerob zu Biogas vergoren werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass Pulpa als MonochARGE anaerob umgesetzt werden kann. Es sind keine Nährstofflimitationen und höchstens moderate Substrathemmungen in konzentrierter Pulpa vorhanden. Das **Biogaspotential** liegt bei 0.38 m^3 Biogas / kg organischer Substanz. Die Abbaubarkeit der organischen Substanz liegt bei über 70%.

Im semikontinuierlichen Betrieb wurde bei einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 16 Tagen ein weitgehender Abbau von organischem Material und eine entsprechende Produktion von Biogas gezeigt. Eine Vergärung der Pulpa ist sowohl in voll durchmischten Rührkesselreaktoren als auch in längs durchströmten Propfenstromreaktoren möglich.

Aufgrund des Anteils leicht abbaubarer Substratanteile in der Kaffee Pulpa findet in frischem Material ein schnelles mikrobiologisches Wachstum statt. Dies führt bei der Lagerung unter Luftzufuhr zu einem aeroben Abbau mit entsprechendem Energieverlust. Zusätzlich bilden sich anaerobe Zonen mit entsprechender Methanemission. Es wird daher vorgeschlagen, frische Pulpa bis zu ihrer anaeroben Vergärung in einer **sauerstofffreien, milchsauren Phase** (Silage) **zu lagern**

Abstract

Harvesting of coffee berries and production of dried coffee beans produces large amounts of solid wastes. Per ton of consumable coffee beans roughly 2 tons of spent **coffee pulp** is wasted at the production facilities. Coffee pulp represents a valuable **source of energy** and can be used for anaerobic biogas production.

In this study it was shown that coffee pulp can be anaerobically digested as a sole carbon source without further addition of cosubstrates. No nutrient limitations and only a very moderate substrate inhibition have been found in concentrated pulp. The **mesophilic biogas formation potential** was found to be 0.38 m³ biogas per kg of organic matter. The anaerobic degradability was higher than 70%.

In semi continuously operated biogas reactors a high degradation of organics and a subsequent biogas production was shown at hydraulic detention times of 16 days. Methanization of fresh pulp is technically feasible in fully mixed tank reactors as well as in plug flow reactors.

Due to the presence of easily degradable carbon sources, fresh pulp will quickly show microbiological growth. Storage in presence of ambient oxygen will result in aerobic degradation of organics paralleled with energy loss. Additionally anaerobic zones with methane emission will quickly occur. Therefore it is recommended to **store fresh pulp under oxygen free, lactic acid conditions** (silage) until anaerobic treatment in the biogas reactor.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1. Projektumfeld.....	2
2. Zielsetzungen	3
3. Theoretischer Hintergrund	4
3.1 Kaffee als Welthandelsprodukt.....	4
3.2 Kaffeeproduktion.....	5
3.3 Anbau	5
3.4 Ernte	6
3.5 Aufbereitung	7
3.6 Stoffströme der Kaffeeaufbereitung.....	8
3.7 Bewirtschaftung von Pulpa.....	9
4. Material & Methoden.....	11
4.1 Charakterisierung des Substrates	11
4.2 Batchansätze	12
4.3 Semikontinuierliche Reaktorversuche	13
5. Ergebnisse	14
5.1 Substratcharakterisierung	14
5.2 Batchansätze	15
5.3 Semikontinuierliche Reaktorversuche	21
6. Schlussfolgerungen	22
6.1 Nährstofflimitation	22
6.2 Anaerober Abbau.....	22
6.3 Substratinhibition	22
6.4 Biogaspotential	23
6.5 Reaktordimensionierung	23
7. Implementierung	24
7.1 Rahmenbedingungen.....	24
7.2 Lagerung & Vorbehandlung	24
7.3 Biogasreaktor.....	25
8. Ausblick	27
9. Quellen	28

1. Projektumfeld

Im Rahmen der Klimakonvention von Kyoto und eines Zusammenarbeitsvertrags zwischen der Schweiz und Costa Rica („Cleaner Production Mechanism“) wird eine signifikante Reduktion der klimawirksamen Emissionen bei der Kaffeeverarbeitung in Costa Rica angestrebt.

Für die Reduktion der Umweltbelastung bei der Kaffeeverarbeitung sollen zum einen die bestehenden Energieressourcen (hauptsächlich Brennholz) durch bessere Bewirtschaftung (Abholzung, Erosion) und durch die Erhöhung des Wirkungsgrades besser genutzt werden. Zum anderen sollen die klimawirksamen Emissionen (CH_4) und die Gewässerverunreinigungen bei der Entsorgung der organischen Abfälle verhindert werden.

Die Aufbereitung des Kaffees führt zu verschiedenen Umweltbelastungen. Dies sind vor allem der hohe Wasserverbrauch, feste organische Abfälle (Pulpa), organisch belastete Abwässer und Abgase aus der Trocknung. Pulpa wird üblicherweise „kompostiert“, wobei die Kompostierung aufgrund des hohen Feuchtegehaltes vorwiegend anaerob verläuft. Es besteht die Gefahr der unkontrollierten Emission von Methan oder Lachgas. Mit einer kontrollierten Vergärung der Kaffee Pulpa werden diese Emissionen verhindert. Gleichzeitig wird in Form von Biogas Energie aus organischen Abfällen gewonnen, welche im Prozess der Kaffeeaufbereitung wieder eingesetzt werden kann und somit lokale Ressourcen (Holz) schont.

Eine grobe Überschlagsrechnung für Costa Rica zeigt die Relevanz der Vergärung im Kaffeeumfeld. Costa Rica produziert jährlich ca. 600'000 t Kaffeekirschen. 125'000 t gehen als getrockneter Komsumkaffee in den Export. Weitere 125'000 t fallen als flüssige Abwässer an. Die restlichen 350'000 t setzen sich mehrheitlich aus nasser Pulpa mit einem Wassergehalt von über 80% und einem organischen Anteil von ca. 15% zusammen. Die durch Vergärung potentiell nutzbare Energie dieses organischen Materials liegt bei ca. 170'000 MWh.

2. Zielsetzungen

Zur Vergärbarkeit und zum Biogaspotential von Kaffee Pulpa sind in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts einige Studien durchgeführt worden (Boopathy, 1988, Chacon, 1984, Lane, 1983, Wintrebert, 1980), welche die grundsätzliche Möglichkeit der anaeroben Behandlung aufzeigen. Es muss bei der Vergärung mit gewissen Störungen des Anaerobprozesses aufgrund von Hemmstoffen (Tannin, Terpene, Terpenoide) gerechnet werden (Field & Lettinga, 1987).

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist, **biotechnologische Grundlagen zur anaeroben Vergärung von Pulpa aus der Kaffeeproduktion zu erarbeiten**.

Zur Erarbeitung der Grundlagen sollen verschiedene Abbauversuche durchgeführt werden. Diese Tests beinhalten folgende Untersuchungen:

- Ermittlung des Biogaspotentials und Energieertrages von Kaffee Pulpa, Literaturvergleich
- Ermittlung von Nährstoff- (N,P) & mikrobiologischen Limitationen (Inhibitionen, Akkumulationen)
- Abschätzen des Nutzens eines möglichen Co-Substrates
- Beurteilen der Massnahmen zur Zwischenlagerung von Pulpa
- Beurteilung der Eignung typischer anaerober Reaktorkonfigurationen
- Grobe Bilanzierung des Energieertrages für einen typischen Produktionsstandort

Es ist vorgesehen, nach Abschluss des vorliegenden Projektes (Laborstudien) in einer 2. Phase die Vergärung von Kaffee Pulpa in einer Pilotierung in Costa Rica durchzuführen.

3. Theoretischer Hintergrund

3.1 Kaffee als Welthandelsprodukt

Kaffee als Konsumprodukt ist in Europa weit verbreitet und die grosstechnischen Verfahrensschritte der Kaffeeproduktion (Rösten, Mahlen, Lyophilisieren, Entkoffeinieren) sind bekannt, da sie zumindest teilweise in den Konsumländern stattfinden. Anders die vorge-lagerten Schritte der Ernte und Aufbereitung, welche hierzulande weitgehend unbekannt sind. Da für das Verständnis der Behandlung und Verwertung von Pulpa von zentraler Bedeutung, wird kurz auf Anbau, Ernte und Verarbeitung von Kaffe am Produktionsstandort eingegangen (Spicher, 2002).

Der Kaffeebaum (*Coffea*) gehört zur Familie der Rötegewächse (Rubiaceae), es handelt sich um tropische Pflanzen, welche nur in den tropischen und subtropischen Regionen zwischen dem 23. Grad nördlicher und dem 25. Grad südlicher Breite gedeihen (Abbildung 1). Kaffeebäume benötigen reichlich Niederschlag, Durchschnittstemperaturen zwischen 17 °C - 23 °C sowie gute Bodenverhältnisse. Bemerkenswert an dieser Pflanze ist, dass Blüten und Früchte zur gleichen Zeit an den Zweigen zu finden sind. Weltweit existieren ca. achtzig *Coffea* Arten, wovon die zwei Arten *Coffea arabica* und *Coffea canephora* einen Anteil von 99% der Weltproduktion ausmachen (Schär, 1999).

Nach Erdöl ist der Kaffee global das wichtigste Welthandelsprodukt. Da Kaffee (wie Erdöl) für viele Erzeugungsländer zum wichtigsten Exportartikel geworden ist, sind ganze Volks-wirtschaften vom Weltmarkt - Kaffeepreis abhängig. In afrikanischen Ländern ist diese Abhängigkeit besonders ausgeprägt, da in diesen Gebieten der Kaffeeanteil am Gesamt-export mehr als 90% betragen kann (Burundi / Uganda).

Wegen dieser grossen wirtschaftlichen Bedeutung des Kaffees erfolgt die Exportvermarktung in der Regel durch staatliche und halbstaatliche Institutionen, die durch preisregulie-rende Massnahmen die Einnahmen zu festigen versuchen. Aus Zentralamerika stammen 25 – 30% der Schweizerischen Kaffee Importe.

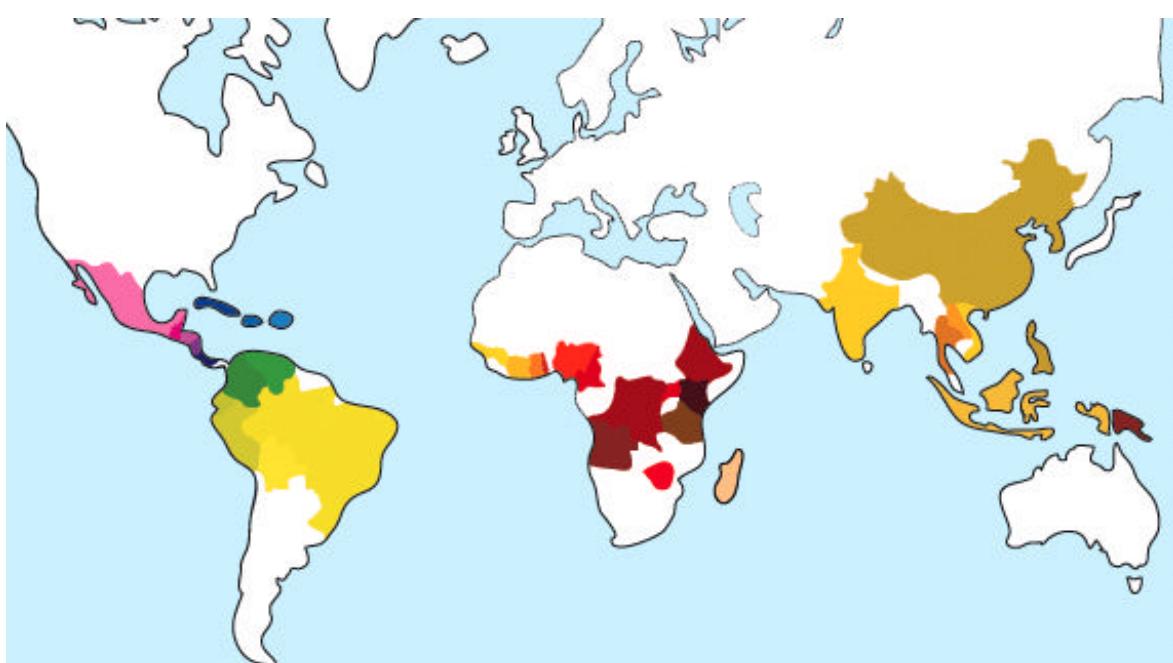


Abbildung 1: Kaffeeanbaugebiete (nach Ländern markiert)



Komponente	Anteil
Pulpa (Haut & Fruchtfleisch)	41 %
Schleimschicht	16 %
Pergamenthaut	5 %
Bohne	21 %
Wasser	17 %

Tabelle 1: Zusammensetzung einer Kaffeekirsche (Gewichtsprozente)

Abbildung 2: Kaffeekirsche

3.2 Kaffeeproduktion

Die Kaffeeproduktion lässt sich in 6 Schritten beschreiben (Abbildung 3), für die vorliegende Betrachtung sind die Produktionsschritte 1; Anbau, 2; Ernte und 3; Aufbereitung ausschlaggebend.

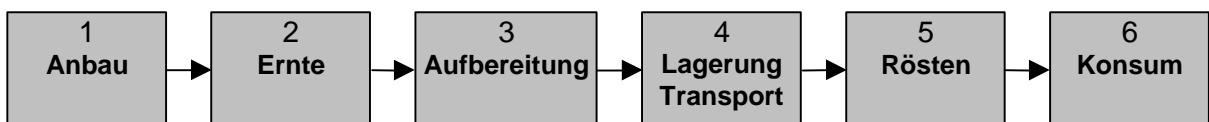


Abbildung 3: Ablaufschema Kaffeeproduktion

3.3 Anbau

Die Kaffeepflanze stellt sehr hohe Ansprüche an ihre Umgebung. Die geografischen Bedingungen, das Klima sowie die Bodenzusammensetzung müssen genau aufeinander abgestimmt sein, damit hervorragende Qualität und hohe Erträge erzielt werden können. Die beiden Sorten *Arabica* und *Robusta* stellen hierbei unterschiedliche Ansprüche.

Die Kirschen der Art *Coffea canephora* (oft auch als *Robusta* bezeichnet) sind sehr hart und die Pflanze selbst ist schnellwüchsiger, ertragsreicher und schädlingsresistenter als andere Kaffeepflanzen. Robusta Kaffee enthält 2 bis 2.5% mehr Koffein als die *Coffea arabica* und schmeckt deshalb etwas bitterer und erdiger.



Um durch effiziente Bodennutzung einen hohen Ertrag zu erzielen und die Kaffeebäume gleichzeitig optimal der Sonne auszusetzen, werden die Plantagen oft in steilem und unwegsamen Gelände angelegt. Entsprechend machen sich viele Betriebe nicht die Mühe,



die organischen Abfälle, wie zum Beispiel die Pulpa, nach der Aufarbeitung wieder in die Plantagen auszutragen. Mineral-dünger sind hier günstiger, bequemer und weniger geruchsintensiv. Aus diesem Grund wird die Kaffee Pulpa oft am Entstehungsort zu grossen Haufen aufgetürmt und sich selbst überlassen. Diese kompakten Haufen hat die Eigenschaft, dass er anaerob zu faulen beginnt und dabei in einem Prozess von mehreren Jahren Gerüche und Methan an die Umgebung emittiert (s.u.).

3.4 Ernte

Bei der Ernte kommen zwei Methoden zum Einsatz. Das „Picking“ und das „Stripping“.

Picking: Für den besten Kaffee werden nur die reifen Kirschen mit der Hand gepflückt. Dies ist zwar zeit- und arbeitsaufwendig, garantiert aber eine hohe Qualität. Das selektive Pflücken muss alle 8 bis 10 Tage wiederholt werden, bis schliesslich alle Früchte abgeerntet sind.



Stripping: Beim Ernten durch "Strip-Pflückung" werden alle Kirschen in einem Vorgang von den Zweigen gestreift, unabhängig vom unterschiedlichen Reifegrad. Die Früchte fallen dann in auf dem Boden ausgebreitete Tücher. Diese Methode wird in Gebieten genutzt, in denen nicht genügend Pflücker zur Verfügung stehen. Die ungleichmäßige Zusammensetzung des Erntegutes aus unreifen, reifen und überreifen Kirschen wirkt sich allerdings negativ auf die Qualität des Endproduktes aus, kann aber durch nachträgliche Sortierung ausgeglichen werden.



Auf den großen Kaffeefarmen Brasiliens werden Maschinen eingesetzt, die auf mechanischem Wege die Äste der Kaffeebäume kämmen, so dass die Kirschen auf einen Sammler fallen. Geländeform und Bepflanzung der Plantagen machen den Einsatz von Erntemaschinen in den meisten Ländern jedoch unmöglich. Das Pflücken ist also nach wie vor Handarbeit. Die Tagesleistung eines Pflückers lässt sich nur grob abschätzen. Je nach Bedingungen können zwischen 50 und 100 Kilogramm frische Kaffeekirschen zusammenkommen, die ungefähr 10 bis 20 Kilogramm Rohkaffee liefern. Dies bedeutet, dass ein Pflücker drei bis sechs Tage arbeiten muss, damit ein 60-Kilogramm-Sack mit Rohkaffee gefüllt werden



kann. So erstaunt es nicht, dass die Erntekosten in vielen Ländern mehr als 50% der Gesamtkosten ausmachen, die auf der Farm entstehen.

3.5 Aufbereitung

Bei der Aufbereitung wird unterschieden zwischen trockener und nasser Aufbereitung.

Trockene Aufbereitung: Bei diesem Verfahren geht es darum, die ganzen Kaffeekirschen so lange zu trocknen, bis sich die Bohnen trocken und ohne Rückstände herausschälen lassen. Da diese Methode praktisch von der Natur vorgenommen wird, ist sie die wesentlich Ältere. Anwenden lässt sie sich überall dort, wo das Klima trocken und warm genug ist. In Regionen, in denen nicht genügend Wasser für die Nassmethode vorhanden ist, ist sie generell die erste Wahl. Aber auch Pflanzungstypus, maschinelle Ausstattung und Arbeitskosten bestimmen den Einsatz der Aufbereitungs methode. Robusta Kaffee wird mit wenigen Ausnahmen trocken aufbereitet. In Brasilien und Äthiopien wird allerdings auch Arabica trocken aufbereitet.



Zum Trocknen werden die reifen Kaffeekirschen möglichst gleichmäßig auf betonierten oder gepflasterten Trockenflächen ausgebreitet. In kleineren Pflanzungen werden auch Gestelle, so genannte Trockenhorden, eingesetzt. Auf den Drahtflächen der Gestelle sind Fasergewebe ausgebreitet, auf denen die Kaffeekirschen zum trocknen ruhen.

Die ausgebreitete Schicht darf nicht zu dick sein, damit die Kirschen nicht zu faulen beginnen. Ständig müssen die Früchte gewendet und bewegt werden. Vor Regen und starken Temperaturschwankungen ist das Trockengut zu schützen. 3 bis 5 Wochen dauert es, bis die Kaffeekirschen getrocknet sind und eine Restfeuchte von etwa 12% aufweisen. Eine reife, frisch gepflückte Kaffeekirsche besteht zu 50 bis 60% aus Wasser. Der richtige Trockengrad ist dann erreicht, wenn die in der Kirsche enthaltenen Bohnen beim Schütteln rappeln. Eine maschinelle Schnelltrocknung ist möglich, aber sehr teuer und aufwendig. Nach der Trocknung werden die Früchte entweder bis zur Weiterverarbeitung in Säcken gelagert oder sofort geschält.

Nasse Aufbereitung: Notwendige Voraussetzung für die nasse Aufbereitung ist das Vorhandensein von Wasser, das Verfahren benötigt 130 bis 150 Liter klares Quellwasser für 1 Kilogramm marktfertigen Rohkaffee.

Zunächst werden die frischen, reifen Kaffeekirschen von Hand oder mechanisch von Verunreinigungen befreit und in Wassertanks oder Schwemmkänen vorsortiert. Dann werden die Kaffeekirschen durch den Pulper befördert. Mit dieser Maschine wird das Fruchtfleisch so von den Bohnen abgequetscht, dass diese unbeschädigt in ihrer allerdings noch von einer Schleimschicht umgebenen Pergamentauthülle übrig bleiben. Gleichzeitig wird das überflüssige Fruchtfleisch von den Bohnen getrennt.



Wichtig ist, dass die geernteten Kaffeekirschen nicht später als 24 Stunden, besser innerhalb von 12 Stunden nach der Ernte, zur Nassaufbereitung gelangen, da sie sonst zu gären beginnen. Der entpulpte Kaffee wird im Schwemmkanal und durch Siebung weiter selektiert und gelangt dann in das Fermentationsbecken oder die Fermentationsbehälter. Dort wird der an der Pergamenthaut haftende Restschleim in einem

Gärungsprozess, dem so genannten Fermentationsvorgang, gelöst und abwaschbar gemacht.

Die im Kaffee vorhandenen Enzyme bewirken diese Fermentation. Sie dauert normalerweise je nach Gegebenheiten 12 bis 36 Stunden. Absolute Sauberkeit aller Anlagen und Aggregate ist notwendig, denn eine Bohne, die zu lange der Gärung ausgesetzt war, ist überfermentiert und ergibt die berüchtigte „Stinkerbohne“, die eine ganze Kaffeepartie verderben kann. Nach der Fermentation muss der Kaffee gewaschen werden, um alle noch verbliebenen Reste von der Pergamenthaut zu entfernen.

Bei der folgenden Trocknung wird der Pergamentkaffee auf ca. 12% Feuchtigkeit heruntergetrocknet. Dies geschieht auf Trockenplätzen (Patios) oder Trockenhorden und dauert rund 10 bis 15 Tage. Sollte die Sonne zur Trocknung nicht ausreichen, so werden auch Trockenöfen eingesetzt, in denen erhitzte Luft das Gut trocknet.

Halbtrockene Aufbereitung: In manchen Produktionsländern wird eine Kombination aus beiden Aufbereitungsarten eingesetzt. Bei dieser so genannten halbtrockenen Aufbereitung (semi-washed) wird durch einen maschinellen Prozess das Fruchtfleisch der Kirsche weitgehend abgetrennt. Danach erfolgt aber keine Fermentation, sondern der Pergamentkaffee trocknet zusammen mit den ihm anhaftenden Fruchtfleischresten. Mitunter erfolgt auch ein Waschprozess vor der Trocknung des Pergamentkaffees. Neuerdings werden vor allem in Brasilien und Zentralamerika spezielle Maschinen zur mechanischen Entfernung des Fruchtfleisches und der Pulpa eingesetzt. In dieser Aufbereitungsform wird sehr wenig Wasser gebraucht. Sie wird daher als wassersparend und umweltschonend angesehen.

3.6 Stoffströme der Kaffeeaufbereitung

Insbesondere bei der nassen Kaffeeaufbereitung entstehen die beiden Stoffströme „Abwasser“ und „organische Feststoffe“, welche behandelt werden müssen (Abbildung 4). Der Wasserstrom variiert je nach Aufbereitungsmethode stark, derjenige der organischen Feststoffe bleibt bei allen Verfahren annähernd gleich.



Abbildung 4: Stoffströme der Kaffeeaufbereitung

Abwasser: Wasser steht an den Erntestandorten meist gratis zur Verfügung, der Wasserverbrauch ist in vielen Betrieben entsprechend sehr hoch und Einsparungen lohnen sich finanziell nicht. 80 - 90% des gesamten Wassers werden üblicherweise für den Waschprozess aufgewendet. Es gibt Betriebe, die ihr Wasser im Kreislauf fahren und so bis 90% weniger Wasser verbrauchen. Ein bei diesem Verfahren zu beachtender Effekt ist, dass das Abwasser viel höhere Konzentrationen an organischen Stoffen aufweist als normal.

Diese hoch kontaminierten Abwasser werden aber heute in einigen Betrieben schon über Lagunen aufbereitet (Schär, 1999].

Organische Feststoffe: Nur gerade 21% des Gesamtgewichtes von frisch geerntetem Kaffee kann als Konsumkaffee genutzt werden (Abbildung 2). Der Rest fällt während der Produktion als organisch stark belastete Fraktion an (Pulpa, Fruchtschleim und Pergamentschalen). Der grösste Anteil macht mit über 40% die Pulpa aus. Total resultieren 62% der Frucht als organische Abfälle.

Kaffee Pulpa: Die Pulpa macht den grössten Teil des Abfalls aus, sie fällt zentral in grossen Mengen an und wird in nach mehrmonatiger Zwischenlagerung meist wieder auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht.

Fruchtschleim: Der Fruchtschleim geht bei der nassen Aufbereitung zum grössten Teil in gelöster Form mit dem Abwasser weg, was eine hohe organische Belastung zur Folge hat. Diese Abwasser werden versickert oder über Lagunen abgebaut.

Pergamentschalen: Nach der nassen Aufbereitung werden die Bohnen getrocknet und danach gedrescht. Das Dreschen erfolgt maschinell und bezweckt, dass die Pergamentschale von den Bohnen abgelöst wird. Diese Pergamentschalen werden zusammen mit Brennholz in den Öfen des Trocknungsprozesses verbrannt (Schär, 1999].

3.7 Bewirtschaftung von Pulpa

Es existieren unterschiedliche Konzepte zur Verwertung oder Behandlung von Pulpa (Rechsteiner et al., 1998, Schär, 1999), darunter die Produktion von Futterprotein (single-cell protein), Dünger & Bodenverbesserer, Biogas, Bioethanol, Essigsäure oder Milchsäure (Adams, 1981) sowie Tierfutter oder Brennstoff (Ananda & Ramaiah, 1986). Die einfache Lagerung und die Kompostierung sind gerade im mittelamerikanischen Raum weit verbreitet während die anaerobe Vergärung, die Entwässerung, die technische Trocknung und andere Verwertungswege erst punktuell erfolgen oder in Konzeptstudien erprobt werden.

Lagerung: Aufgrund der kurzen Erntesaison von Kaffee (Oktober – Januar) fällt die Pulpa während kurzer Zeit in grossen Mengen an und wird nur in seltenen Fällen direkt vollständig verwertet. Meist werden grössere, offene Lager angelegt, im Normalfall auf unbefestigtem Boden und ohne Sickerwassersammler. In vielen Fällen werden diese Lager nicht oder nur wenig umgeschichtet und nach mehreren Monaten direkt auf landwirtschaftliche Flächen (nicht notwendigerweise auf die Kaffeeanbaufläche) ausgebracht. Die offenen Lager weisen oft erhebliche Geruchsemissionen auf, zudem ist eine Belastung der Atmosphäre mit Methan und Lachgas sowie der Hydrosphäre über organisch stark belastetes Sickerwasser möglich.

Kompostierung: Auf etlichen Produktionsbetrieben wird Pulpa so genannt kompostiert, wobei die Rahmendbedingungen und der Betrieb dieser Kompostierungen enorm grossen Schwankungen unterworfen sind (Wu, 1995). Während an etlichen Standorten ein geordnetes Kompostmanagement (Durchmischen, Umschichten, Abdecken, Verteilen und Ausbringen als Dünger) besteht (Leon & Ortega, 1997, Kayembe et al. 1998), wird anfallende Pulpa häufig nur ungenügend angeimpft, umgeschichtet und belüftet zu Haufen aufgeschichtet und sich selbst überlassen. Die Bedeutung der Animpfung und der Zugabe von Strukturmaterial oder anorganischen Zusatzstoffen für die Kompostierung von Pulpa ist beschrieben (Tauk, 1985, Tauk, 1986). Charakteristisch für die meisten (auch gut geführten) Kompostierungen sind die langen Rottezeiten von 5 – 10 Monaten (Sanchez et al. 1999), das Entstehen von Sickerwasser und die gasförmigen Emissionen von Methan und

Lachgas (Schleiss, 2002). Werden Monochargen von Kaffeepulpa während der initialen Phase der ersten Wochen nicht intensiv belüftet, so bilden sich schnell saure oder anaerobe Zonen.

Vermicomposting: Es bestehen vereinzelte Ansätze, eine gezielte Kompostierung durch den Einsatz von Wurmkuluren zu erreichen welche die Pulpa zu Dünger umsetzen, der dann auf die Plantage ausgetragen werden kann (Orozco, 1996). Vermicomposting hat eine geringere Geruchsemmission zur Folge und der Reifekompost ist nicht klebrig und schleimig wie die unbehandelte Pulpa. Für die initiale Phase (Wochen – Monate) sind jedoch die selben Einschränkungen wie für die normale Kompostierung zu machen.

Pilzzucht: Als exotische Variante zur Verwertung von Kaffee Pulpa wurde auch die Verwendung als Grundsubstrat zur Pilzzucht in Erwägung gezogen, allerdings ohne grosse Verbreitung (Takemoto et al. 1999).

Vergärung: Die anaerobe Vergärung von Pulpa als MonochARGE (Calzada & Rolz, 1984) oder in Kombination mit anderen organischen Stoffen ist bekannt (Wintrebert, 1980, Boopathy & Mariappan, 1984), aber im Verhältnis zur Kompostierung Technologie intensiv und kaum verbreitet. Der Energieträger Biogas kann zur Produktion von Wärme für die Kaffeetrocknung verwendet werden.

Entwässerung: Bei der maschinellen Entwässerung von frischer Pulpa entsteht ein saures, Tannin haltiges Presswasser welches 40% des Tannins der Kaffeekirsche enthält und für die direkte Düngung nur mit Vorbehalt eingesetzt werden kann.

Trocknung: Ein weiteres Ansatz (Auf der Maur, 1999) versucht, die Pulpa zu trocknen, um sie danach als Brennstoff für die Trocknungsöfen zu verwenden. Für die Trocknung der Kaffeebohnen werden grosse Menge an Brennholz (In Costa Rica: 200'000 m³ = 25% des landesweiten Brennholzbedarfs) benötigt. Eine Substitution von Holz durch schnellere nachwachsende Energieträger macht also Sinn. Die in der trockenen Pulpa enthaltene Energie reicht rechnerisch aus, um die entsprechende Menge Kaffeebohnen zu trocknen.

Die Marktpreise für Kaffee entwickeln sich weltweit in den letzten Jahren stark fallend. Darauf ist zurück zu führen, dass in den Produktionsländern kaum Mittel bereit stehen, für die Entwicklung und für die Anwendung von Technologien, welche mit massgeblichen Investitionskosten verbunden sind.

4. Material & Methoden

4.1 Charakterisierung des Substrates

Das Ablaufschema der Probenaufbereitung bis zur Laboranalyse der verschiedenen Substrate ist in Abbildung 5 dargestellt. Das Ausgangsmaterial wurde unverdünnt mit einem Mixer gemixt. Für die Analyse der biogenen Abfälle mussten die Proben zuerst 1:10 verdünnt und anschliessend mit einem Stabmixer homogenisiert werden.

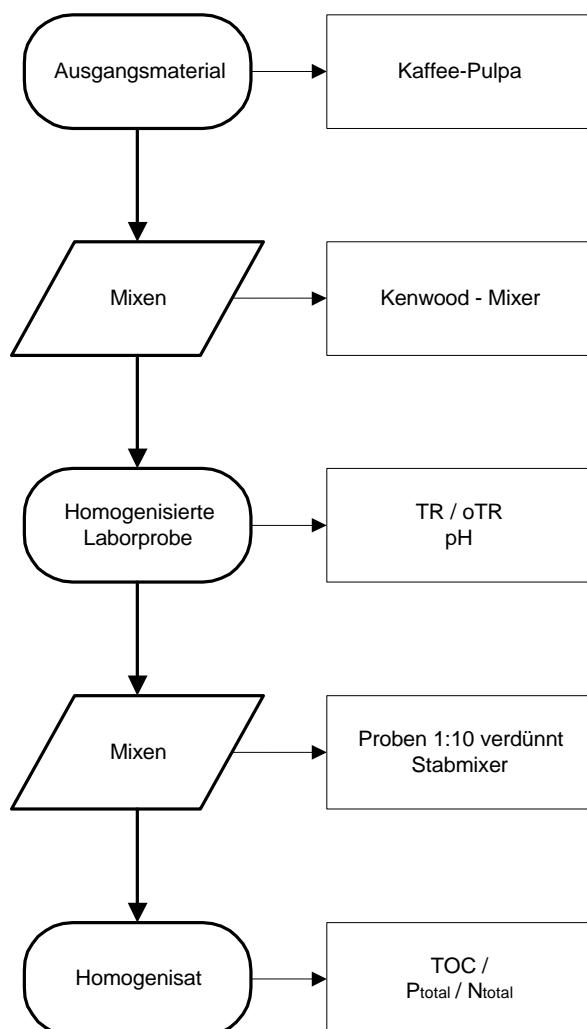


Abbildung 5: Arbeitsablauf der Probenaufbereitung zur Analyse von Pulpa

Die Bestimmung des Trockenrückstandes TR [g/l] erfolgte mittels eines Infrarottrockners bei 105°C. Der organische Anteil der TR (oTR, [%dTR]) wurde durch Veraschung bei 450°C während 12 Stunde bestimmt.

Organischer Kohlenstoff (TOC, [mg C/l]) wurde in einem elementar TOC+N Analyzer (katalytische Verbrennung bei 800 °C, IR Detektion von CO₂) analysiert.

Totaler Stickstoff (TN, [mg N/l]) wurde in einem elementar TOC+N Analyzer (katalytische Verbrennung bei 800 °C, IR Detektion von NO₃) analysiert.

Gesamtphosphor P_{tot} [mg P/l] wurde photometrisch (Dr. Lange LCK349) ermittelt.

4.2 Batchansätze

Es wurden drei Batchansätze (B01 – B03) durchgeführt:

Versuch "Abbau" (B01):

Substrat: Pulpa
Verdünnungen 1:2, 1:5, 1:10
ohne Supplementierung

Versuch "Limitation1" (B02):

Substrat: Pulpa
Verdünnungen 1:2, 1:5, 1:10
mit Nährstoff Supplementierung
Ammoniumchlorid NH₄Cl 168 g/L,
Kaliumhydrogenphosphat KH₂PO₄ 100 g/L

Versuch "Limitation2" (B03):

Substrat: Pulpa
Verdünnungen 1:2, 1:5, 1:10
mit Spurenelementlösung supplementiert

Als Testsysteme dienten Laborflaschen (Abbildung 6) mit einem Flüssigkeitsvolumen von 400 mL und einem Gesamtvolumen von 890 mL. Als Inokulum (50%, 200 mL) diente eine aktive Biomasse aus kommunalem Faulschlamm. Die Inkubation erfolgte bei neutralem pH (7.1 – 7.4) im mesophilen Bereich (36°C ± 2°C) während 50 - 100 Tagen im Inkubationsschüttler. Der Gasdruck wurde manometrisch erfasst, der pH-Wert im neutralen Bereich eingestellt.



Abbildung 6: Anaerobe Batch Abbautests

4.3 Semikontinuierliche Reaktorversuche

Die (semi-)kontinuierlichen Reaktorversuche wurden in einer Doppelbestimmung ange-
setzt mit einem Flüssigkeitsvolumen von 8 Liter (Abbildung 7). Als Inokulum wurde ein
aktiver kommunaler Faulschlamm verwendet. Das Volumen der initialen Inokulumzugabe
betrug 6 Liter. Der pH-Wert wurde manuell im neutralen Bereich (7.1 – 7.4) eingestellt.
Die Gasmengenmessung erfolgte volumetrisch über elektronisch abgegriffene Gaswippen
mit konstanten Verdrängungsvolumen. Die Temperatur wurde über zwei Thermostaten im
Heizbad im Bereich von $36^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ geregelt. Die Suspension wurde bei einer Rührfrequenz
von 100 U/min periodisch (5 min Rühren/10 min Pause) durchmischt.

Die Substratzugabe und Entnahme erfolgte manuell in vorgewählten Intervallen.



Abbildung 7: 4-strassige semikontinuierliche Biogasanlage

5. Ergebnisse

5.1 Substratcharakterisierung

			Pulpa	Inok
<i>Datum der Probenahme</i>			10.05.02	10.05.02
Trockenrückstand	TR	[g/L]	162.3	17.4
Glühverlust	oTR	[g/L]	152.5	8.3
	oTR	[% TR]	92.8	47.6
pH-Wert	pH	[\cdot]	5.4	7.6
Totaler organ. Kohlenstoff	TOC	[mg C/L]	53'729	4'299
Stickstoff (gesamt)	N _{tot}	[mg N/L]	2'048	2'557
Phosphor (gesamt)	P _{tot}	[mg P/L]	213	486
C : N : P (gerundet)		[\cdot]	100:4:0.4	9:5:1

Tabelle 2: chemische Charakterisierung von Pulpa

Ein Vergleich der ermittelten Werte mit Literaturwerten zeigt, dass der Trockenrückstand von Kaffee Pulpa mit 16.23% im Bereich der durchschnittlichen Literaturangaben von 15 – 20% liegt. Gemäss Vergleichswerten liegt der organische Trockenrückstand für Kaffee Pulpa im Bereich von 80 – 95%. Somit weist das vorliegende Substrat mit 92.8% d. TR einen hohen oTR Gehalt auf (Tabelle 2).

Kaffee Pulpa zeichnet sich aus durch einen tiefen pH-Wert (5.4). Für den biogenen Abfall wurde ein Nährstoffverhältnis von 100:4:0.4 ermittelt. Das Nährstoffverhältnis ist somit C-lastig. Der Anteil an ungelösten organischen Stoffen ist gering.

5.2 Batchansätze

5.2.1 Anaerober Abbau

Für die Berechnungen der Abbaugrade sind in jeder Serie nur die Werte der jeweiligen Start- und Endbedingungen berücksichtigt worden. Die Hintergrundwerte des Inokulums sind ausgeblendet worden, sowohl für die Berechnungen der Abbaugrade (Tabelle 3 - Tabelle 6) als auch für die Kalkulation der spezifischen Biogasproduktion (Tabelle 9).

Die Startbedingungen entsprechen aktuellen Messwerten. Die Endbedingungen zeigen gerechnete Werte unter der Annahme, dass sich die Hintergrundaktivität des Inokulums identisch verhält, also die gleichen Mengen an organischem Material umgesetzt werden.

Komponenten		Versuch Abbau (B01) <i>Pulpa direkt</i>		
		1:2	1:5	1:10
Pulpa	[ml]	200	80	40
H ₂ O	[ml]	-	120	160
Inokulum ¹	[ml]	200	200	200
Total	[ml]	400	400	400
		Startbedingungen ²		
TR	[g/l]	88.3	33.0	15.1
oTR	[g/l]	81.7	30.5	14.2
		Endbedingungen ²		
Laufzeit	[d]	103	54	54
TR	[g/l]	30.3	14.8	6.55
oTR	[g/l]	26.1	12.1	5.7
		Abbau ²		
TR	[%]	66	55	57
oTR	[%]	68	60	60

Tabelle 3: Anaerober Abbau von Pulpa, Versuch B01

Komponenten	Nummer	Versuch Limitation1 (B02) <i>Pulpa + Stickstoff & Phosphor</i>		
		1:2	1:5	1:10
Pulpa	[ml]	200	80	40
H ₂ O	[ml]	-	120	160
Inokulum ¹	[ml]	200	200	200
Total	[ml]	400	400	400
		Startbedingungen ²		
TR	[g/l]	83.8	30.0	16.5
oTR	[g/l]	75.1	27.4	15.4
		Endbedingungen ²		
Laufzeit	[d]	103	49	49
TR	[g/l]	29.4	15.35	7.6
oTR	[g/l]	24.9	12.9	6.4
		Abbau ²		
TR	[%]	65	49	54
oTR	[%]	67	53	58

Tabelle 4: Anaerober Abbau von Pulpa, Versuch B02

Komponenten	Nummer	Versuch Limitation2 (B03) Pulpa + Spurenelemente		
		1:2	1:5	1:10
Pulpa	[ml]	200	80	40
H ₂ O	[ml]	-	120	160
Inokulum ¹	[ml]	200	200	200
Total	[ml]	400	400	400
		Startbedingungen ²		
TR	[g/l]	80.48	36.28	15.08
oTR	[g/l]	76.35	32.33	13.95
		Endbedingungen ²		
Laufzeit	[d]	103	49	49
TR	[g/l]	29.8	15.95	6.25
oTR	[g/l]	23.25	14.05	5.25
		Abbau ²		
TR	[%]	63	56	59
oTR	[%]	70	57	62

Tabelle 5: Anaerober Abbau von Pulpa, Versuch B03

Komponenten	Nummer	Kontrolle
		Verdünnung
Pulpa	[ml]	1:2
H ₂ O	[ml]	0
Inokulum ¹	[ml]	200
Total	[ml]	200
		Start
TR	[g/l]	400
oTR	[g/l]	400
		Ende
Laufzeit	[d]	400
TR	[g/l]	54
oTR	[g/l]	8.0
		Abbau
TR	[%]	7.4
oTR	[%]	6
		8

Tabelle 6: Anaerober Abbau von Pulpa, Kontrolle

1) Inokulum: aktive anaerobe Kultur mit sehr geringem Gehalt an Restsubstrat

2) nur die Werte von Pulpa berücksichtigt, ohne Hintergrund an Inokulum

Die anaerobe Abbaubarkeit der organischen Fraktion von reiner Kaffee Pulpa kann als gut bezeichnet werden. Bei entsprechenden Verdünnungen wurden in den Batchversuchen Abbaugrade von 70% der oTR erreicht. Dies liegt im Bereich von Monochargen leicht verholzter oder faseriger pflanzlicher Abfälle. Die durchschnittlich höchsten Abbaugrade der Pulpa wurden bei den unverdünnten Ansätzen erreicht.

Kaffee Pulpa zeigte eine hohe Säureproduktionen in der initialen Abbauphase. Da die Selbstversäuerung bei den Ansätzen nicht über eine interne Pufferung abgefangen wurde, musste der pH durch externe Laugenzugabe kontrolliert werden. Die starke Erzeugung von organischen Säuren fand vorwiegend in den unverdünnten Versuchsserien statt und dabei ausschliesslich während den ersten 12 Tage. Innerhalb der ersten zwei Tagen konnte bei ausbleibender pH Korrektur ein Absinken des pH-Wertes auf 5.8 - 6.0 beobachtet werden, was auf hohe Konzentrationen an schnell abbaubaren Substraten (Koh-

lenhydrate) zurückzuführen ist. Die Versuche mit verdünnter Pulpa waren stabiler. Der pH-Wert sank während den ersten fünf Tage in den Bereich von unter 6.0, später bewegte er sich konstant zwischen 7.0 und 7.5. Gegen die Schlussphase der Experimente konnte ein Ansteigen des pH-Wertes aufgrund von Proteinhydrolyse und Freisetzung von Ammonium beobachtet werden. Für die Ermittlung der Abbaugrade und der spezifischen Gasproduktion wurden nur Ansätze mit kontrolliertem pH Wert berücksichtigt.

5.2.2 Substratinhibition

Der Abbau organischer Substanzen nahm bei steigender Substratkonzentration nicht ab (Tabelle 7, Abbildung 8). Für Kaffee Pulpa konnte keine Substratinhibition nachgewiesen werden.

	<i>Verdünnung</i>	<i>organischer Abbau</i>	
		[% TR]	[% oTR]
Batch (B01)	1:2	66	68
Batch (B02)	1:2	65	67
Batch (B03)	1:2	63	70
Batch (B01)	1:5	55	60
Batch (B02)	1:5	49	53
Batch (B03)	1:5	56	57
Batch (B01)	1:10	57	60
Batch (B02)	1:10	54	58
Batch (B03)	1:10	59	62

Tabelle 7: Anaerober Abbau von Pulpa in Abhängigkeit der Konzentration

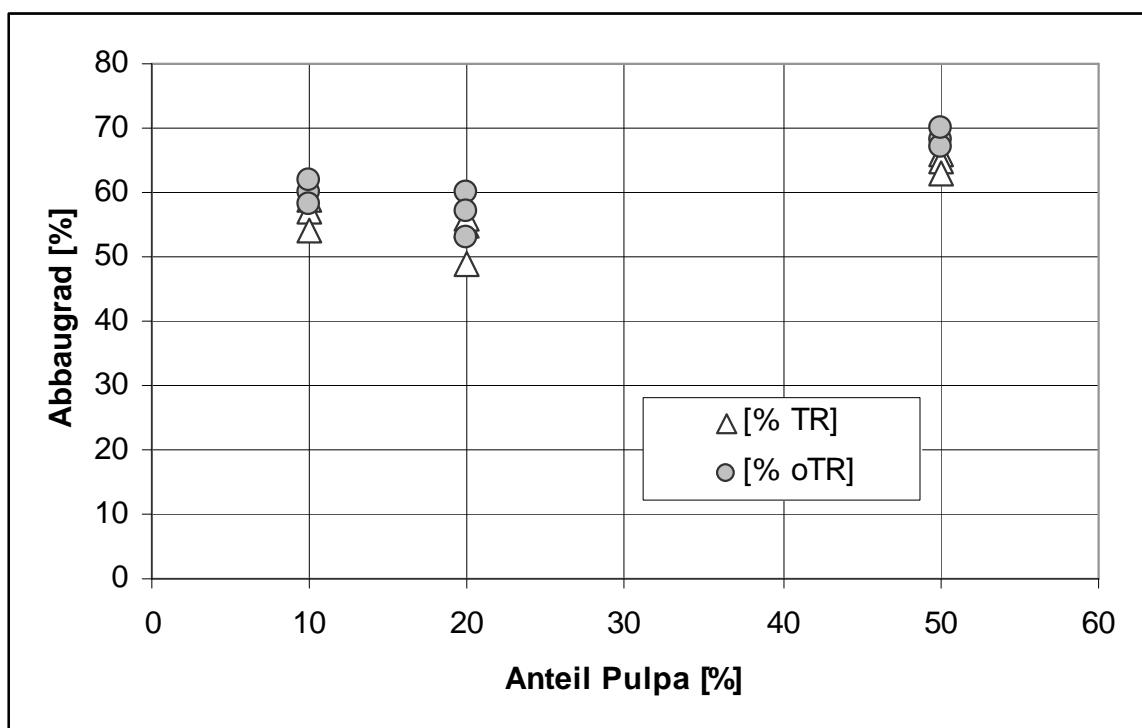


Abbildung 8: Anaerober Abbau von Pulpa in Abhängigkeit der Konzentration

5.2.3 Biogaspotential

Die anaerobe Vergärung von Kaffee Pulpa in Batchansätzen führt zu einer unmittelbaren, nicht verzögerten Biogasproduktion. Die Pulpa enthält ausreichend schnell abbaubare und nicht komplexe Kohlenstoffquellen (Kohlehydrate), welche direkt ohne Hydrolyse umgesetzt werden. Nach diesem initialen Substratabbau tritt bei hochkonzentrierten Ansätzen (50% Pulpa) eine langsamere Abbauphase ein, es ist ein deutliches diauxisches (zweiphasiges) Abbauverhalten zu beobachten (Abbildung 9- Abbildung 11). Die Hintergrundgasproduktion des Inokulums ist vernachlässigbar (Abbildung 12).

Während der zweiten, mehrwöchigen Abbauphase werden komplexe organische Inhaltsstoffe mit Hydrolyseraten von 0.8 - 1.2 kg oTR / m³ Reaktor * d umgesetzt, die spezifischen Biogasproduktionsraten erreichen Werte von 0.36 – 0.45 Nm³ Gas /m³ Reaktor * d (Tabelle 8). Das spezifischen Biogaspotential liegt bei 0.35 Nm³ / kg TR resp. 0.38 Nm³ / kg oTR (Tabelle 9). Der Methangehalt wurde punktuell ermittelt und betrug 57 – 66 %.

	Hydrolyserate kg oTR / m ³ Reaktor * d	Biogasproduktionsrate Nm ³ Biogas / m ³ Reaktor * d
Batch (B01)	1.2	0.36
Batch (B02)	0.9	0.45 (0.75 max.)
Batch (B03)	0.8	0.37

Tabelle 8: Hydrolyseraten / Biogasproduktionsraten von Pulpa

	Biogaspotential TR Nm ³ Biogas / kg TR	Biogaspotential oTR Nm ³ Biogas / kg oTR
Batch (B01)	0.35	0.38
Batch (B02)	0.35	0.38
Batch (B03)	0.35	0.38
Literaturwerte¹	0.15 – 0.35	0.2 – 0.4

Tabelle 9: spezifisches Biogaspotential von Pulpa

1) Chacon & Fernandez, 1984, Kida et al., 1994

Bei einem durchschnittlichen Gehalt an Trockenrückstand von 162 kg/m³ und einem organischen Anteil von 93% (Tabelle 2) errechnet sich ein Biogaspotential von 57 m³ Biogas pro m³ Pulpa.

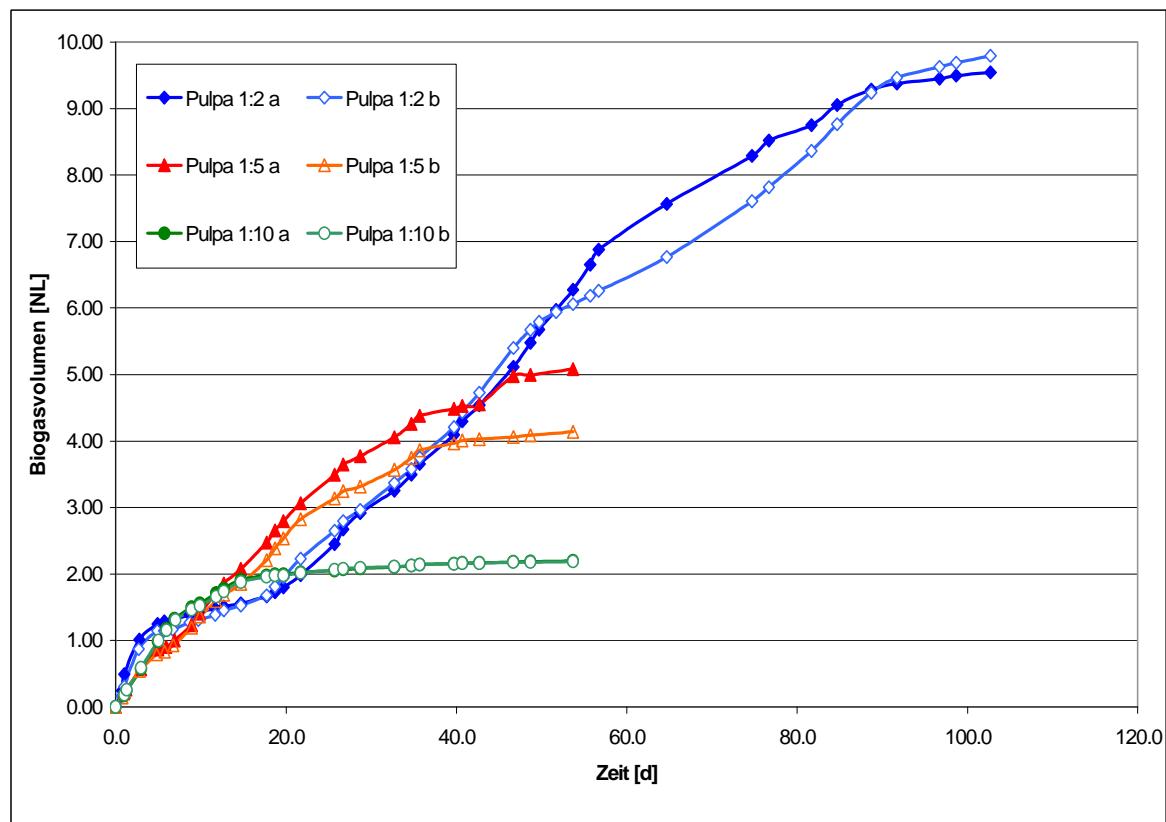


Abbildung 9: Gasproduktion Versuch B01:Pulpa direkt

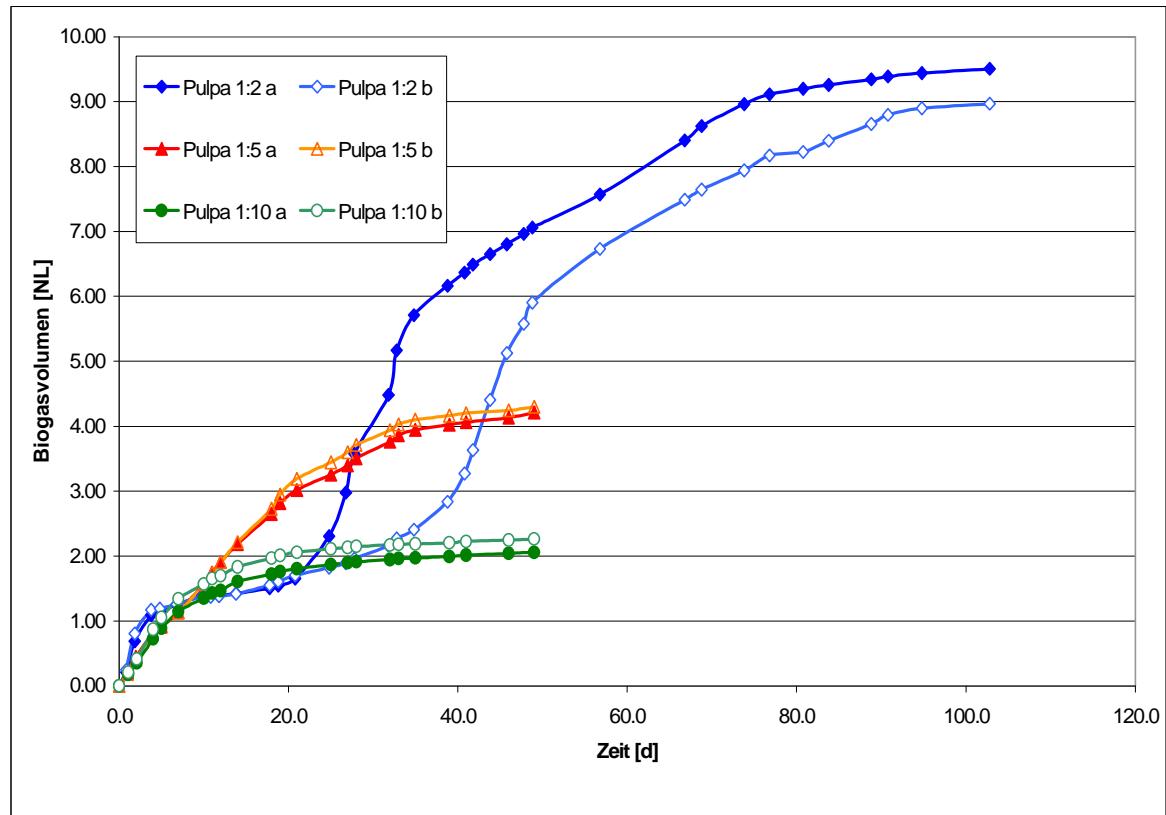


Abbildung 10: Gasproduktion Versuch B02:Pulpa mit N/P Supplementierung

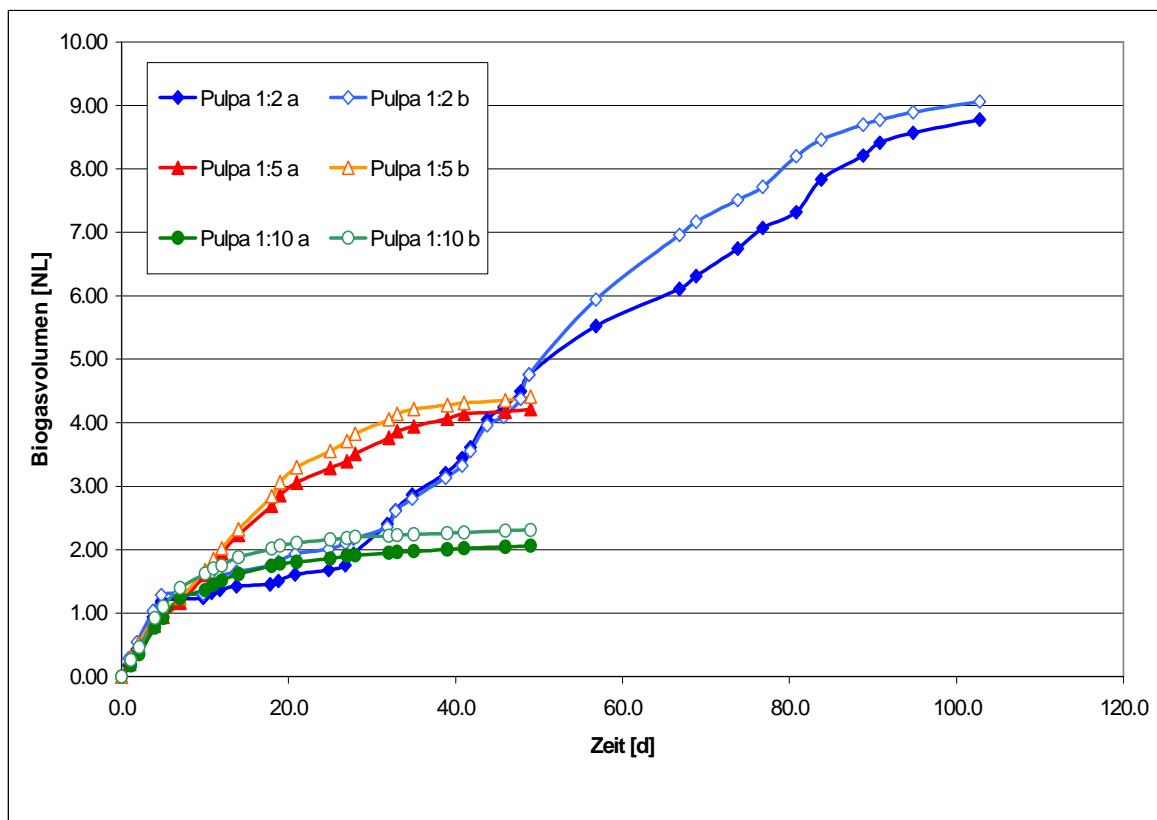


Abbildung 11: Gasproduktion Versuch B03: Pulpa mit Supplementierung Spuren

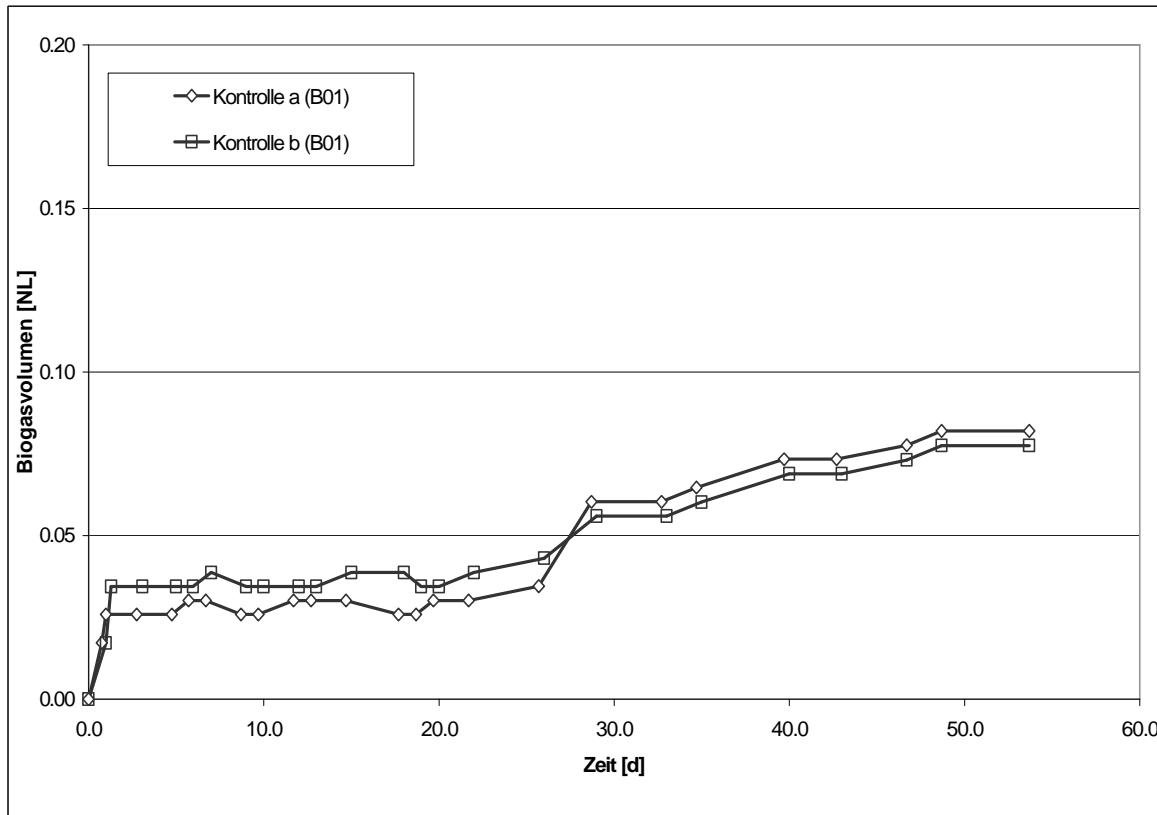


Abbildung 12: Gasproduktion Kontrolle ohne Pulpa

5.3 Semikontinuierliche Reaktorversuche

Basierend auf den Daten der Batch Ansätze wurde Pulpa in voll durchmischten Rührkeselreaktoren mit intervallmässiger Beschickung (fed batch) anaerob behandelt. Die Reaktorbeschickung erfolgte nach vorheriger Absenkung des Volumens manuell mit mechanisch zerkleinerter Pulpa. Um eine gute Durchmischung zu erreichen wurde Pulpa 1:10 resp. 1:5 verdünnt. Die Reaktoren wurden mit einer relativ tiefen TR Konzentration von 25 kg/m³ (Versuchsreihe 1) und 45 kg/m³ (Versuchsreihe 2) gefahren. Eine pH Kontrolle erübrigte sich, die pH Werte sanken bei der Substratzugabe kurz um 0.3 – 0.5 Einheiten um sich danach im leicht alkalischen Bereich zu regulieren. Tabelle 10 zeigt die Kennzahlen der beiden semikontinuierlichen Versuchsreihen.

Versuchsreihe		1	2
Reaktorvolumen	[l]	8.0	8.0
Beschickungsintervall	[d]	6-7	6-7
Hydraulische Verweilzeit	[d]	16	16
TR Raumbelastung	[kg TR/ m ³ *d]	1.02	2.1
oTR Raumbelastung	[kg oTR/ m ³ *d]	0.93	1.95
TR Abbaugrad	[%]	71	43 ¹
TR Abbaurate	[kg TR/m ³ *d]	0.72	0.91
oTR Abbaugrad	[%]	84	50 ¹
oTR Abbaurate	[kg oTR/m ³ *d]	0.78	0.97
Spezifische Biogasproduktionsrate	[m ³ Gas / kg ΔoTR]	0.98	0.62 ¹
	[m ³ Gas / kg oTR _{zu}]	0.89	- ¹
Substrat bezogene Biogasproduktionsrate	[m ³ Gas / m ³ Pulpa]	154	22 ¹
Volumenbezogene Biogasproduktionsrate	[m ³ / m ³ Reaktor*d]	0.63	0.25 ¹
pH Wert (im Gleichgewichtszustand)	[-]	7.4	7.15

Tabelle 10: spezifische Kennzahlen der semi-kontinuierlichen Vergärung von Pulpa

¹⁾ Gleichgewichtszustand nach Substratshift noch nicht erreicht.

Bei tiefer Raumbelastung (Versuchsreihe 1) zeigen sich hohe Abbaugrade und entsprechend schnelle Abbau- und Biogasproduktionsraten. Der Abbau und die Biogasproduktion liegen leicht über den in den Batch Ansätzen gemessenen Werten. Die hydraulische Verweilzeit von 16 Tagen ist bei guter Durchmischung und vollständiger Ausnutzung des Reaktorvolumens ausreichend für einen weitgehenden Abbau von 84 % des organischen Materials. Es wird eine sehr hohe spezifische Biogasproduktionsrate von 0.89 m³ Gas / kg oTRzu erreicht.

Nach Verdoppelung des Raumbelastung auf über 2 kg TR / m³*d bei gleich bleibender Verweilzeit (Versuchsreihe 2) wird während längerer Zeit kein Gleichgewichtszustand erreicht. Die Volumen bezogenen Abbauraten nehmen zwar zu, d.h. der Abbau von organischem Material findet unvermindert statt, es wird aber bei einer Verweilzeit von 16 Tagen kein stabiles Niveau im Reaktor erreicht, oTR aus Pulpa akkumuliert vorübergehend bei einem Abbaugrad von nur 50%. Der verminderte Abbau ist nicht auf Säureakkumulation und pH Absenkung zurück zu führen sondern entweder auf Abbaulimitierung durch zu langsame Hydrolyse komplexer Substratanteile (siehe auch Tabelle 8) oder auf zeitlich ungenügende Adaptation der abbauenden Biomasse.

6. Schlussfolgerungen

6.1 Nährstofflimitation

Pulpa aus der Produktion von Kaffee weist keine Nährstofflimitationen für den anaeroben Abbau auf.

Frische Pulpa aus der Kaffeeproduktion weist mit 16% einen hohen TR Gehalt auf, das Material ist nicht direkt fliessfähig oder pastös pumpbar. Die Körnung (Halbschalen der Kaffeekirsche) liegt bei 8 – 15 mm, die Schalen weisen eine teilweise harte Struktur auf und müssen vorgängig der anaerobe Vergärung mechanisch aufgeschlossen werden. Der organische Anteil der Trockensubstanz liegt im für pflanzliches Material üblich hohen Bereich von über 90%.

Basierend auf organischen Parametern ist Kaffee Pulpa für die anaerobe Vergärung sowohl mit als auch ohne weitere Nährstoff- resp. Spurenelementzusätze geeignet. Frische Pulpa weist mit C:N:P = 250:10:1 ein Nährstoffverhältnis auf, welches im für die Vergärung optimalen Bereich von (C:N:P) = 100:5:1 liegt und bereits als optimal für den anaeroben Abbau von Pulpa beschrieben wurde (Boopathy et al. 1986). Allenfalls könnte ein leichter Phosphor Mangel auftreten. In sämtlichen durchgeführten Versuchen konnte keine Limitation von Stickstoff, Phosphor oder Spurenelementen für den anaeroben Abbau festgestellt werden. Somit lässt sich Kaffee Pulpa direkt und ohne Zusatz von weiteren Substraten anaerob vergären.

6.2 Anaerober Abbau

Die anaerobe Abbaubarkeit der organischen Inhaltsstoffe von Kaffee Pulpa liegt bei über 80%.

In sämtlichen Batch Ansätzen mit Kaffee Pulpa ist ein anaerober Abbau der organischen Inhaltsstoffe von über 70% bei mesophilen Temperaturen erreicht worden, was im Vergleich mit Literaturwerten als normal bis hoch eingestuft werden kann (Boopathy, 1987). In kontinuierlich betriebenen voll durchmischten Reaktoren wurde bei tiefer Raumbelastung ein Abbau von 84% der organischen Substanz erreicht. Der Abbau findet mehrphasig statt. In einer ersten Phase werden leicht abbaubare (gelöste) Stoffe umgesetzt, während dieser Phase kann es zu einer Säureakkumulation und zu einer starken pH Absenkung kommen (Gathuo et al, 1991). Während einer zweiten Abbauphase werden komplexe Substratinhaltsstoffe hydrolysiert und abgebaut. Obwohl der Abbau weitgehend ist, wird die Hydrolyserate hier möglicherweise zum Geschwindigkeit limitierenden Schritt.

6.3 Substratinhibition

Kaffee Pulpa zeigt bei der konzentrierten Behandlung eine moderate Substrathemmung.

Die Substrathemmung ist nicht stark ausgeprägt und wie auch durch Boopathy, 1988 beobachtet höchstens beim direkten oder schwach verdünnten (1:1) Einsatz von Pulpa sichtbar. Eine Hemmung drückt sich nicht in einem vermindertem Abbaugrad sondern in einem zeitlich leicht verzögertem Abbau aus. Höhere und realistische Verdünnungen (Einmischen in Rührkesselreaktoren resp. in Substratzirkulationen bei Ppropfströmern) von 1:5 und mehr führen zu keinen messbaren Hemmungen. Damit ist es möglich, Pulpa als MonochARGE anaerob zu vergären. Die Kombination mit nährstoffreichen oder Struktur gebenden Cosubstraten ist nicht zwingend.

6.4 Biogaspotential

Das mesophile anaerobe Biogaspotential von Kaffee Pulpa liegt bei $0.38 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas pro kg organischem Trockenrückstand oTR}$

Bezogen auf den Trockenrückstand können aus Batch Ansätzen gesicherte Werte von $0.35 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas pro kg Trockenrückstand TR}$ angegeben werden. Aus semikontinuierlichen Versuchen wurden teilweise ein höheres Biogaspotential von bis zu $0.9 \text{ Nm}^3 \text{ Biogas pro kg organischer Trockenrückstand oTR}$ ermittelt. Diese Werte liegen an der Grenze des theoretisch Möglichen und sind entsprechend vorsichtig zu interpretieren.

Die in semikontinuierlicher Kultur erreichten spezifischen und Volumen bezogenen Biogasproduktionsraten sind mit Literaturwerten für Kaffee Pulpa vergleichbar, in zweistufigen Verfahren mit vorgeschalteter saurer Hydrolyse werden doppelt so hohe Werte erreicht (Kida & Sonoda, 1994).

6.5 Reaktordimensionierung

Bei einer hydraulischen Verweilzeit von 16 Tagen und einer Raumbelastung von 1 kg TR pro m^3 Reaktorvolumen und Tag kann ein stabiler Betrieb mit weitgehendem Abbau der organischen Substanz erreicht werden.

In der vorliegenden Studie hat sich die Hydrolyserate des partikulären, teilweise fasrigen organischen Anteils als Geschwindigkeit bestimmend für den Abbau erwiesen. Es konnten keine Hydrolyse- und damit Abbauraten erreicht werden, welche signifikant über $1 \text{ kg oTR / m}^3 \text{ d}$ liegen. Aus Arbeiten anderer Autoren (Lane, 1983) ist zu erwarten, dass eine adaptierte anaerobe Kultur bei Raumbelastungen von $2.5 - 3.0 \text{ kg oTR / m}^3 \text{ d}$ einen weitgehenden Abbau bewerkstelligen kann.

Bei unverdünnter Pulpa entspricht die Raumbelastung von $1 \text{ kg TR / m}^3 \text{ d}$ einer Verweilzeit von über 100 Tagen, für eine Verweilzeit von 16 Tagen muss die Pulpa ca. 10 fach verdünnt werden. Eine 10 fache Verdünnung resultiert in einem TR Gehalt von unter 2%, d.h. in einer relativ dünnen, fliess- und pumpfähigen Suspension. Realistisch für den Betrieb von volldurchmischten Reaktoren sind TR Gehalte im Bereich von 6 – 10 % TR, was einer Verdünnung von Pulpa von ca. 1:2 entspricht. Längsdurchströmte Reaktoren können mit höheren TR Gehalten von 10 – 18 % TR betrieben werden. Hier ist eine direkte Zufuhr von Pulpa in den Rezirkulationsstrom des Reaktors denkbar.

7. Implementierung

7.1 Rahmenbedingungen

Der Anfall von frischer Pulpa bei der Kaffeeaufbereitung hängt neben den angewandten Prozessschritten stark von der Grösse des Betriebes (Beneficio, Finca) ab. Für die vorliegenden groben Rechnungen wird von folgenden Rahmenbedingungen eines Modellbetriebes ausgegangen:

Jährlich verarbeitete Menge Kaffee	12'000 t / a
Verarbeitungsperiode	120 d
Verarbeitete Menge Kaffeekirschen	100 t/d
Produzierter Kaffee	21 t/d
Anfall frischer Pulpa	41 t/d
TR Fracht Pulpa	6.6 t/d
oTR Fracht Pulpa	6.1 t/d

7.2 Lagerung & Vorbehandlung

Die Lagerung von Kaffee Pulpa vor der Vergärung (Ausgleich saisonaler Schwankungen, Brechen von Spitzenanfall) sollte unter Luftausschluss erfolgen.

Klassische Flachsilos mit befahrbarem dichtem Untergrund und Abdeckung durch Kunststofffolien eignen sich gut für die Pulpa Lagerung.

Pulpa aus der Kaffeeproduktion fällt stark saisonal während weniger Monate an und kann nicht direkt dem Anfall entsprechend weiter verarbeitet werden. Eine Behandlung in einer Biogasanlage wird auf eine Zwischenlagerung der frischen Pulpa angewiesen sein. Art und Bewirtschaftung dieses Zwischenlagers hat massgeblichen Einfluss auf die Biogasproduktion.

Die offene Lagerung von Kaffe Pulpa bei Temperaturen über 15 °C unter Sauerstoffzugang hat bei hoher Luftfeuchtigkeit eine schnelle Verpilzung und bakterielle Kontamination innert Tagen bis Wochen zur Folge. Als Resultat tritt ein Abbau organischer Substanz mit entsprechender Erwärmung und Energieverlust ein. Das Material wirkt schnell unansehnlich und entwickelt unangenehme Geruchsemissionen. Es ist nicht auszuschliessen, dass durch Pilze Substanzen frei gesetzt werden, welche einen späteren anaeroben Abbau hemmen.

Eine gedeckte Lagerung von Kaffe Pulpa unter Sauerstoffausschluss hat eine schnelle spontane Milchsäuregärung (Silage) zur Folge. Die entsprechende Mikroflora ist autochthon, d.h. auf der Kaffeeepflanze vorhanden. Durch die pH Absenkung wird eine Stabilisierung erreicht, das Produkt riecht leicht säuerlich, es findet nur ein sehr geringer Vorabbau und Energieverlust statt. Organisches Material wird hauptsächlich in leicht abbaubare lösliche Säuren (Milchsäure) umgesetzt, diese sind einem späteren anaeroben Abbau und der Biogasproduktion direkt zugänglich. Da diese sauren Abbauprodukte leicht löslich sind, ist die Entstehung und der Austritt von Sickerwasser zu verhindern.

Die Lagerung in milchsaurer Gärung verhindert effizient den Energieverlust und die Bildung von gasförmigen Emissionen (CH_4 , N_2O , NH_3). Innerhalb von Monaten ist jedoch zu erwarten, dass sich auch in milchsaurer Umgebung Säure abbauende Mikroorganismen und Methanogene etablieren. Ein Lagerkonzept sollt daher von maximalen Lagerzeiten von 2-4 Monaten von der anaeroben Vergärung ausgehen. Bei Luftzutritt während der sauren Lagerung findet ein schneller Abbau der Säuren und von weiterem organischen Material statt, dies ist mit Energieverlust und Emissionen verbunden.

Mögliche Zwischenlager

Anlieferung Pulpa frisch	41 t/d
Direkte Verwertung Biogasanlage	20.5 t/d
Nach Zwischenlager	20.5 t/d
benötigte Fläche	= 2460 t/120 d ca. 1000 – 1200 m²

7.3 Biogasreaktor

Kaffee Pulpa lässt sich sowohl in einem voll durchmischten Rührkesselreaktor als auch in einem längs durchströmten Plug Flow Reaktor bei einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 30 Tagen ohne weitere Cosubstrate behandeln.

Kaffe Pulpa lässt sich direkt und ohne Zusatz von weiteren Substraten anaerob vergären, der Abbaugrad der organischen Substanz liegt mit 75 - 85% hoch. Der anaerobe Abbau erfolgt eher langsam was auf den hohen Anteil von Faserstoffen zurück zu führen ist. Vor einer anaeroben Vergärung ist die Pulpa eventuell mechanisch zu zerkleinern, auf jeden Fall aber unmittelbar und vollständig in den anaeroben Reaktor einzumischen.

Ein voll durchmischter Biogasreaktor in low cost Bauweise (Rundtank Beton, Stahl oder Kunststoff) kann eingesetzt werden. Als kritisch ist die kontinuierliche und das gesamte Volumen abdeckende Durchmischung zu betrachten. Pulpa neigt aufgrund der Gasbildung und des fasrigen Anteils zur Bildung von Schwimmdecken. Vorteilhaft wirkt die direkte Mischung und Animpfung des frischen Substrates mit der aktiven anaeroben Biologie.

Längsdurchströmte liegende Reaktoren, ebenfalls mit kontinuierlicher Durchmischung, sind mechanisch besser geeignet, mit dem Substrat Pulpa umzugehen. Eine Schwimmdeckenbildung kann hier systembedingt verhindert werden. Eine kontinuierliche Rückimpfung des frischen Substrates mit vergorenem, aktiven Material ist unumgänglich.

Eine zeitweise oder andauernde Zugabe weiterer organischer Substrate (Grünabfälle, Pflanzenmaterial, Früchte) zum Biogasreaktor ist möglich, wenn dabei die für den Abbau der Pulpa erforderlichen Aufenthaltszeiten nicht unterschritten werden und wenn keine hemmenden Stoffe eingetragen werden. Die Menge und Zusammensetzung möglicher Co-Substrate ist vorgängig fallweise zu überprüfen.

Für die rechnerische Variante wird von einem Vollastbetrieb einer Biogasanlage während 8 Monaten ausgegangen, 4 Monate Pulpa ab Produktion, 4 Monate Pulpa ab Zwischenlager. Sämtliche während der Erntezeit anfallende Pulpa wird während dieser 8 Monate = 240 Tage vergärt.

Mögliche Dimensionierung

Anfall Pulpa	20.5 t/d
TR Fracht	3.3 t TR/d
oTR Fracht	3.05 t oTR/d
Hydraulische Verweilzeit	30 d
Raumbelastung	5 kg oTR/m ³ *d
Abbaugrad	80 % oTR
Reaktorvolumen Rührkessel	615 m³
Dimensionen	Ø 14 m * h 4 m
Reaktorvolumen Ppropfströmer	615 m³ (2 * 310 m³)
Dimensionen	2 * Ø 6 m * l 11 m
Biogaspotential	0.4 Nm ³ /kg oTR
Biogasproduktion	1220 Nm³/d
Energieinhalt	6.5 kWh/Nm ³
Energieausbeute Wärme, $\eta=0.55$	180 kW
Energieausbeute Elektrizität, $\eta=0.32$	106 kW

8. Ausblick

Die vorliegende Studie hat gezeigt, dass eine auch kleinräumige und dezentrale Vergärung von Pulpa aus der Kaffeeproduktion möglich ist. Mikrobiologisch und verfahrenstechnisch sind die Grundlagen für eine technische Umsetzung vorhanden. Möglichkeiten der Lagerung frischer Pulpa sind angedacht.

Es ist vorgesehen, in Zusammenarbeit mit lokalen Produzenten (Costa Rica, Guatemala, Nicaragua) und mit Schweizer Technologielieferantinnen die Möglichkeit einer technischen Pilotierung vor Ort zu evaluieren. Mit dem Betrieb einer Pilotanlage realistischer Grösse werden folgende Themenkreise angesprochen:

- Logistik der Anlieferung und Lagerung von frischer Pulpa
- Tatsächliche Emissionssituation der milchsauren Lagerung von Pulpa
- Start up und Adaptationsverhalten des Biogasreaktors
- Hydraulisch – mechanische Optimierung der Reaktorperipherie
- Verwertung des Gärkuchens, Nachbehandlung durch Entwässerung oder Kompostierung
- Miteinbezug und Behandlung allfälliger flüssiger organischer Abfälle (Presswasser, Waschwasser)
- Technologie der Gasverwertung (BHKW), Wärme- und Energiemanagement, Definition von Verbrauchern
- Logistik der Verwertung des (nachbehandelten) Gärkuchens als Dünger
- Ökonomie im Umfeld einer dezentralen Kleinanlage oder einer zentralen Vergärungsanlage
- Finanzierungs- und Betreibermodelle

Die erfolgreiche technische Umsetzung der Vergärung von Kaffe Pulpa ist auf die Zusammenarbeit Schweizerischer und lokaler Institutionen und Produzenten angewiesen. Sie Bedarf vermutlich weiterer Fördermittel der öffentlichen Hand. Mit dem vorliegenden Projekt sind nicht nur technisch – wissenschaftliche Fragestellungen beantwortet worden. Es ist zumindest teilweise auch gelungen, die Partner für eine Realisierung eines Folgeprojekts am Produktionsstandort zu vernetzen.

9. Quellen

- Adams M.R., Dougan J. (1981). Biological management of coffee processing wastes. *Tropical Science*. 23 (3) 177.
- Ananda R.P., Ramaiah P.K. (1986). By-products of coffee berries and their possible utilisation. *Indian Coffee*. 50 (6) 3.
- Auf der Mauer A., Hofer B., Fenner H.R. (1999). Kaffeetrocknung Costa Rica. Konzeptstudie Swisscontact Services AG, Zürich.
- Boopathy R., Mariappan M. (1984). Coffee pulp: A potential source of energy. *J. Coffee Research*. 14 (3) 108
- Boopathy R., Mariappan M., Sunderasan B.B. (1986). The carbon to nitrogen ratio and methane production of coffee pulp. *J. Coffee Research*. 16 (3-4) 47.
- Boopathy R. (1987). Inoculum source for anaerobic fermentation of coffee pulp. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 26 (6) 588.
- Boopathy R. (1988). Dry anaerobic methane fermentation of coffee pulp. *J. Coffee Research*. 18 (2) 59.
- Calzada J.F., Rolz C. (1984). Utilization of coffee wastes through anaerobic digestion. *3rd Eur. Congr. Biotechnol.* (3) 103
- Chacon G., Fernandez J.L. (1984). Capacidad de la pulpa del cafe para la produccion de biogas. *Turrialba (IICA)*. 34 (2) 143.
- Field J.A., Lettinga G. (1987). The methanogenic toxicity and anaerobic degradability of a hydrolysable Tannin. *Water Research*. 21 (3) 367.
- Gathuo B., Rantala P., Maatta R. (1991). Coffee industry wastes. *Water Sci. Technol.* 24 (1) 53.
- Kayembe S., Yengula H.M., Ndunga D., Taba K.M., Litanga J. (1998). Compostage controle des parches de cafe. *Colloque sur la problematique des dechets a Kinshasa (Congo)*. Mitteilungen Universität Gent (Belgien). 64 (1) 281.
- Kida K., Sonoda Y. (1994). Liquefaction and gasification during anaerobic digestion of coffee waste by two-phase methane fermentation with slurry-state liquefaction. *J. Fermentation Bioengineering*. 77 (1) 85.
- Kida K., Teshima M., Sonoda Y., Tanemura K. (1994). Anaerobic digestion of coffee waste by two-phase methane fermentation with slurry-state liquefaction. *J. Fermentation Bioengineering*. 77 (3) 335.
- Lane A.G. (1983). Anaerobic digestion of spent coffee grounds. *Biomass*. 3 (4) 247.
- Leon R., Ortega F. (1997). Elaboracion de composta aerobica de pulpa de cafe en Zoncolica, Veracruz. *Revista Chapingo, Serie Horticultura (Mexico)*. 3 (1) 55.
- Orozco F.H., Cegarra J., Trujillo L.M., Roig A. (1996). Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia fetida*. *Biology & Fertility of Soils*. 22 (1-2) 162.
- Rechsteiner R., Elizondo R., Gómez M.T. (1998). Factibilidad de Utilizar Energias Alternativas en el Beneficiado de Café. Konzeptstudie Swisscontact.
- Sanchez G., Olgun E.J., Mercado G. (1999). Accelerated coffee pulp composting. *Biodegradation*. 10(1)35.
- Schär P. (1999). Cleaner Production in der Kaffeeaufbereitung von El Salvador, NDS-U Diplomarbeit, FHBB Fachhochschule beider Basel, Muttenz (unveröffentlicht).

- Schleiss K. (2002). Abschätzung der Methan- und Lachgasemissionen aus der Kaffeeschalenkompostierung (Broza) in Costa Rica. Expertise im Auftrag der Factor AG, Zürich
- Spicher M. (2002). Aufbau einer Vergärungsanlage für Feststoffe. Semesterarbeit Biot 99/02, Abteilung Biotechnologie, HSW Hochschule Wädenswil – Fachhochschule Zürich, Wädenswil.
- Takemoto M., Fujiwara S., Kiuchi N. (1999). The use of coffee grounds as mushroom media and recycling of spent media by composting. Bull. Agric. Res. Inst. Kanagawa. (Japan). (139) 13.
- Tauk S.M. (1985). Use of fungal inocula and pumice for decomposing coffee pulp. Agric. Ecosystems Environ. 14 (3-4) 291
- Tauk S.M. (1986) Pumice utilization on coffee compost production in Guatemala. Ciencia e Cultura (Sao Paulo). 38 (7) 1214.
- Wintrebert C. (1980). Augmentation du rendement de la methanisation des pulpes de café. Dissertation. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (France).
- Wu N. (1995). Composting coffee pulp in El Salvador. Biocycle. 36 (11) 82.