

# Verfahren zur Verwendung von Biomasse zur Energieerzeugung unter verschiedenen länderspezifischen Voraussetzungen

Elmahdi Amir

2007

## Inhaltverzeichnis

|  | Seite |
|--|-------|
| Inhaltverzeichnis .....                                    | 2     |
| Abbildungsverzeichnis .....                                | 4     |
| Tabellenverzeichnis .....                                  | 5     |
| Literaturverzeichnis .....                                 | 6     |
| 1 Einleitung .....   | 8     |
| 2 Ethanol .....  | 10    |
| 2.1 Ethanol Rohstoff .....                                 | 11    |
| 2.1.1 Das Getreide .....                                   | 11    |
| Beispiel die USA: Mais .....                               | 11    |
| Beispiel der Sudan: Sorghum .....                          | 11    |
| Beispiel Deutschland: Roggen .....                         | 13    |
| Beispiel Deutschland: Triticale .....                      | 14    |
| Beispiel Deutschland Gerste .....                          | 15    |
| Beispiel Deutschland: Weizen .....                         | 16    |
| 2.1.2 Wurzelpflanzen .....                                 | 17    |
| Beispiel Nigeria: der Maniok .....                         | 17    |
| Beispiel der Sudan: Süßkartoffel .....                     | 19    |
| Beispiel Deutschland: Kartoffel .....                      | 20    |
| 2.1.3 Zuckerhaltige Rohstoff .....                         | 21    |
| Beispiel Brasilien: Zuckerrohr .....                       | 21    |
| Beispiel die USA Zuckerrübe .....                          | 21    |
| Beispiel Greichenland: Zuckerhirse .....                   | 22    |
| 2.2 Getreide und stärkehaltige Rohstoff Verarbeitung ..... | 23    |
| 2.2.1 Stärkeaufschlussverfahren unter Druck .....          | 23    |
| 2.2.2 Drucklose Stärkeaufschlussverfahren .....            | 25    |
| 2.3 Extraktion des Zuckers .....                           | 32    |
| 2.4 Fermentation .....                                     | 32    |
| 2.5 Destillation, Rektifikation, Absolutierung .....       | 34    |
| 3 Biodiesel .....  | 36    |
| 3.1 Pflanzenöl Arten .....                                 | 36    |
| 3.1.1 Einjährige Pflanzenöl .....                          | 37    |
| Beispiel die USA: Sojabohne .....                          | 37    |
| Beispiel Russland: Sonnenblume .....                       | 38    |
| Beispiel Der Sudan: Baumwoll- Saat .....                   | 39    |
| Beispiel Deutschland: Raps .....                           | 40    |
| Beispiel Indien: Die Färberdistel .....                    | 41    |
| 3.1.2 Mehrjährige Pflanzenöl .....                         | 43    |
| Beispiel Indonesien: Kokosnusspalme .....                  | 43    |

|   |    |
|---|----|
| Beispiel der Sudan: Purgiernuss .....                         | 44 |
| Beispiel der Sudan: Neembaum .....                            | 45 |
| Beispiel Indonesia: Die Ölpalme.....                          | 47 |
| 3.2 Pflanzenölgewinnung .....                                 | 50 |
| 3.2.1 Vorbehandlung .....                                     | 50 |
| 3.2.2 Vorpressen und Extraktion des Öls.....                  | 51 |
| 3.3 Raffination.....  | 52 |
| 3.3.1 Degumming - Entschleimung.....                          | 52 |
| 3.3.2 Neutralisation .....                                    | 52 |
| 3.3.3 Bleichung (Entfärbung).....                             | 54 |
| 3.3.4 Die Desodorierung (Dämpfung) .....                      | 54 |
| 3.4 Die Umesterung.....                                       | 55 |
| 4 Thermochemische Umwandlung .....                            | 58 |
| 4.1 Vergasungsrohstoff .....                                  | 60 |
| Beispiel die USA Switchgrass.....                             | 60 |
| Beispiel China Miscanthus .....                               | 60 |
| Die Landwirtschaftlichen Rückstände.....                      | 62 |
| 4.2 Vergasung .....   | 65 |
| 4.3 Vergaser .....  | 67 |
| 4.3.1 Festbettvergaser .....                                  | 67 |
| 4.3.2 Wirbelschichtvergaser .....                             | 71 |
| 4.4 Gas Reinigung .....                                       | 73 |
| 4.4.1 Teerabscheidung.....                                    | 73 |
| 4.4.2 Partikelentfernung.....                                 | 74 |
| 5 Biogaserzeugung.....  | 77 |
| 5.1 Biogasrohstoff.....                                       | 78 |
| Bespiel Indien: der Kuhfladen.....                            | 78 |
| Beispiel der Sudan: Die Wasserhyazinthen .....                | 79 |
| 5.2 Beschreibung des Prozesses.....                           | 80 |
| 5.3 Prozess Management .....                                  | 82 |
| 5.4 Die Biogasreinigung.....                                  | 83 |
| 5.4.1 Entfernung des Schwefelwasserstoffs.....                | 83 |
| 5.4.2 Entfernung des Kohlendioxids .....                      | 84 |
| 6 Vergleich der Biomasse bezüglich der Energiegewinnung ..... | 87 |
| 7 Fazit .....   | 99 |

## Abbildungsverzeichnis

|              | Seite   |
|--------------|---|
| Abbildung 1  | Biomasse Prozesse und Endprodukte ..... 9           |
| Abbildung 2  | Rohstoffe für die Ethanolproduktion ..... 10        |
| Abbildung 3  | Mais ..... 11                                       |
| Abbildung 4  | Sorghum ..... 12                                    |
| Abbildung 5  | Roggen ..... 14                                     |
| Abbildung 6  | Triticale ..... 14                                  |
| Abbildung 7  | Gerste ..... 15                                     |
| Abbildung 8  | Weizen ..... 16                                     |
| Abbildung 9  | Maniok ..... 17                                     |
| Abbildung 10 | Süßkartoffel ..... 19                               |
| Abbildung 11 | Kartoffel ..... 20                                  |
| Abbildung 12 | Zuckerrohr ..... 21                                 |
| Abbildung 13 | Zuckerrübe ..... 22                                 |
| Abbildung 14 | Zuckerhirse ..... 23                                |
| Abbildung 15 | Der Stärkeaufschluss Verfahren unter Druck ..... 25 |
| Abbildung 16 | Der Mahl Maischverfahren ..... 27                   |
| Abbildung 17 | Der Dispergier Maischverfahren ..... 29             |
| Abbildung 18 | Sojabohne ..... 36                                  |
| Abbildung 19 | Sonnenblume ..... 37                                |
| Abbildung 20 | Baumwoll-Saat ..... 38                              |
| Abbildung 21 | Rapssaat ..... 39                                   |
| Abbildung 22 | Färberdistel ..... 41                               |
| Abbildung 23 | Kokosnusspalme ..... 42                             |
| Abbildung 24 | Purgiernuss ..... 43                                |
| Abbildung 25 | Neembaum ..... 44                                   |
| Abbildung 26 | Ölpalme ..... 46                                    |
| Abbildung 27 | Vorbehandlung des Pflanzenöl ..... 47               |
| Abbildung 28 | Thermochemische Uwandlungsprozesse ..... 58         |
| Abbildung 29 | Switchgrass ..... 60                                |
| Abbildung 30 | Miscanthus ..... 61                                 |
| Abbildung 31 | Der Vergasungsprozess ..... 66                      |
| Abbildung 32 | Gegenstromvergaser ..... 67                         |
| Abbildung 33 | Gleichstromvergaser ..... 69                        |
| Abbildung 34 | Öffnen-Kern Vergaser ..... 70                       |
| Abbildung 35 | Wirbelsichtvergaser ..... 71                        |
| Abbildung 36 | Zyklonefilter ..... 75                              |
| Abbildung 37 | Wasserhyazinthen ..... 79                           |
| Abbildung 38 | Methoden der Mischung ..... 81                      |
| Abbildung 39 | Biogasreinigung ..... 86                            |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Abbildung 40 | Minimale und maximale Energie Output aus Biomasse..              | 93  |
| Abbildung 41 | Input Energie und Output Energie aus verschiedene Pflanzen ..... | 98  |
| Abbildung 42 | Energie Output aus Ethanol Rohstoffe GJ/ha .....                 | 101 |
| Abbildung 43 | Energie Output aus Pflanzenöle GJ/ha .....                       | 102 |

## Tabellenverzeichnis

|            | Seite  |    |
|------------|--|----|
| Tabelle 1  | Inhaltstoffe verschiedener Getreide .....  | 17 |
| Tabelle 2  | Inhaltstoffe der verschiedenen Produkte vom Maniok.....  | 18 |
| Tabelle 3  | Getreide und Kartoffel Verflüssigungstemperatur beim Mahl Maischverfahren .....                      | 26 |
| Tabelle 4  | Verflüssigungs-, Verzuckerungs- (-temperatur, -rest) und pH-Wert für Weizen,Roggen, Triticale .....  | 31 |
| Tabelle 5  | Miscanthus & Switchgrass Engenschaften .....   | 60 |
| Tabelle 6  | Landwirtschaftliche Rückstände, Holz und Gras Eigenschaften .....                                    | 64 |
| Tabelle 7  | Die Eigenschaften verschiedener Vergaser .....   | 71 |
| Tabelle 8  | Chemische & physikalische Methoden für die Teerentfernung .....                                      | 74 |
| Tabelle 9  | Ernte-, Ethanolertrag und Energie aus Ethanolrohstoffe.....  | 87 |
| Tabelle 10 | Ölertrag für verschiedene Pflanzenöle .....  | 89 |
| Tabelle 11 | Biodieselertrag und erreichbare Energie aus Pflanzenöle.....   | 89 |
| Tabelle 12 | Das verhältnis der Energie von Bioseselrohstoffen pro Tonne zu Ethanolrohstoffen pro Tonne .....     | 90 |
| Tabelle 13 | Das verhältnis der Energie von Bioseselrohstoffen pro Hectare zu Ethanolrohstoffen pro Hectare ..... | 91 |
| Tabelle 14 | Erreichbare Energie aus landwirtschaftlichen Rückständen, Gras und Holz.....                         | 92 |
| Tabelle 15 | Output-Input-Energieverhältnis für verschiedene Getreide und der Maniok.....                         | 94 |
| Tabelle 16 | Output-Input-Energieverhältnis für zuckerhaltige Pflanzen..  | 96 |
| Tabelle 17 | Output-Input-Energieverhältnis für pflanzenöle .....   | 96 |

## Literaturverzeichnis

1. [http://www.fao.org/inpho/content/compend/toc\\_main.htm#TopOfPage](http://www.fao.org/inpho/content/compend/toc_main.htm#TopOfPage) abgerufen
2. <http://www.defra.gov.uk/erdp/pdfs/ecs/miscanthus-guide.pdf> abgerufen
3. B.T.Nigagun. *Biogas Technology*.
4. Bassam, N. E. (1998). *Energy Plant Species: their use and impact on environment and development*. James & James/Earthscan.
5. Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. CRC Press.
6. Craig John Pearson, M. J. (1995). *The Ecology of Tropical Food Crops*. Cambridge University Press.
7. David Branshy, A. U.  
<http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/switchgrass-profile.html> abgerufen
8. David P. Chynoweth, R. I. (1987). *Anaerobic Digestion of Biomass*. Springer.
9. de.Souza-Santos, M. L. (2004). *Solid Fuels Combustion and Gasification: modeling, simulation, and equipment operation*. CRC Press.
10. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. (August 2004). Von <http://www.icrisat.org/satrends/aug2004.htm> abgerufen
11. M. Kaltschmitt, H. (2001). *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer.
12. Mark Finkelstein, B. H. (2000). *Twenty-First Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Humana Press.
13. *Mother's Alcohol Fuel Seminar* © *The Mother Earth News*, 1980. Von [journeytoforever.org/biofuel\\_library/ethanol\\_motherearth/meCh2.html#2\\_2](http://journeytoforever.org/biofuel_library/ethanol_motherearth/meCh2.html#2_2) abgerufen
14. O'Brien, R. D. (2004). *Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications*. CRC Press.

15. Quaak, P. K. (1999). *Energy from Biomass: a review of combustion and gasification technologies*. World Bank Publications.
16. Richardson, M. (1996). *Environmental Xenobiotics*. CRC Press.
17. Roehr, M. (2001). *The Biotechnology of Ethanol: Classical and Future Applications*. Wiley-VCH.
18. Ronald M Dell, D. A. (2004). *Clean Energy*. Royal Society of Chemistry.
19. S. B. McLaughlin, O. R. Evaluating physical, chemical, and energetic properties of perennial grasses as biofuels. Von <http://bioenergy.ornl.gov/papers/bioen96/mclaugh.html> abgerufen
20. Salunkhe, D. K. (1992). *World Oilseeds: Chemistry, Technology, and Utilization*. Springer.
21. Sergio V. Bajay, F. R. *Industrial uses of biomass energy: The Example of Brazil*. CRC Press.
22. Sims, R. E. (2002). *The Brilliance of Bioenergy: In Business and in Practice*. James & James/Earthscan.
23. Tarun Kumar Ghose, P. G. (2003). *Biotechnology in India*. Springer.
24. U. von Stockar, L. A. (2003). *Process Integration in Biochemical Engineering*. Springer.
25. W. (Wolfgang) Palz, D. O. (1985). *Energy from Biomass: 3rd E.C. Conference*. Taylor & Francis.
26. Wyman, C. E. (1997). *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization*. Taylor & Francis

## 1 Einleitung

Biomasse ist ein Überbegriff, der die Gesamtheit aller organischen Substanzen in unserem Ökosystem beschreibt. Der Energiewert der Pflanzensubstanz entsteht durch Sonneneinstrahlung. Der Prozess, welcher als Photosynthese bekannt ist, beschreibt die Reaktion zwischen Pflanze, Licht, Wasser und Kohlendioxyd. Pflanzen besitzen Pigmente (Farbstoffe), die Licht absorbieren können, dadurch werden Elektronen angeregt, die Energie zur Bildung von energiereichen biochemischen Bindungen erzeugen. Das bedeutendste Pigment der Pflanzen ist das Chlorophyll.

Die chemische Energie, die in der Pflanzen- und Tierwelt erzeugt wird und auch in den organischen Restprodukten, wie zum Beispiel Exkrememente, organischer Hausmüll, Schlachthofabfälle oder Papier usw. gespeichert ist, wird als Bioenergie bezeichnet. Während der Umwandlungsprozesse, wie beispielsweise der Verbrennung, gibt Biomasse seine Energie häufig in Form von Hitze frei und das enthaltene Karbon wird zu Kohlendioxyd umgewandelt. Das freigesetzte, für die Pflanze lebensnotwendige Kohlendioxyd, welches während ihrer Wachstumsphase aufgesogen wurde, wird nun wieder an die Umwelt abgegeben. Dadurch besitzt die Verwendung der Biomasse um Energie zu erzeugen, einen großen Vorteil. Es entsteht kein zusätzliches Treibhausgas CO<sub>2</sub>.

Der Gebrauch von Biomasse, um Energie zu erzeugen, kann in zwei Kategorien unterteilt werden, welchen in die moderne und traditionelle Biomassenverwertung getrennt werden kann. Die moderne Energieerzeugung mit Biomasse bezieht sich auf den großräumigen Gebrauch. Das Ziel ist es herkömmliche fossile Brennstoffe und Energiequellen zu ersetzen. Sie schließt Waldholz und landwirtschaftliche Rückstände ein, städtische Abfälle und Pflanzen welche für die Biogas- und Energieerzeugung angebaut werden. Die Traditionelle Biomasse wird im Allgemeinen in Entwicklungsländern für den kleinräumigen Gebrauch angewendet. Sie schließt Brennholz und Holzkohle für den Hausgebrauch, sowie andere landwirtschaftliche Rückstände wie beispielsweise Reishülsen ein. Welche Art der Energienutzung durch Biomasse ist also zudem von politischen und soziologisch-ökonomischen Faktoren abhängig.

Es gibt vier Arten um mit Biomasse Energie zu erzeugen. Das Endprodukt kann flüssig oder gasförmig sein. Bei der flüssigen Form handelt es sich entweder um Biodiesel oder Ethanol. Biodiesel entsteht durch den Umesterung der bei Raffinierung des Pflanzenöls stattfindet. Ethanol wird durch Fermentation von stärkehaltigen bzw. zuckerhaltigen Rohstoffen (Getreide, Wurzelpflanzen, zuckerhaltigen Stoffen). Die gasförmigen Arten sind die thermochemische Umwandlung und die anaerobe Verfaulung.



Bei dem anaeroben Umwandlungsprozess wird zielgesetzt als Endprodukt Methan erzeugt. Bei der thermochemischen Umwandlung entstehen Gasmischungen. Die Prozessbeschreibung der Umwandlung für die verschiedenen Prozesse, sowie die jeweils geeigneten Rohstoffe werden in dieser Arbeit erklärt.

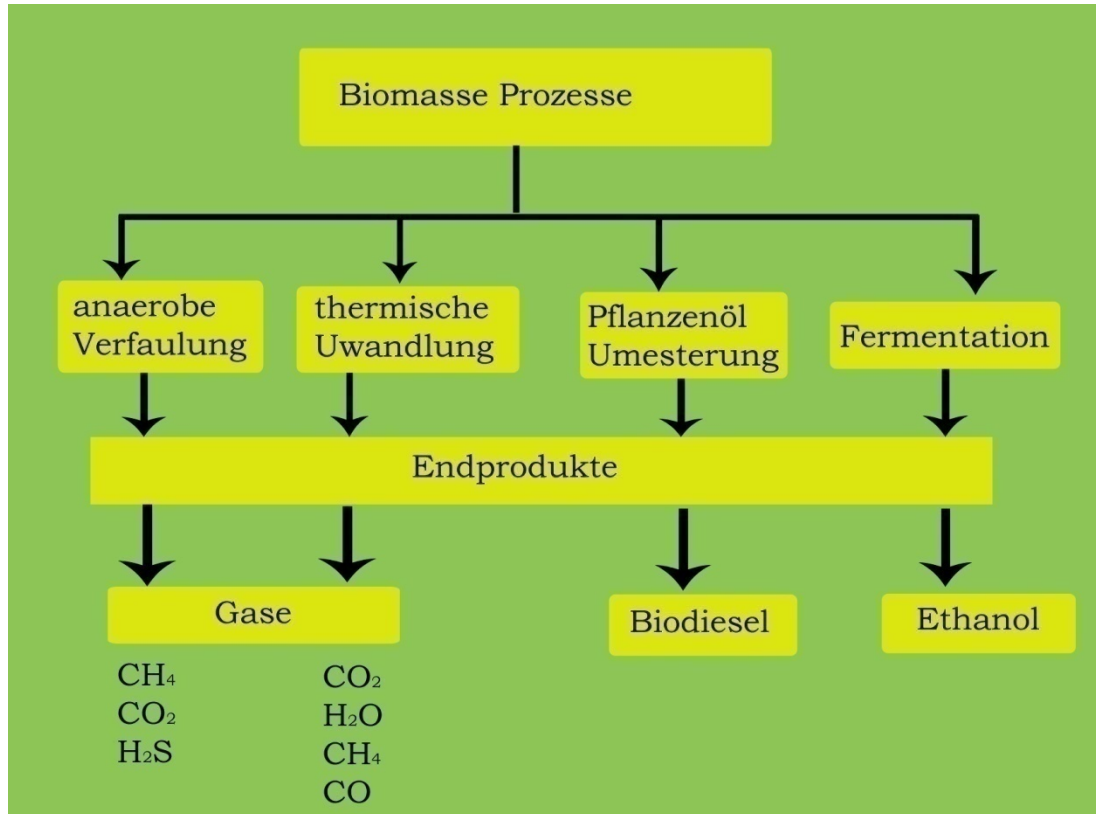
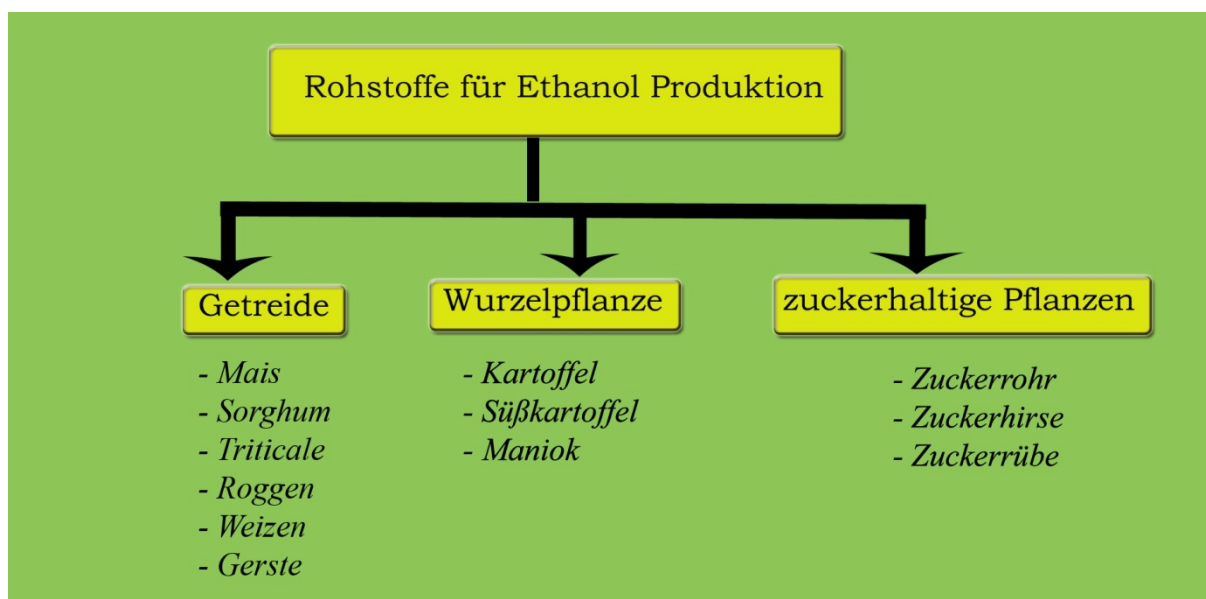


Abbildung 1 Biomasse Prozesse und Endprodukte

## 2 Ethanol

Zucker wird benötigt, um Ethanol durch Gärung zu produzieren. Die Rohstoffe (Korn, Stämme und Blätter) bestehen hauptsächlich aus Zucker, also können prinzipiell fast alle möglichen Pflanzen als Rohstoffe für die Ethanol Herstellung dienen. In der Praxis hängt die Wahl des Rohstoffes von den vorherrschenden Zuständen des Klimas, der Landschaft und des Bodenaufbaus, sowie vom Zuckergehalt und von der Verarbeitungsmöglichkeit, im Bezug auf die daraus resultierenden Kosten und die notwendigen Technologie, der verschiedenen vorhandenen Pflanzen ab. Die Rohstoffe für die Ethanol Produktion können in drei Kategorien eingestuft werden, die in Abb. 1 gezeigt werden. Zu jeder dieser Hauptgruppen der Rohstoffe für die Ethanol Produktion gibt es eine Untergruppe, die die verschiedenen Rohstoffe länderspezifisch auflistet. Die Verarbeitung der Rohstoffe zum Zweck der Ethanolgewinnung wird nun in meiner folgenden Arbeit erläutert.



**Abbildung 2 Rohstoffe für die Ethanolproduktion**

Das Bioethanol kann als Kraftstoff auf unterschiedliche Weise verwendet werden: direkt in speziellen oder modifizierten Verbrennungsmotoren, gemischt mit Benzin an den verschiedenen Prozentsätzen oder nach Umwandlung in Ethyl tertiär butyl ether (ETBE).

## 2.1 Ethanol Rohstoff

### 2.1.1 Das Getreide

#### Beispiel die USA: Mais

Mais ist heute die dritt wichtigste Getreidepflanze auf der Welt nach Weizen und Reis. Einige Faktoren erklären den Wert von Mais: Mais kann sich unterschiedlichen Temperaturen (Mais erträgt die Hitze Afrikas und die



kühleren Wetter Europas, nur den Frost erträgt er nicht), dem Boden und den Feuchtigkeitsniveaus anpassen und ist widerstandsfähig gegen Erkrankungen und Insekten, hat ein hohes Ergebnispotential und wird für den Verbrauch von Mensch und Tier verwendet. Der Mais entwickelte sich aus einer Waldpflanze Teosinte vor über 9000 Jahre und entstand anscheinend in Mexiko, und verbreitete sich dann in Amerika, Europa und Asien. Der Mais gehört zur Familie der

**Abbildung 3 Der Mais**

Süßgräser (Gramineae) und ist ein einjähriges Gras. Ende April oder Anfang Mai wird der Mais gesät, im September oder Oktober ist der Mais erntereif. In den USA werden über 90% des Mais für Tierfutter (Benson und Pearce 1987) und 10% für Nahrung wie Getreidemehl, Imbisse, Tortillas, Frühstückskost aus Getreide, usw. verwendet. (Rooney und Serna-Saldivar 1987). Andererseits wird in Afrika und in einigen der asiatischen Länder fast 90% des angebauten Mais für den menschlichen Verbrauch benötigt. (Uhlig und Bhat 1979).

Mais ist ein sehr wichtiger Rohstoff für die Ethanol Produktion in den USA und in Südamerika. Die Eignung von Mais für die Ethanol Produktion hängt von dessen Inhalt, der Stärke und des hornigen Endosperms ab. Ein großer Bestandteil des hornigen Endosperms führt zu Problemen bei der Ethanol Produktion. Das Fett, das im Mais enthalten ist, verhindert die Bildung von Schaum während der Gärung. Wenn man Mais kauft, muss sein Wassergehalt und die Reinlichkeit beachtet werden, da somit vorbereitende Produktionsschritte verringert werden können.

Mais besteht aus Stärke, Zucker, Öl, Faser, Protein und Asche. Stärke und Zucker setzt den größten Teil (60%) des Maiskerns fest, von dem die meisten im Stärkemais ist. Protein oder Gluten ist der folgende größte Bestandteil (ungefähr 10% des Trockengewichts des Mais). Das Öl des Kerns ist ungefähr 4-5%, und Faser ist 3-4%. Faser enthält zellulosehaltiges Kohlenhydrat.

Die Asche besteht die restlichen 2%, und der Feuchtigkeitsgehalt des Korns beträgt in den Allgemeinen ungefähr 15%.

Die Ertrag von Mais erreicht ungefähr 6-10 t/ha in den USA und Westeuropa. Demgegenüber stehen die Erträge von 0.5 t/ha oder weniger in Mittelamerika, in Sub-Sahara Afrika und in Asien. Diese Schwankungen bei den Ergebnissen resultieren aus den klimatischen-, technologischen und institutionellen Faktoren. 100 kg Korn erbringen ungefähr 40 Liter Alkohol (IA).

Das hornige Endosperm vom Mais ist elastisch. Dies führt zu schlechten Mahlergebnissen, da gemahlener Mais klebrig bleibt, selbst wenn ein 1.5 Millimeter Sieb benutzt wird. Die Nutzung eines kleineren Siebs ist nicht empfehlenswert, da das Fett herausgefiltert wird und somit zu einem sehr kleinen Durchsatz bei der Vermahlung oder zum Verstopfen des Siebes führt. Die klebrigen Partikel, die beim Pressen entstehen, lösen sich nicht vollständig während des Maischeprozess und der Fermentation auf. Dies führt zu einer langsameren Gärung und zu Verlusten beim Ethanolertrag. Eine praktisch komplette Freisetzung von Stärke wird nur mit Stärkeaufschlussverfahren unter Druck oder Dispergier-Maischverfahren garantiert. Jedoch ist es unmöglich die Ethanol Verluste mit Stärkeaufschlussverfahren unter Druck zu vermeiden, da aufgrund der Maillard-Reaktion und Karamelisierung während des Maischeprozesses Ethanol unwiderruflich verloren geht.

### Beispiel Der Sudan: Sorghum

Sorghum ist eine tropische Pflanze, die zur Familie Poaceae gehört. Während sie im Sudan, wie auch in ganz Afrika, die zweitwichtigste Getreidesorte nach Mais ist, ist die weltweite Produktion die fünft größte nach Weizen, Mais, Reis und Gerste. Mehr als 35% von Sorghum wird direkt für den menschlichen Verbrauch angebaut. Der Rest wird haupt-sächlich für



Tierfutter, zur Alkoholproduktion und als Industrieprodukt verwendet. (FAO, 1995; Awika und Rooney, 2004a. Dabei wird Sorghum aber auch sehr häufig zur illegalen Herstellung von Alkohol im Sudan benutzt. Sorghum ist zur Nahrungsmittelsicherheit in Afrika von besonderer Bedeutung, da es unter allen Getreidesorten einzigartig trockenfest ist und Dauerhaft hohen Temperaturen widerstehen kann.

**Abbildung 4 Sorghum**

Die exakten Gründe für die Klimatoleranz des Sorghums werden nicht völlig verstanden, und sind ohne Zweifel auf viele Faktoren zurückzuführen. Die Fruchtwand (Perikarp)(äußere Schicht des Sorghumkorns) ist zerreibbarer als die der meisten anderen Getreide. Dies ist im Trockenmahlen nachteilig, da das Mehl mit Kleie kontaminiert werden kann. Die zerreibbare Struktur der Sorghumfruchtwand hängt vermutlich mit der Tatsache zusammen, dass sie unter den Getreiden fast einzigartig viele Stärkekörnchen enthält.

Das Sorghum Korn verfügt über Gelb und Braun farbigen Arten, die keine bedeutenden Unterschiede im Bezug auf die Inhaltstoffe zeigen. Eine durchschnittliche Analyse des Sorghums bringt folgende Ergebnisse: Der Stärkeanteil von Sorghum beträgt ungefähr 62-65% und wirft ungefähr 40 Liter Alkohol pro 100kg ab. Ein erheblicher Anteil der Sorghum Sorten enthalten kondensierte Tannins, die in den Schichten des Testa (Samenschale) des Kornes sind (Awika und Rooney, 2004). Tannins konvertieren wertvolle landwirtschaftliche Eigenschaften auf Sorghum, einschließlich Schutz gegen Insekten, Vögeln und Wetterbeschädigung ((Waniska et al., 1989)). Jedoch inaktivieren Tannins die extrahierten Malzamylosen(Beta et al., 2000a-c; Daiber, 1975a), was zu einem bedeutsamen Stärkezusammenbruch führt und die Zuckerproduktion während der Vergärung erheblich verringert. Wenn man Sorghum kauft, muss seine Reinlichkeit überprüft werden und von Sand und Kornkäfer frei sein. Da Sorghum wächsern ist, wird die Verflüssigung der Korn nicht einfach. Deshalb sollte entweder mit Stärkeaufschluss Verfahren unter Druck oder vorzugsweise, aufbereitet, indem es Dispergier-Maischverfahren und die wiederverwendete Schlempe verarbeitet wird.

Unter den unterschiedlichen Arten des Sorghums, gibt es die mit dem wachsartigen Endosperm, die mehr als 95% Amylopektin und eine verhältnismäßig schwache Proteinmatrix enthalten. Diese sind anfällig für die Hydrolyse durch die amolytischen und proteolytischen Enzyme. Diese Eigenschaften erhöhen ihre Verarbeitung und Ernährungswerte. Alle diese Eigenschaften plus die Tendenz, schnell zu gelatinieren als regelmäßige Endospermarten, machen wächserne Sorghums attraktiver für die industriellen Ethanolproduktion.

### Beispiel Deutschland: Roggen

Roggen gehört zur Familie der Süßgräser (Gramineae). Von allen Getreiden hat Roggen die größte Toleranz zu den unterschiedlichen klimatischen Einflüssen sowie zu den Bodenzuständen. Verglichen mit anderen Wintergetreiden, ist Roggen das kältebeständigste vorhandene Getreide. Er wird im Oktober gesät und kann im August des folgenden Jahres geerntet werden. An einer Ähre wachsen etwa 40 bis 50 neue Körner.

Die Halme werden bis zu 2 m hoch wobei sie trotz dieser Höhe noch sehr stabil sind. Dennoch können sie bei starkem Wind oder Unwettern brechen. Der Stärkegehalt des Roggens liegt ungefähr 2-4% niedriger als Weizen. Roggen ist auch ein wichtiger Rohstoff in den deutschen Kornbrennereien, da aus 100 Kilogramm Roggen bis zu 37 Liter Ethanol entstehen können.



Roggen enthält *Pentosans*, das die Verarbeitung des Roggens zum Ethanol (*Pentosans*) beeinflusst. Eine hohe Konzentration des *Pentosans* führt zu hoher Viskosität in der Maische. Diese hohe Viskosität besteht während des Maischeprozesses und der Fermentation fort. Dieses Problem kann gelöst werden, indem man *Pentosanas* verwendet, das ziemlich teuer ist, oder indem man einen bestimmten Maischeprozess verwendet, der weiter unten

**Abbildung 5 Roggen**

noch näher erläutert wird. Bei der Verwendung von *Pentosanases* im Prozess, wird dieses in die Maische zusammen mit dem verflüssigenden Enzymen gegeben, wobei darauf zu achten ist, dass die Verflüssigungstemperatur nicht 60°C übersteigt, da *Pentosanases* bei Temperaturen über 60°C nicht beständig(stabil) ist. Roggen enthält einen hohen Grad an aktiven autoamylolytischen Enzymsystemen und deshalb ist er folglich für das Drucklose Stärkeaufschlussverfahren verwendbar.

### Beispiel Deutschland: Triticale

Triticale ist die erste künstliche Kulturgetreideart. Ihre Formen entstehen durch experimentell herbeigeführte Genoaddition aus Weizen und Roggen. Triticalearten sind wegen ihrer Winterfestigkeit, Anspruchslosigkeit und



Resistenz gegenüber einer Reihe von Krankheiten eine mögliche Schlüsselkultur für den Getreideanbau in nördlichen Ländern. Es ist ein sehr wichtiger Rohstoff, der in der Ethanol Produktion seit wenigen Jahren benutzt wird. Der Stärkegehalt beträgt ungefähr 60% der ursprünglichen Substanz, die zu einem Ethanol Ertrag von 38 IA (Liter Alkohol) pro 100kg führt. Triticale enthält keine beträchtlichen Mengen an Pentosane und so gibt es keine Probleme betreffend der

**Abbildung 6 Triticale**

Viskosität der Maische. Da eine Vielzahl von Triticale eine hohe Autoamylolytische Enzymaktivität aufweist, ist es folglich möglich, Triticale mit jedem zusätzlichen Verzuckerungsenzym zu verarbeiten. Triticale selbst ist möglicherweise eine reiche Quelle von Verzuckerungsenzymen, die in der Brennerei benötigt werden. Die Zusammensetzung von Triticale ist selten überprüft worden, daher liefert die Tabelle 1 nur ungefähre Werte.

### Beispiel Deutschland Gerste

Gerste kann das erste Korn gewesen sein, das überhaupt von den Menschen gegessen wurde. Sie stammt ursprünglich aus Ostasien, unter anderem



auch aus China. Im September/Oktober wird die Wintergerste gesät. Aus ihr gewinnt man Futter für Tiere. Die Sommergerste sät man in Deutschland im März oder April. Sie benötigt nur knapp 100 Tage bis zur Reife. Gerste hat die härtesten Körner, und es wächst im kühlen Klima gut. Bei der Ethanol-Produktion wird Gerste meistens zur Malzgewinnung benutzt. Da sie sehr gut in Osteuropa wächst, ist es auch ein interessanter Rohstoff bei der Ethanolproduktion in dieser Region.

**Abbildung 7 Gerste**

Eine durchschnittliche Analyse der Gerste zeigt, dass die Hauptbestandteile eines Gerste-Kornes, Stärke (50 - 70 % Trockengewicht), Protein (9 - 12% Trockengewicht) und  $\beta$ -Glucans (3 - 5%) sind. Diese Werte können Schwankungen unterworfen sein, die man auch in der Literatur findet, da es Unterschiede bezüglich der Genoart, der Klimabedingungen und der Messtechniken, besonders für Stärke gibt.

Bei der Verarbeitung von Gerste zu Ethanol muss man drei Ansichten betrachten. Erstens, die Hülse, welche die Kerne umhüllt, die aufgrund ihrer Härte ein Problem darstellt, wenn die Gerste mit dem Drucklosen Prozess verarbeitet wird. Dieses Problem kann bei der Vermahlung mit einem Sieb, dessen Durchsatz kleiner als 4 mm ist, stark verringert werden. Das zweite Problem ergibt sich während des Maischeprozesses, wenn die Graupe stark aufquillt und somit die Stärke, die in ihr enthalten ist, nicht freigegeben werden kann. Deshalb ist ein Despergierungsschritt notwendig, wenn man Gerste verarbeitet. Ein drittes Problem beim Prozess der Maischeherstellung ist das in der Gerste enthaltene  $\beta$ -Glukan. Es führt zu hoher Viskosität während der Vergärung der Gerste am Anfang des Maischeprozesses. Wenn die Maische bis zur gelierenden Temperatur der Stärke erhitzt wird, können Viskositätszunahmen erfolgen, die nicht zu kontrollieren sind. Die Aufspaltung des  $\beta$ -Glucans kann, durch die Verwendung des  $\beta$ -glucanases,

das allerdings ziemlich teuer ist, oder durch die Verwendung eines bestimmten Maischeprozesses erfolgt. Der Inhalt der Stärke des Restes beträgt ungefähr 55%, dieser Gersterest erbringt über 35 IA (Liter Alkohol) pro 100kg FS (Feststoff).

### Beispiel Deutschland: Weizen



Weizen ist das weltweit am häufigsten produzierte Getreidekorn, danach folgt Reis und Mais. Weizen ist ein wildes Gras (Grammineae Familie). Es stammt aus den trockenen Ländern Westasiens und wird seit der Steinzeit als Nahrungsmittel benutzt. Weizen kann als Frühlings oder Winterart eingestuft werden. Die erste Art, wird im Frühjahr ausgesät und im Spätsommer geerntet. Ihre Ergebnisse sind normalerweise niedriger als die des Winterweizens, da dieses im Spätsommer oder im Herbst ausgesät wird und somit in der Lage ist, einen größeren Nutzen aus der energiereicheren Sonneneinstrahlung und der Feuchtigkeit zu ziehen. Vorausgesetzt das die niedrigen Temperaturen die Pflanzen nicht im

**Abbildung 8 Weizen**

Wachstumsprozess behindern oder im schlimmsten Fall sogar töten. Weizen ist ein Getreide, das an viele verschiedene Umgebungsbedingungen angepasst ist. Es wächst, bei mäßiger Bewässerung, sowie bei den vorherrschenden Regen, und verträgt eine klimatische Spannbreite von feuchtwarmen bis hin zu trockenkalten Klima. Ohne Zweifel hat diese große Anpassungsfähigkeit ihren Ursprung in der komplizierten Struktur des Genoms des Weizens, das dem Getreide eine große Plastizität zur Verfügung stellt.

Der Stärkegehalt des Weizens hat normalerweise eine Höhe von ungefähr 60% und führt zu einem Ethanolertrag von 38IA pro 100kg. Wenn der Proteingehalt des für die Ethanol Produktion mit dem Pressureless Verfahren benutzten Weizens mehr als 13% beträgt, tritt bei der Vergärung ein Problem auf. Dieses liegt darin, dass die Maische während der Gärung zur Schaumbildung tendiert. Die Lösung dessen ist die Verwendung von Antischaummittel (z.B., Silikonantischaummittel) während der Gärung.

Die Möglichkeit das drucklose Verfahren zu benutzen, hängt von der Tätigkeit des autoamyloytic Enzymsystems ab. Die pressureless Verfahren sind ohne Probleme möglich, wenn der benutzte Weizen ein AAQ von 95% oder höher aufweist. Im Allgemeinen ist die Verarbeitung des wächsernen



Weizens problematisch und erfordert eine sehr wirkungsvolle Aufspaltung der Rohstoffe und deshalb ist es empfehlenswert das Stärkeaufschluss Verfahren unter Druck anzuwenden.

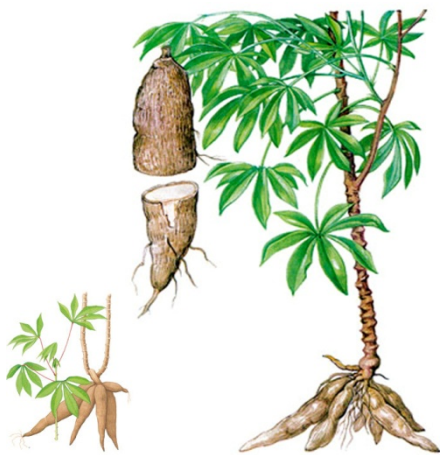
**Tabelle 1 Inhaltstoffe verschiedener Getreide**

| Art       | Protein | Stärke | Fett    | Faser   | Asche   | Wasser |
|-----------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| Mais      | 8-10    | 60-65  | 4-5     | 2.0     | 1.5     | 15.1   |
| Sorghum   | 9-12    | 62-65  | 3-4.5   | 3       | 1.5-3   | 11-12  |
| Roggen    | 11.6    | 69.0   | 1.7     | 2.1     | 1.9     | 13.7   |
| Triticale | 17.3    | 73.8   | 1.8     | 3.1     | 2.3     | -      |
| Gerste    | 9-12    | 50-70  | 2.2±0.5 | 5.3±1.5 | 2.8±0.7 | -      |
| Weizen    | 11.7    | 60-70  | 2.0     | 2.0     | 1.8     | 13.7   |

### 2.1.2 Wurzelpflanzen

#### Beispiel Nigeria: der Maniok

Der Maniok ist eine weit verbreitete industrielle Pflanzenart aus der Gattung *Manihot* in der Familie der Wolfsmilchgewächse (*Euphorbiaceae*). Er wird meistens in den Tropen wegen seiner stärkehaltigen Rhizome angebaut.



**Abbildung 9 Maniok**

Tatsächlich stammt er ursprünglich aus Südamerika und wurde später in anderen tropischen Teilen der Welt verbreitet. Nigeria ist der größte Produzent von Maniok in der Welt. Dort wird momentan Maniok hauptsächlich als Nahrungsmittel angebaut, und wird besonders in Form der traditionellen Gerichte Gari, lafun und fufu verzehrt, womit ihm nur eine geringe oder fast keine Bedeutung als industrieller Rohstoff im Primären Sektor zugewiesen

werden kann. Im ausgewachsenen Zustand erreicht er eine Höhe von ungefähr 1.5-3m und wird für hauptsächlich wegen seiner Wurzelknollen angebaut, die einen Durchmesser von 4-10 Zentimeter haben und eine Länge von mehr als 1m erreichen. Die Größe und die Form der Maniok Wurzel hängt von den Klimabedingungen ab. Der Maniok wird bis zu einer maximalen Höhe von 2000m kultiviert. Er wächst sehr gut bei feuchtwarmem Klima, mit einer Mitteltemperaturspanne von 25-29 C. Er lässt zwar Dürre zu, wächst aber besonders gut in Regionen mit einem vorhandenen Niederschlag von 100-200mm. Der beste Boden zum

Maniokanbau ist leichter, sandiger Lehmboden der mittleren Fertilität und mit guter Entwässerung.

**Tabelle 2 Inhaltstoffe der verschiedenen Produkte vom Maniok** Buitrago et al.(2002)

| Inhaltstoff        | Mehl   | Stärke | Chips  | Pellet |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| Feuchtigkeit (max) | 12-14% | 12-14% | 12-14% | 12-14% |
| Stärke (min)       | 70 %   | 80%    | 70 %   | 68-70% |
| Sand (max)         | 2%     | 2%     | 3%     | 3%     |
| Faser (max)        | 3%     | 1%     | 3-5%   | 3-5%   |
| Ashe (max)         | 3%     | 1%     | 3%     | 3%     |

Die Maniok Wurzeln enthalten im Allgemeinen 20-30 Gew. % Stärke und 1-2 Gew.% Protein. Der Maniok kann zu einigen Sekundärprodukten des industriellen Markts verarbeitet werden. Diese Produkte schließen Chips, Pellets und Mehl ein, die wichtige Rohstoffe in der Vieh Industrie darstellen. Der Maniok enthält Gifte eines Cyanogenic Glukoside, weshalb es in der Ethanol Produktion empfehlenswert ist, um den Maniok mit Stärkeaufschluss unter Druck zu verarbeiten. Auf diese Art werden Maniok Produkte durch Entlüftung entgiftet. Es ist auch möglich Maniok mit anderen Prozessen zu verarbeiten, die auf der Addition von Natriumthiosulfat basieren, um es zu entgiften. Ein besonders wichtiger Schritt bei der Vorbereitung ist die Reinigung des Manioks und seiner Produkte vom Sand, der nach der Ernte noch an der Wurzel haftet, da er sonst bei der späteren Fermentation dazu führt, das die Hefe im Fermentationsbehälter nach unten gezogen wird, was eine Störung im Betriebsablauf zur Folge hat.

Bei einem Ertrag von 30 t/ha besteht 25% der Ernte aus Stärke, die mit einem Verfahren zu Ethanol umgewandelt wird, bei dem die Ausbeute 70% beträgt, womit ein Ethanol Ertrag von 3,440 L/ha entsteht. Die Vorteile des Manioks als Energiegetreide zur Bio-Kraftstoffproduktion sind:

- Hoher Ethanolertag
- Hohe Toleranz gegenüber klimatischen Einflüssen
- Starke Abwehrfähigkeiten gegen Schädlinge und ihre Krankheiten
- Große Haltbarkeit von 48 h bevor Auftreten von ernsten Schädigungen
- Die Haltbarkeit von Maniok Chips kann durch die Trocknung mit Hilfe von Dampfkesselgasen (Boiler Gases), die den Feuchtigkeitsgehalt auf 20% reduziert, auf bis zu ein Jahr verlängern.

- Der hohe Proteingehalt der Maniokblätter und des Stammes (17%) bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Produktion von wertvollem Tierfutter.

### Beispiel der Sudan: Süßkartoffel

Die Süßkartoffel ist eines der wichtigsten Gemüsegetreide der tropischen und subtropischen Länder. Sie stammt ursprünglich aus Latein Amerika. In den USA wird sie weitestgehend zwischen den südöstlichen und zentralen



Südstaaten angebaut. Sie ist eine Nutzpflanze, die zu den Windengewächsen (Convolvulaceae) gehört. Die Süßkartoffel ist eine fleischige perennierende Pflanze mit ausgestreckten oder verzweigten Wurzeln. Sie benötigt eine lange warme Wachstumsperiode. Die Bodenbeschaffenheit, -entwässerung und -entlüftung haben enormen Einfluss auf das Wachstum und die Produktivität der Reben der Süßkartoffel.

**Abbildung 10 Süßkartoffel**

Der ideale Boden zum Süßkartoffel Anbau muss locker, gut ent- und bewässert sein. Die optimale Temperaturspanne um ein ausgezeichnetes Rebewachstum sowie ein gutes Knolleergebnis zu erreichen sind zwischen 20-30 C. Temperaturen unter 10C verursachen abkühlende Schädling. Süßkartoffeln können Dürre sehr gut widerstehen und sogar ein ziemlich gutes Ergebnis in einem halbariden Klima ohne zusätzliche Bewässerung erbringen. Für das beste Wachstum der Süßkartoffelernte sollte der Niederschlag gemäßigt sein und während der frühen Wachstumszeit auftreten. Der optimale Niederschlag beträgt ungefähr 500- 675 mm. Die Süßkartoffel sollte geerntet werden, wenn die Blätter anfangen sich gelb zu färben, weil der Stärkegehalt an diesem Punkt am höchsten ist.

Für Kulturvarianten mit einer erfolgreichen Wachstumszeit von 5 Monaten ist ein Ertrag von 20 t/ha zu erwarten. Die Süßkartoffel enthält ungefähr 9-25% Stärke und 0.5-5% Zucker. Eine Tonne Süßkartoffeln erbringt 125 L Ethanol. Blätter, Laub, und nicht zu verwertende Knollen, sowie Reste, die bei der Verarbeitung entstanden sind werden benutzt, um Energie zu produzieren. Die Knollen benutzt man zur Ethanol Produktion und die Blätter und das Laub zur Biogas Produktion.

### Beispiel Deutschland: Kartoffel

Die Kartoffel gehört zur Familie der Solanaceae. Ihre Knollen bilden, dicke, unterirdische Stämme, deren Größe, Form und Farbe entsprechend der Sorte variiert. Die klimatischen Faktoren, die den Kartoffelertrag beeinflussen, sind Temperatur, Lichtintensität und Photoperiode, Niederschlag und Länge der Wachstumsperiode. Die Kartoffel ist ein Getreide der kühlen Jahreszeit und gedeiht gut mit gemäßigten Temperaturen während der Wachstumszeit. Das beste Wachstum wird erzielt, wenn die durchschnittliche Temperatur im Juli über 20°C beträgt.



Kartoffeln stellen den wichtigsten verwandten stärkehaltigen Rohstoff in der Ethanol Produktion in Deutschland und in Osteuropa dar. Der größte Teil der Kartoffel, ca. 75%, besteht aus Wasser und der geringere Teil, ca. 25%, aus einer trockenen Substanz. Sie eignet sich zur Ethanol Produktion aufgrund ihres hohen Stärkegehalts. Zusätzlich zur Stärke enthalten Kartoffeln niedrige Mengen an Zucker, hauptsächlich Saccharose, Glukose und Fruchtzucker.

**Abbildung 11 Kartoffel**

Der Zucker und Stärkegehalt hängt von ihrer Sorte und dem Reifegrad der Kartoffeln ab. Der Stärkegehalt hängt desweiteren auch vom Klima, dem somit verbundenen Wachstum, sowie den Lagerungsbedingungen ab. Der Verlust der Stärke beträgt ungefähr 8% nach 6 Monaten und 16.5% nach 8 Monaten Lagerung in einem sich in Betrieb befindlichen Vorratskeller.

Der Aufbau und die Mengen der Nährstoffe, die in den Knollen gespeichert werden, werden von folgenden Faktoren beeinflusst:

- der Wachstumszeit inbegriffen der Temperatur und Feuchtigkeit
- der Bodenart und dem Nährstoffgehalt im Boden
- den genetischen Eigenschaften der spezifischen Sorte.

Kartoffeln enthalten Pektin. Dieses Pektin ist verantwortlich für den Methanolertrag, der aus Kartoffeln produziert wird. Das Vermahlen der Kartoffeln führt zur Freisetzung von Pektin Esterase, die sofort die Methylester Bindungen des Pektins spaltet. Wenn die Kartoffel mit dem Unterdruckprozess verarbeitet wird, wird die Pektin Esterase durch Hitze

inaktiviert, womit eine praktisch komplette thermische Deesterification stattfindet. Das ist der Grund, warum der Methanolgehalt des Ethanol, bei dem Unterdruckprozess höher ist als bei dem Pressureless Prozess.

### 2.1.3 Zuckerhaltige Rohstoff

#### Beispiel Brasilien: Zuckerrohr

Das Zuckerrohr ist ein tropisches Gras, das Saccharose in seinem Stamm speichert. Es kann auf unterschiedlichen Bodenarten kultiviert werden,



wobei es auf schweren Böden, die einen hohen Nährstoff- und Wasseranteil aufweisen, besonders gut wächst. Es wird empfohlen, dass der Grundwasserspiegel mindestens 1m unterhalb der Bodenoberfläche ist. Die pH-Werte von 5.5 bis 8.5 haben keine negativen Effekte auf die Zuckerrohrproduktion gehabt. Die optimale Wachstums- und Erntezeit variiert zwischen den verschiedenen Anbaugebieten, entsprechend dem Klima. Abhängig von den lokalen Bedingungen

**Abbildung 12 Zuckerrohr**

schwankt die Wachstumsperiode des Zuckerrohrs zwischen ca. 10 und 22 Monaten, und der Ertrag schwankt zwischen 50 bis 120 t/ha im Jahr (Ruschel und Vose, 1982). Jedoch wächst unter guten Bedingungen, die Pflanze aus der alten Wurzel erneut. Um dieses beträchtliche Wachstumspotential zu erfüllen, benötigt die Pflanze intensives Sonnenlicht und reichlich vorhandenes Wasser.

Das Verhältnis der Energie die Abgegeben wird im Vergleich zu der die sie verbraucht kann bis zu 22:1 betragen (Joule: Joule). Der Ethanolertrag kann 70-90l/t erreichen, wobei der Saft ungefähr 12-16 % Zucker enthält. Die Bagasse hat einen Brennwert von bis zu 19700kJ/kg.

#### Beispiel die USA Zuckerrübe

Die Zuckerrübe ist ein zweijähriges Wurzelgemüse des mäßigen Klimas, das im Altertum in den Küstenbereichen entdeckt und zuerst als Gartengemüse an den Ufern des Mittelmeers domestiziert worden ist. Eine Zuckerrübe kann sich im Gegensatz zum Zuckerrohr leichter an unterschiedliche Bodenarten und klimatische Verhältnisse anpassen. Diese Tatsache erklärt ihr erfolgreiches Wachstum in vielen Ländern der Welt. Sie gehört zur

Familie der Fuchsschwanzgewächse (Amaranthaceae) und produziert während des ersten Wachstumsjahres Zucker (Saccharose) in ihrer Knollenwurzel, der eine starke Ähnlichkeit zu fetten Pastinak aufweist. Im zweiten Jahr produziert sie dann Blumen und die Samen. Sie wird gewöhnlich aus den Samen angebaut.

Im Frühjahr (nachdem Pflügen im Herbst) sät man sie aus und im ersten Herbst/Frühen Winter, bevor die Zuckerrübe zu blühen und mit der Samenproduktion beginnt, erntet man sie. Sie wird im Allgemeinen nicht



Jahr für Jahr auf demselben Feld, aber als Teil der Ernterotation, angebaut. Der Zuckergehalt der Zuckerrübe beträgt gewöhnlich ca. 17% des Gewichts, schwankt aber beträchtlich entsprechend der Sorte und den Wachstumsbedingungen. Im Vergleich zum Zuckerrohr ist der gärungsfähige Kohlehydratgehalt der Zuckerrübe niedriger. Die Zuckerrübe erbringt 95 Liter Alkohol pro Tonne. Ein zusätzlicher Nutzen der Zuckerrübe entsteht, aufgrund des hohen

### Abbildung 13 Zuckerrübe

Anteils von Rückständen bei der Ernte, die hauptsächlich aus dem oberen Teil der Zuckerrübe bestehen. Dieser Obere Teil der Pflanze kann nach der Ernte dazu benutzt werden den Boden für den nächsten Anbau wiederaufzubereiten, da er ihm Nährstoffe zuführt. Noch ein zusätzlicher Nutzen ergibt sich aus der extrahierten Molasse, die bei der Verarbeitung entsteht und einen hohen Nährstoffgehalt in nasser und trockener Form besitzt.

### Beispiel Griechenland: Zuckerhirse

Zuckerhirse ist eine Pflanze, die aus den subtropischen und tropischen Regionen stammt. Der Name Sweet Sorghum ist einer von Vielen Sorten des Sorghum bicolor. Die Zuckerhirse gehört zur Familie der Süßgräser und erreicht eine Höhe von bis zu 4m. Sie hat ein faserartiges Wurzelsystem, das unter guten Bedingungen starke Adventivwurzeln produzieren kann, die helfen kann, die Pflanze zu befestigen und dadurch die Möglichkeit des Umfallens zu verringern. Man betrachte die Pflanzen des Sorghums als eine der gegen Dürrewiderstandsfähigsten landwirtschaftlichen Getreide. Einer der wichtigen Faktoren, die die Ausdauer beeinflussen, ist die Wirksamkeit seines großen faserartigen Wurzelsystems, hauptsächlich der Sekundärwurzeln, die bis zu einen seitlich Abstand von bis zu 1 m und bis zu einer Tiefe von 1.8m wachsen können. Der Ertrag der Zuckerhirse variiert

sehr: Er beträgt z.B. in den USA 22.4- 64 t/ha und in der EU 92-129 t/ha. Obwohl die Zuckerhirse eines der trockenfesten Getreide ist, besteht weiterhin die Notwendigkeit in den südlichen EU-Regionen das Getreide zu bewässern, da andernfalls die Pflanze verkümmert und der Biomassertrag sehr niedrig ausfällt.

Die verfügbaren Sorten von Sweet Sorghum können einen Ertrag von 3.500-4.000 L/ha Ethanol allein aus dem gärungsfähigen Zucker produzieren.



Zusätzlich können dazu 1.600-1.900 L aus den Fasern des Stieles produziert werden. Die Zuckerhirse weist im Vergleich zum Zuckerrohr eine Vielzahl von Vorteilen auf. Ein Vorteil ist ihre Anpassungsfähigkeit gegenüber dem Klima und dem Boden und ihr verhältnismäßig hoher Ertrag Ethanol pro Anbaugbiet. Die Wasseranforderung und die Wachstumsdauer der Zuckerhirse sind viel niedriger als die des Zuckerrohrs.

**Abbildung 14 Zuckerhirse**

Zuckerhirse kann auf drei verschiedene Arten geerntet werden:

- (1) Es kann die vollständige Pflanze in vollem Umfang geerntet werden und eingelagert werden.
- (2) Es kann die Pflanze in kurze Intervalle (ungefähr 4 Zoll lang) geschnitten werden solange die Saftextraktion sofort durchgeführt wird.
- (3) Es kann zum Zweck der Grünfutteraufbewahrung geerntet und zerkleinert werden.

## 2.2 Getreide und stärkehaltige Rohstoff Verarbeitung

### 2.2.1 Stärkeaufschlussverfahren unter Druck

Diese Methode wird weitestgehend wegen seiner Anwendbarkeit für fast alle stärkehaltigen Rohstoffe verwendet. Zusätzlich ist die Anwendung von hohen Temperaturen und Druck in den täglichen Betrieben verhältnismäßig sicher. Ein Nachteil der bei der Verwendung dieses Verfahrens entsteht, ist der verhältnismäßig hohe Energiebedarf. Im Allgemeinen besteht nicht die Notwendigkeit des Zerkleinerns der Rohstoffe, da bei diesem Verfahren der Stärkeanteil in großem Umfang gelatiniert wird.

Die Auflösung der Inhaltsstoffe erfolgt unter Druck in einem sogenannten Henze-Dämpfer. Der Henze-Dämpfer besteht aus einem zylindrischen oberen und einem konischen unteren Teil. Diese Druckbehälter sollten aus

Edelstahl gemacht werden, um Korrosion zu vermeiden. Der Henze Kocher muss mit einem Dampfventil an der Unterseite, in der Mitte und an der Oberseite des Kochers ausgestattet sein, um Frischdampf zuzuführen. Um den Dampf abzuleiten muss er auch über ein Dampfablassventil, das ebenfalls an der Oberseite und an der Unterseite des Kochers angebracht sein muss, verfügen. Zusätzlich sollte der Kocher mit einem Manometer und einem Sicherheitsventil ausgestattet sein.

Die beinahe komplette Aufspaltung der Rohstoffe in Stärkeaufschlussverfahren unter Druck wird durch den Gebrauch von hoher Temperatur und Druck in Anwesenheit von Wasser im Henze Kocher erzielt. In diesem Prozessschritt wird die gesamte Menge der Körner in den Henze-Dämpfer zusammen mit der erforderlichen Menge des Wassers gelegt. Normalerweise werden ungefähr 300-350 Liter Wasser pro 100 Kilogramm Korn verwendet.

Die benötigte Menge Wasser wird in den Henze Kocher gepumpt, wobei das dampfzuführende Ventil an der Unterseite nur ein wenig geöffnet ist, um die Körner an die Wasseroberfläche zu schwemmen. Dann wird das Korn in den Henze-Dämpfer geleitet und nachdem man ihn verschlossen hat, wird das leicht geöffnete dampfzuführende Ventil an der Unterseite für die Verarbeitung des Kornes voll geöffnet. Das Korn muss während des Kochens gleichmäßig im Kocher verteilt werden, da es sehr wichtig ist, dass alle einzelnen Körner in Kontakt mit einer genügend großen Menge Heißwasser kommen, um eine komplette Verflüssigung zu erreichen. Daher sollten die seitlichen Dampfventile auch geöffnet werden. Das Dämpfen sollte ungefähr 40- 45 Minuten dauern, um den Druck bis zu 5 bar aufzubauen. Der Inhalt des Kochers, muss danach noch einmal für ungefähr 40- 45 Minuten diesen Druck beibehalten. Mit diesem Verarbeitungsverfahren verursachen Druck und Temperatur eine umfangreiche Auflösung und Gelierung der Stärke im Wasser, durch das Konservieren der äußeren Form der Körner.

Bevor die Maische vom Henze-Dämpfer abgepumpt wird, sollte sie überprüft werden, indem eine Probe vom Probeanschluss an der Unterseite des Henze Kochers abgenommen wird. Diese Probe wird in ein Sieb gegossen und durch geschulten Blick kontrolliert. Die Samenschalen sollten von den Endospermfragmenten vollständig getrennt werden. Sobald der Rohstoff lang genug gekocht worden ist, wird der Kocherinhalt in den Maischapparat durch ein Ausblasventil übertragen, das an der Unterseite des Henze Kochers aufgestellt wird. Der Abschlämmungsschlauch sollte die Maische vom Henze- Dämpfer zum Maischapparat überleiten, und deshalb so dimensioniert sein, dass der Kocher garantiert in unter 20 Minuten abgepumpt ist, da andernfalls intensives Karamellisieren stattfindet. Die Maische wird dann im Maischapparat auf 75°C abgekühlt und verflüssigt, indem man ein Enzym (*thermostable  $\alpha$ -amylase from B. licheniformis*) zugibt.



Thermostabile Amylase von *B.licheniformis* wird aus zwei Gründen bevorzugt, erstens aufgrund seiner Toleranz zu den niedrigen pH-Werten bis 4,8-4,5 und zweitens wegen seiner Stabilität auch bei hohen Temperaturen bis 90°C. Dieses Enzym bricht die einzelnen Stärkemoleküle aus den festen Inhaltstoffen des Rohstoffs heraus.

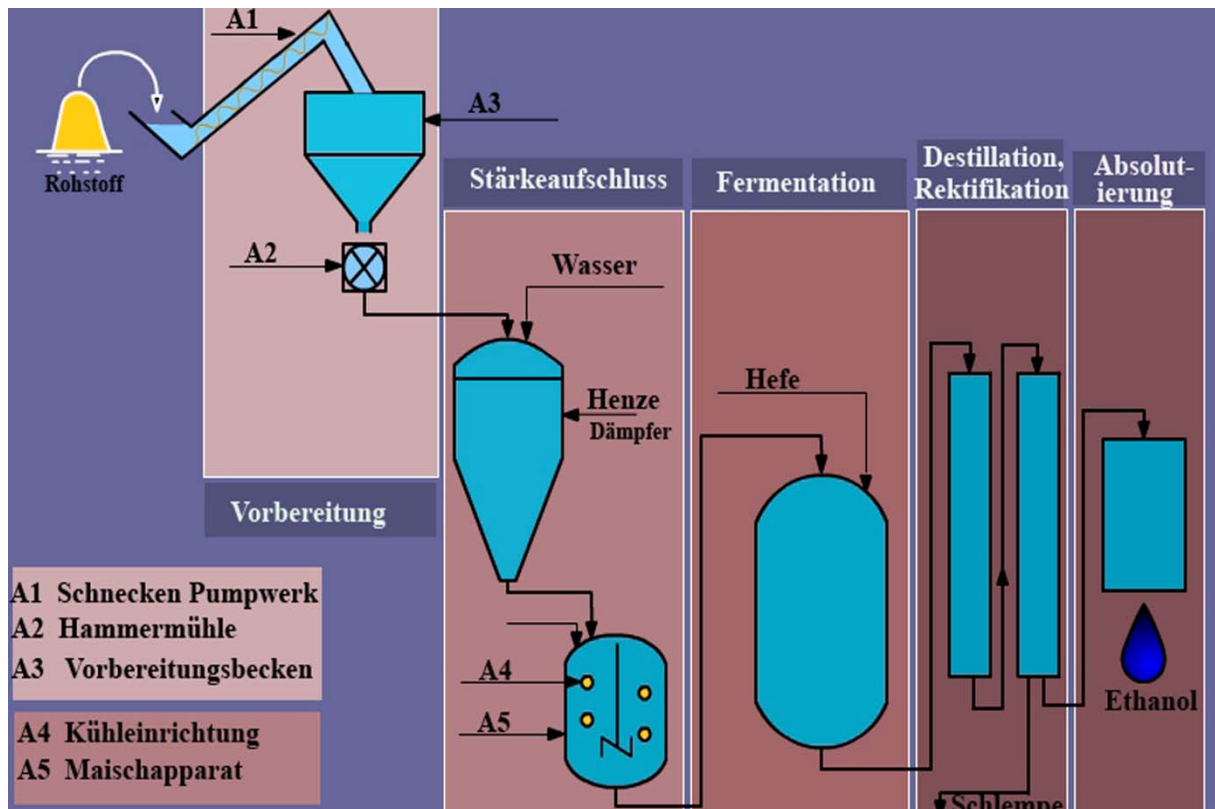


Abbildung 15 Das Stärkeaufschluss unter Druck Verfahren

Auch diese Stärkemoleküle werden teilweise hydrolysiert oder verringert, etwa auf die Größe der Dextrine. Sobald die Temperatur der Maische auf 60-55°C weiter gefallen ist, wird Glukoamylase von *A. Niger*, das von der pilzartigen  $\alpha$ -Amylase vom *A. Oryzae* begleitet werden kann, hinzugefügt, um die Zuckerbildung der verflüssigten Stärke zu ermöglichen. Diese Enzyme wandeln die Dextrine in die gärungsfähige Zuckerglukose um.

### 2.2.2 Drucklose Stärkeaufschlussverfahren

#### 2.2.2.1 Mahl-Maischprozess

Die stärkehaltigen Rohstoffe (Getreide, Wurzelpflanzen) werden normalerweise mit einer Hammermühle vermahlen, die in der Regel mit einem 1,5 Millimeter Sieb und einer dosierenden Pumpe für die Verflüssigungsenzyme ausgestattet ist.

Getreide wird meistens unter trockenen Bedingungen mit Wasser ausgespült. Die Verflüssigungsenzyme werden beim Ausspülen des Wassers, das eine Temperatur von bis zu 55°C haben kann, hinzugefügt, um den Energieverbrauch zu verringern. Bei vermahlten Kartoffeln ist die Menge des Wassers beim Ausspülen in der Mühle sehr gering, da Kartoffeln zu ungefähr 75% aus Wasser bestehen. Anders als bei vermahlten Getreide, bei dem das Mischungsverhältnis mindestens 1:1 betragen muss. Der Transport der Maische vom unteren Anschluss der Mühle zum Maischapparat erfolgt mit Hilfe einer Excenter- schneckenpumpe. Sobald im Maischapparat der vorgegebene pH-Wert von 6.0-6.2 herrscht, erhitzt man die Maische zur Verflüssigungstemperatur mit Hilfe von Frischdampf, wobei die Verflüssigungstemperatur vom Rohstoff abhängig ist(siehe tab.). Nach einer Verflüssigungszeit von ungefähr 30 Minuten, wird die Maische abgekühlt um sie anschließend zu verzuckern. Der pH-Wert sollte, durch die Verwendung von starker Schwefelsäure (concentrated sulfuric acid), auf 5.3-5.5 eingestellt werden, um die Tätigkeit der Enzyme zu optimieren, die der Maische hinzugefügt wurden. Danach wird die Maische bis auf die Fermentationstemperatur abgekühlt und normalerweise in den Fermentationsbehälter gegeben.

Die aus der Destillationspalte austretende heiße Schlempe wird entweder benutzt, um die Maische zu erhitzen, indem man sie durch die Kühlschlange einführt, die im Maischapparat gelegen ist, oder auch, um die Rohstoffe in der Förderrohrleitung zwischen der Hammermühle und dem Maischeapparat entweder mit röhrenförmigen Wärmeaustauschern oder mit Spirale-Platen Wärmeaustauschern zu erwärmen.

Dabei sollte man darauf achten, dass die Temperatur der Maische nicht über 55°C übersteigt, um die Gelierung der Stärke zu verhindern. Diese Temperatur kann nämlich mit dem aufgewärmten Kühlwasser des Ausspülens der vermahlte Rohstoffe von der Mühle leicht erreicht werden. Obwohl verflüssigende Enzyme der Maische hinzugefügt werden, können die Verkrustungen nicht vermieden werden, wenn die Gelierungstemperatur im Wärmeaustauscher überstiegen wird. In der Praxis haben insbesondere Spiralplatten-Wärmeaustauscher die Tendenz Verkrustungen aufzubauen.

**Tabelle 3 Getreide und Kartoffel Verflüssigungstemperatur beim Mahl Maischverfahren**

| <b>Rohstoffe</b>                    | <b>Verflüssigungstemperatur</b> |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Kartoffeln</b>                   | 90-95°C                         |
| <b>Mais</b>                         | 80-90°C                         |
| <b>Weizen, Roggen und Triticale</b> | 65-70°C                         |

Dieses Verfahren hängt völlig von dem Zerkleinerungsgrad der vermahlten Rohstoffe und der Leistungsfähigkeit der benutzten Enzyme, besonders zur Verzuckerung, ab. Eine unvollständige Freisetzung und Zersetzung (Abbau) der Stärke erhöht die Gefahren der Kontamination und der Verluste beim Ethanolertrag.

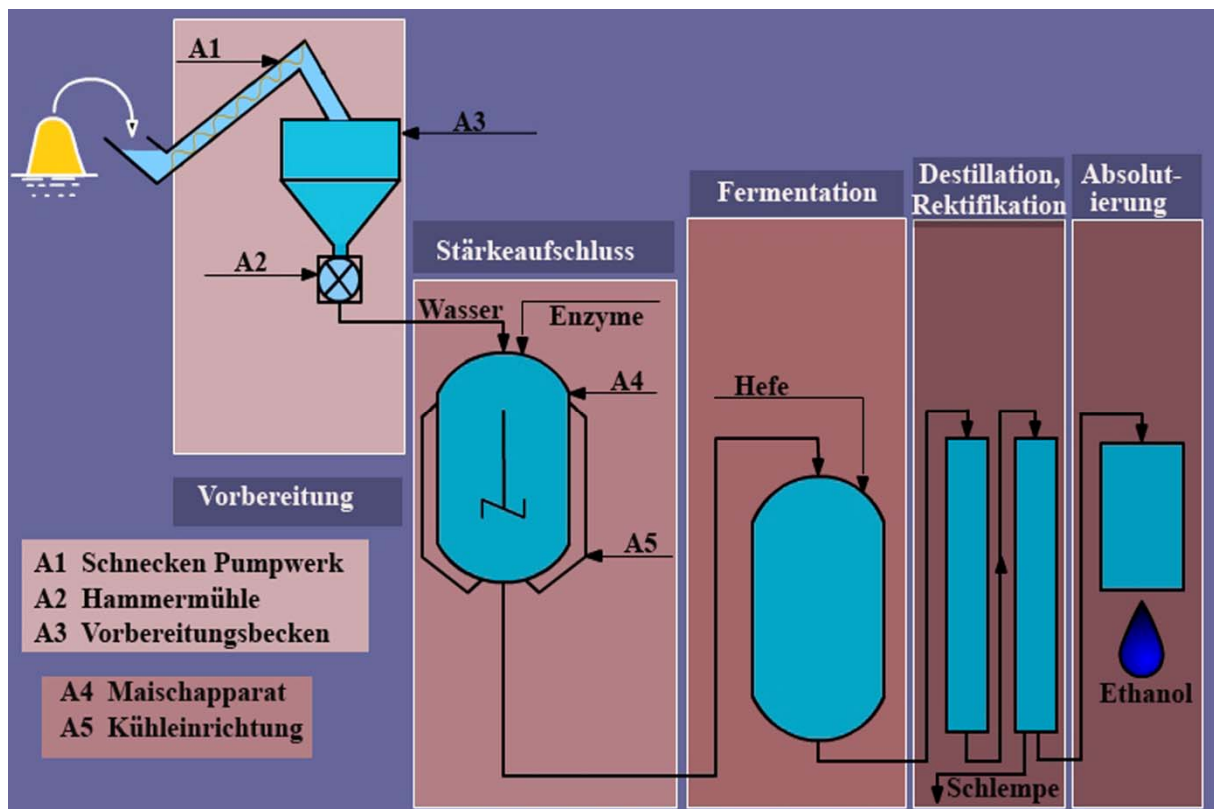


Abbildung 16 Das Mahl Maischverfahren

### 2.2.2.2 Dispergier-Maischverfahren

Dieses Verfahren ermöglicht die Verarbeitung des Getreides und der Kartoffeln ohne oder nur nach grobem Vermahlen. Wenn mehr als eine oder zwei Maischen pro Tag in einem Maischeapparat verarbeitet werden, wird es empfohlen, eine Hammermühle zu benutzen, die mit einem 4 mm Sieb ausgerüstet ist, um das Material zu klassifizieren. Dieses verringert die Zeit, die für die Zersetzung der Stärke vom Rohstoff nötig ist. Die Schlempe, die für die Wiederverwertung benutzt wird, muss von den Feststoffen getrennt werden. Dieses kann leicht getan werden, indem man einen Trennungsbehälter einsetzt. Die Schlempe von der Destillationspalte wird in diesen Trennungsbehälter zum Zweck der Sedimentation gebracht. Nach ungefähr 3-4 h, ist die Schlempe sedimentiert und besteht offenbar aus zwei Phasen.

Die Feststoff-freie Phase(Dünnschlempe) wird im Prozess wieder verwendet. Sie beträgt bis zu 50% (Weizen, Roggen, Triticale), bis zu 70% (Mais) und bis zu 15% (Kartoffel) der gesamten Schlempe. Bei den Kartoffeln ist der Anteil niedriger, da Kartoffeln zu 75% aus Wasser bestehen.

Die Feststoffe(Dickschlempe), die in der zweiten Phase der Schlempe enthalten sind, werden als Tierfutter oder als Düngemittel benutzt. Der erste Schritt in diesem Verfahren ist die Zugabe der notwendigen Menge der Feststoff-freien Schlempe in den Dispergier-Reaktor, der als Maischapparat benutzt wird. Der pH-Wert wird mit hydratisiertem Kalk (Kalziumhydroxid)eingestellt, abhängig von den Eigenschaften der benutzten verflüssigenden Enzyme. Danach wird der grob vermahlene Rohstoff in den Dispergier-Reaktor mit möglichst wenig Wasser bei maximalen Temperaturen von ca. 60°C gepumpt, um den Transport der Rohstoffe zu ermöglichen. Zu Beginn des Prozesses wird die Temperatur der Maische zur Verflüssigungstemperatur gebracht, indem man Frischdampf einspritzt. Die Rotor-Stator der Dispergier Maschine wird eingeschaltet, wenn alle Rohstoffe zugeführt sind und die Maische behandelt wird, bis eine genügend große Freisetzung von Stärke garantiert ist. Der Zerfallsgrad wird mit einem speziellen Maische-Aufstrom-Klassiers festgestellt. Wenn das hydrosizer einen genügend großen Zerfallsgrad anzeigt, wird die Maische zur Zuckerbildungstemperatur von 52-54°C abgekühlt.

Dies geschieht durch die Verwendung von entweder einer speziellen Plattenart (des äußeren Wärmeaustauschers) oder durch eine Kühlschlange innerhalb des Dispergier- Reaktors, wobei an dieser Stelle auch noch ein Verzuckerungsenzym zugegeben wird. Hierbei bevorzugt man OPTIMALT, das eine Enzymkombination (GAR, DBM, GAA und FAA) darstellt, die an der Versuchs- und Lehrbrennerei der Hohenheim Universität entwickelt wurde. Diese Enzymkombination bietet in den meisten Fällen eine nahezu komplette Zerlegung(Abbau) der Stärke während der Verzuckerung und der Fermentation, ohne irgendeinen Verzuckerungsrest.

Die Maische wird direkt zum Fermentationsbehälter gepumpt und gelangt auf diesen Weg auch zum Platten-Wärmeaustauscher, in dem die Maische abgekühlt wird, um die Fermentationstemperatur einzustellen, wobei noch Hefe zugeführt wird. Eine andere Variante besteht darin, dass man die Maische in der Dispergier-Maschine durch eine Kühlschlange abkühlt und anschließend Hefe zugibt. Das DMP-Verfahren führt praktisch zu einer Freisetzung der gesamten Stärke aus den Rohstoff- Zellen. Zusätzlich ergibt der Gebrauch von OPTIMALT zur Verzuckerung eine komplette Zersetzung(Abbau) der Stärke und erhöhte Ethanolergebnisse. Die Wiederverwendung der Schlempe garantiert einen schnelleren Anfang des Fermentationsprozess, eine verringerte Gärungsdauer und optimale

Bedingungen zur Fermentation, die bis zu 66 IA (Liter Alkohol) pro 100 Kilogramm Stärke in den Industrieanlagen erbringt.

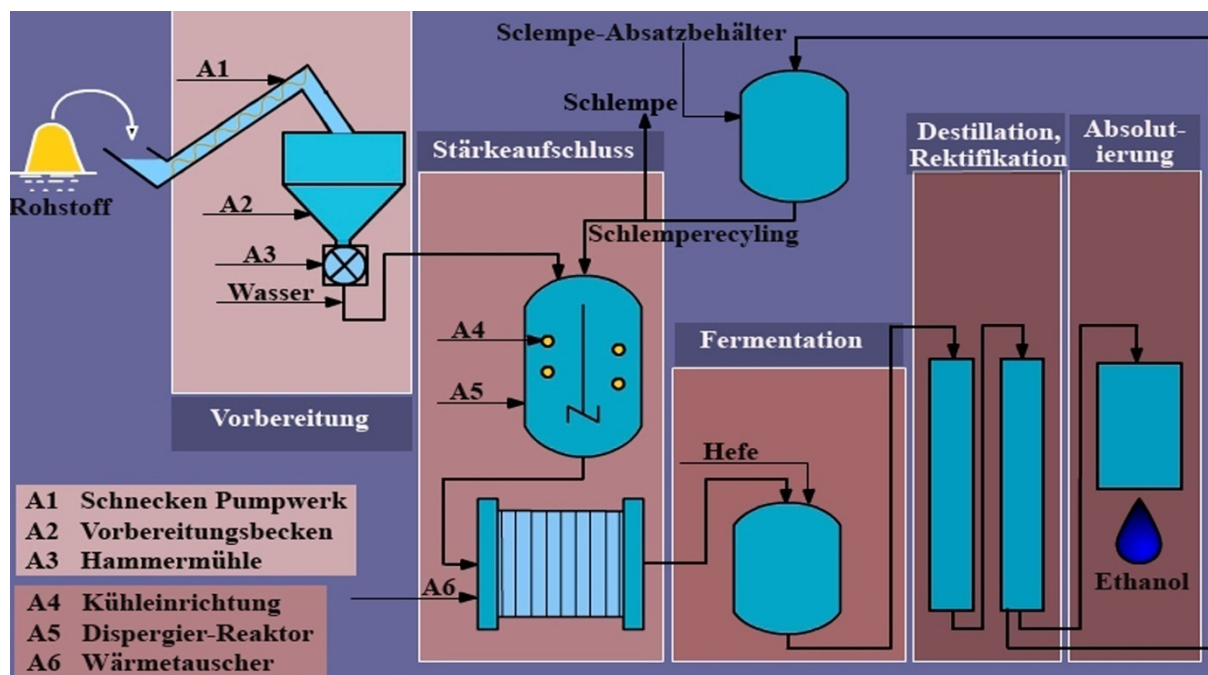


Abbildung 17 Das Dispergier Maischverfahren

### 2.2.2.3 Verarbeitung mit der amyolytische Enzymeaktivitäten

Dieses Verfahren wird benutzt um einige Getreidearten (wie z.B. Weizen, Roggen und Triticale) zu verarbeiten. Es basiert auf den enzymatischen Tätigkeiten der benutzten Rohstoffe, die bereits im nativen Zustand amyolytische Aktivitäten aufweisen. Diese Tätigkeiten führen zur Zuckerbildung. Das autoamyolytische Enzymsystem konnte durch die hohen Temperaturen bei der Gelierung der Stärke inaktiviert werden. Dies kann vermieden werden, indem man eine bestimmte Kombination von Zeit, Temperatur und pH-Wert während des Maischprozesses verwendet. Um die autoamyolytische Tätigkeit der Rohstoffe zu überprüfen, definierte Rau et al. Theso den Autoamyolytischen Quotienten (AAQ). Dieser AAQ wird festgestellt, indem man zwei verschiedene Gärungstests mit dem gleichen Rohstoff durchführt. Die ersten Gärungstests mit technischen Enzymen werden durchgeführt, um das maximal erreichbare Ethanol festzustellen. Der zweite Gärungstest wird ohne die Hinzufügung der technischen Enzyme durchgeführt, um das höchstmögliche Ergebnis an Ethanol festzustellen, das unter den nativen autoamyolytischen Bedingungen erhalten wird.

AAQ ist dann, bezogen auf den Rohstoff der benutzt wird, nach der

nach der folgenden Gleichung definiert:

$$\text{AAQ} = \frac{\text{Ethanol yield} \left[ \frac{IA}{100 \text{kgFS}} \right] \text{without technical enzymes} \cdot 100}{\text{Ethanol yield} \left[ \frac{IA}{100 \text{kgFS}} \right] \text{using technical enzymes}}$$

Es ist möglich Weizen, Triticale und Roggen mit einem AAQ von 95% oder mehr ohne die Hinzufügung der Verzuckerungs-Enzyme zu verarbeiten. Eine Vorbedingung für die erfolgreiche Anwendung dieses Verfahrens ist, dass die Rohstoffe sehr fein vermahlt werden. Die Vermahlung der Körner wird normalerweise unter trockenen Bedingungen durchgeführt. Ein Vorteil der trockenen Vermahlung ist, dass die Vermahlung über Nacht gemacht werden kann und das Gemahlene in einem Bunker gespeichert werden kann. Um einen ausreichenden Zerfallsgrad in der Hammermühle zu erreichen, ist ein 1-1.5 Millimeter Sieb erforderlich. Die Mühle sollte mit einem speziellen Staubsauger ausgerüstet sein, um den Feinstaub in der Anlage zu sammeln. das Grundmaterial sollte in einem Speicherezufuhrbehälter geladen werden. Zuerst wird die notwendige Menge an Wasser und/oder der Schlempe in den Maischapparat gepumpt. Der Maischapparat sollte mit einer Dispergier-Maschine ausgerüstet sein. Nachdem der pH-Wert zwischen 5.2 und 5.5 für Weizen und Triticale und nicht mehr als 5 für Roggen, um die Viskosität zu vermeiden, eingestellt wird, werden die fein geriebenen Getreide (Weizen, Roggen, Triticale) zum Maischapparat gebracht und die Verflüssigungsenzyme zugegeben. Die Temperatur im Maischapparat sollte für Weizen und Triticale nicht über 50°C und für Roggen nicht über 40-45°C in diesem Verarbeitungsprozesses überschreiten. Die Maische wird unter diesen Bedingungen für Weizen und Triticale mindestens 30 Minuten und für Roggen maximal 20 min gehalten, während sie dispergiert wird. Wenn die Maische einen genügenden Zerfallsgrad aufweist, wird die Maschine gestoppt und dann erhitzt. Diese Erhitzung wird genau bei 64°C für Weizen, 60-62°C für Triticale und 60°C für Roggen gestoppt, um anschließend die Maische bei dieser Temperatur für 5-10 Minute zu halten und sie dann schnell zur Verzuckerungstemperatur von 53-55°C und einem pH-Wert bis 5.3 abzukühlen. Die Maische wird unter diesen Bedingungen für 20-30 Minuten zur Verzuckerung gehalten. Danach wird die Maische bis zur Fermentationstemperatur abgekühlt.

Es ist auch möglich, aufgrund der in Triticale beschriebenen autoamylolytischen Tätigkeiten, Rohstoffe wie Kartoffeln und Mais, die schwache oder keine autoamylolytischen Tätigkeiten aufweisen, zu verzuckern. Zu diesem Zweck ist es notwendig, zwei Maischen in zwei Maischapparaten vorzubereiten. In einem dieser Maischapparate werden die Gelierung und die Verflüssigung des Rohstoffes mit schwacher autoamylolytischer Tätigkeit unter den bereits oben erwähnten Bedingungen durchgeführt.

**Tabelle 4 Verflüssigungs-, Verzuckerungs- (-temperatur, -rest )und pH-wert für Weizen, Triticale, Roggen**

| Rohstoffe        | Verflüssigung-    |         |                 | Verzuckerung      |             |                 |
|------------------|-------------------|---------|-----------------|-------------------|-------------|-----------------|
|                  | -temperatur<br>°C | pH-Wert | -rest<br>(min.) | -temperatur<br>°C | pH-<br>Wert | -rest<br>(min.) |
| <b>Weizen</b>    | 65                | 5.3-5.5 | 5-10            | 53-55             | 5.3-5.5     | 20-30           |
| <b>Triticale</b> | 60-62             | 5.2-5.5 | 5-10            | 53-55             | 5.3-5.5     | 20-30           |
| <b>Roggen</b>    | 60                | 5.0     | 10              | 52-55             | 5.3         | 20-30           |

Der zweite Maischapparat wird benutzt, um die Gelierung und Verflüssigung von Triticale vorzubereiten, wie oben beschrieben. Diese Vorbereitungen der Maischen können gleichzeitig durchgeführt werden und im Anschluss werden, wenn beide zur Verzuckerungstemperatur abgekühlt sind, beide in den größeren Maischapparat zur Zuckerbildung gemischt. Die Ethanol Produktion mit diesem Verfahren ist von großem Wert. Im Vergleich mit Getreide erbringen z.B. Kartoffeln die doppelte Menge an Stärke pro ha. Der Anbau von Kartoffeln und Triticale führt zu einer kompletten Ernterotation und lässt somit landwirtschaftliche Stärkeproduktion auf der ganzen Fläche zu. Des Weiteren werden durch diese Art der Verarbeitung die Kosten für Verzuckerungsenzyme eingespart. Dies minimiert die Kosten der Ethanol Produktion, auch dann wenn nur 20% der normalen Konzentration der Zuckerbildungsenzyme verwendet werden. Der Ethanolertrag dieser Maischemischung hängt vom Verhältnis der Stärke der schwachen autoamylolytischen Quellen im Vergleich zur Stärke des Triticale ab. Versuchsergebnisse bei Kartoffeln und Mais haben ergeben, dass die Notwendigkeit besteht, dass der Stärkeanteil des Triticale mindestens 50% in der Maischemischung betragen muss, um den optimalen Ethanolertrag von mehr als 64 IA pro 100 Kilogramm FS zu erreichen.

Allerdings birgt dieses Verfahren nicht nur Vorteile in sich, sondern weist auch gewisse Gefahren auf. Eine davon ist, dass man sich bei der Auswahl der Getreidesorte, darüber bewusst sein muss, ob das ausgewählte Getreide das autoamylolytische Enzymsystem in sich trägt, und somit überhaupt für die Produktion geeignet ist. Darüberhinaus darf man die Getreidekörner einer Temperatur von 60°C nicht länger als 10-15 Minuten ausliefern, da sie sonst instabil werden. Zusätzlich sind die Schwankungen der Enzymaktivitäten zwischen den unterschiedlichen Rohstoffen sehr groß, womit trotz des Gebrauchs der gleichen Mühle unterschiedliche Teilchengrößen entstehen. Beide Faktoren führen zu einer unvollständigen Freisetzung und Zersetzung der Stärke während des Maischprozesses. Diese schlechte Aufspaltung der Stärke und die niedrige maximale Temperatur, die in diesem Prozess verwendet wird, verursachen eine erhöhte Kontaminationsgefahr während der Fermentation.

### 2.3 Extraktion des Zuckers

Die Saccharose Extraktion der Zuckerrüben ist einfacher als die Extraktion des Zuckerrohrs und der Zuckerhirse und zwar aus zwei Gründen. Erstens können die roten Rüben für einige Wochen gelagert werden ohne das sie einen erheblichen Verlust des Zuckers erleiden. Zweitens wird die Saccharose aus der roten Rübe in ganzen Zellen extrahiert, während ihre Zellen im Zuckerrohr und in der Zuckerhirse vor der Extraktion erst gebrochen werden müssen. Deshalb kann die Zuckerrübe einen höheren Saftanteil erbringen, ohne ihre Zellen zu zerstören. Ein erforderlicher Vorbereitungsschritt bei der Extraktion der Zuckerrübe besteht darin, dass die Wurzeln zuerst gewaschen werden müssen, um den Sand und andere anorganische Materialien zu beseitigen. Sobald sie gesäubert ist, wird die Zuckerrübe in Scheiben der Größe von 4-5 mm geschnitten, die in einen Extraktionsturm oder eine drehende Trommel eingezogen werden. Die Rübenschnipsel werden auf Förderbändern zu hohen Extraktionstürmen gebracht. Dort bewegen sich die Schnipsel von unten nach oben während von oben im Gegenstrom 70°C heißes Wasser an der Schnipseln vorbeifließt. Durch die Hitze des Wassers öffnen sich die freiliegenden Zellwände der Schnipsel und die darin enthaltenden Zuckermoleküle treten ins Wasser über. Am unteren Ende des Extraktionsturmes wird der sogenannte „Rohsaft“ abgepumpt. Seine Farbe ist zwischen grau bis schwarze einzuordnen und sein Zuckeranteil beträgt 13-17%. Der Wasserverbrauch bei der Saftextraktion kann beträchtlich sein. Eine größere Menge an Wasser entfernt eine größere Menge an Zucker durch Diffusion (Zerstäubung), aber dies führt auch zur Verdünnung des extrahierten Safts und erhöht die Energie, die in den folgenden Verarbeitungsschritte erforderlich ist.

Der Saft des Zuckerrohrs und -hirse wird extrahiert, indem man diese erst säubert und dann mit drehenden Klingen zerschneidet oder sie in Späne schneidet. Dann wird das zerschnittene oder geschnittene Zuckerrohr oder -hirse durch eine Hammermühle gepresst. Der Feststoff wird mit Heißwasser gewaschen, und gepresst. Dieser Prozess wird drei bis fünfmal wiederholt. Dabei wird ungefähr 85-90% des Zuckers extrahiert, wenn das Gesamtvolumen des Waschwassers ungefähr 25% des Gewichts des Stocks der Zuckerrohrpflanze beträgt. Der Saft wird normalerweise mit Kalkmilch und Schwefelsäure versetzt, um anorganische Brüche abzuschließen.

### 2.4 Fermentation

Unter Fermentation versteht man eine alkoholische Gärung des eingemaischten Materials; wozu man in den meisten Fällen Hefe dazugibt.



Diese Fermentation von Maische wird hauptsächlich in einem zylinderförmigen Fermentationsbehälter durchgeführt.

Dieser Behälter sollte:

- aus Edelstahl aufgebaut,
- mit einem Schacht an der Unterseite des zylinderförmigen Teils des Fermentationsbehälters und an der Oberseite ausgerüstet,
- mit einem Kontrollfenster über dem unteren Schacht, einem Thermometer und einem Ansammlungsschlauch für Kohlendioxyd an der Oberseite ausgestattet sein,
- und eine Form haben bei der die Höhe größer ist als der Durchmesser.

Die Fermentation kann bei einer höheren Temperatur begonnen werden, wenn eine Kühlanlage in dem Fermenter vorhanden ist. z.B. muss bei einem Fermenter mit einem Volumen von ca. 30m<sup>3</sup>, die Fermentationstemperatur auf 20-22°C verringert werden, wohingegen bei einem Fermentationsbehälter der mit einer Kühlanlage ausgerüstet ist die Fermentation schon bei einer Temperatur von 28-30°C begonnen werden kann. Diese höheren Temperaturen führen nicht nur dazu, dass der Beginn des Fermentationsprozesses beschleunigt wird und als Folge dessen sich die Dauer der Gärung, sowie die Gefahr der Kontamination verringert, sondern auch dazu das sich der Verbrauch des Kühlwassers, sowie die Kühlzeit während des Maischeprozesses verringert. Die Fermentation mit Hefe kann auf zwei Arten begonnen werden. Die erste Möglichkeit besteht darin die Hefe bei ungefähr 33°C zu der Maische im Maischapparat zuzugeben. Sobald diese Maische bis zur Fermentationstemperatur abgekühlt ist, wird sie zum Fermentationsbehälter gepumpt. Die zweite Fermentationsmöglichkeit wird normalerweise dann verwendet, wenn die Brennerei mit einem Wärmetauscher ausgerüstet ist. Hierbei soll ungefähr 90-95% der Hefe in den Fermentationsbehälter eingebracht werden. Während die Hefe in den Fermentationsbehälter gepumpt wird, wird die Maische vom Maischapparat am Wärmetauscher vorbei (um die Fermentationstemperatur einzustellen), zum Fermentationsbehälter gepumpt. Am Anfang des Fermentationsprozesses wird die Temperatur so eingestellt, dass sie nach 24h ungefähr 34°C erreicht. Grundsätzlich sollte die Gärungstemperatur während der gesamten Gärung nicht über 36°C steigen. Hierbei hilft eine Abkühleinrichtung die dafür Sorge trägt, dass nach dem Erreichen der 34°C, diese Temperatur gehalten und nicht überstiegen wird. Nach 24 h Fermentation ist über 50% des gärungsfähigen Extraktes, das in der Maische enthalten ist, vergoren und der Ethanolgehalt beträgt ungefähr 4%

des Volumens. Zu Beginn der Fermentation liegt der pH-Wert bei 5.2, nach 24 Stunden sinkt er auf 4.6-4.8. Während einer weiteren Fermentation sinkt der pH-Wert weiter bis auf ungefähr 4.2-4.5 ab. Am Ende der Fermentation nimmt der pH-Wert um ungefähr 0.2 pH Einheiten zu, wenn die Maische frei von Kontamination ist. Wenn der pH auf unter 4.0 fällt, liegt dies für gewöhnlich an der Kontamination. Die Verwendung der Schlempe beim Maischprozess führt zu zusätzlichen wichtigen Effekten bei der Fermentation. Erstens wird der Beginn der Gärung offenbar beschleunigt, wodurch sich die Gefahr der Kontamination verringert. Zweitens verringert sich auch die Dauer des Fermentationsprozesses.

### 2.5 Destillation, Rektifikation, Absolutierung

Die Abtrennung des Alkohols aus dem Gärsubstrat, muss nach der Fermentation, wenn möglichst alle verfügbaren Bestandteile der organischen Masse in Ethanol umgewandelt wurden, erfolgen. Um dies zu bewirken, benutzt man das Verfahren der Destillation und u. U. das Verfahren der Rektifikation mit einer anschließenden Absolutierung. Die Herstellung von Rohalkohol mit nur etwa 82 bis 87 Vol.-% wird hier als Destillation gesehen. Um diese Ethanolkonzentration zu erreichen, wird ein Destillationsapparat verwandt, der aus vier Abschnitten besteht.

- Die Maischekolonne hat den Zweck Ethanol aus noch verborgener Maische zu gewinnen und ist deshalb mit Glockenböden, die einen Abstand voneinander 300 mm beträgt und deren Anzahl je nach Größe der Maischekolonne variiert.
- Darüberhinaus ist die Verstärkerkolonne noch mit weiteren 4-6 Glockenböden ausgestattet, so dass die aufsteigenden alkoholhaltigen Dämpfe bis zur gewünschten Konzentration angereichert werden können.
- Anschließend hat der Dephlegmator den Nutzen, diese aufsteigenden Dämpfe zu kondensieren und somit die Aufkonzentration des Alkohols zu ermöglichen, bei der das entstehende Kondensat zurückfließt.
- Um den Alkohol auf unter 20°C zu kühlen und die alkoholischen Dämpfe vollständig zu kondensieren benutzt man einen Kühler.

Vor der weiteren Verwendung des Produkts muss es erneut gereinigt werden, was durch die Rektifikation erreicht wird. Hierunter versteht man eine mehrmalig Destillation, bei der unter unmittelbarer Berührung Dampf und Flüssigkeit im Gegenstrom zueinander gebracht werden. Da hierbei allerdings bei einer Alkoholkonzentration von 96 Vol. % Wasser und Ethanol ein Azeotrop bilden kann auf dem Weg der Destillation keine weitere Aufspaltung von Wasser und Ethanol erfolgen, weshalb man einen zusätzlichen Arbeitsschritt, den der Absolutierung, anwendet.

Diese hat nämlich den Sinn den Alkohol weiter zu konzentrieren. Grundsätzlich basiert die Aufspaltung von einzelnen Flüssigkeiten aus Flüssigkeitsgemischen mit dem Verfahren des Destillierens oder Rektifizierens darauf, dass sich die Dampfzusammensetzung im Gleichgewicht anders verhält als die Flüssigkeitszusammensetzung. Speziell auf die Destillation von Alkohol aus einem Ethanol/Wasser-Gemisch bezogen bedeutet das, dass die Abtrennung dadurch ermöglicht wird, dass ein Dampf, der zur siedenden Flüssigkeit im Gleichgewicht steht, eine höhere Ethanolkonzentration aufweist als die Flüssigkeit. Somit reichert sich der Dampf immer weiter mit Ethanol an, bis die Konzentration von Dampf und Flüssigkeit gleich ist, und somit das Verfahren nicht mehr funktioniert. An dieser Stelle, die als azeotroper Punkt bezeichnet wird, müssen andere Verfahren zur Anwendung kommen um das restliche Gemisch weiter aufzuspalten. Eine Möglichkeit besteht darin dem Alkohol-Wasser-Gemische wasserbindende Chemikalien wie z.B. gebrannter Kalk zuzugeben. Dieses Verfahren setzte sich aber aufgrund der damit verbundenen Alkoholverluste nicht durch. Ein weiteres Verfahren basiert auf der Zugabe eines Schlepptittels wie z.B. Cyclohexan, das den azeotropen Punkt des Gemisches verschiebt und somit eine weitere Destillation ermöglicht. Am Ende dieses Prozesses trennt man das Schlepptittel wieder vom Gemisch ab und führt es im Anschluss erneut zu. Das letzte Verfahren funktioniert mittels einer Molekularsieb-Destillation bei der letztlich und endlich genauso wie bei dem Schlepptittel Verfahren die notwendige Reinheit von 99,8 Vol.-% erreicht wird, womit das Ethanol als Kraftstoff-Mischkomponente eingesetzt werden kann.

## 3 Biodiesel

Biodiesel wird durch die Reaktion eines Pflanzenöls mit Methylalkohol oder Ethylalkohol in Anwesenheit eines Katalysators produziert. In der Praxis wird Kaliumhydroxid (KOH) oder Natriumhydroxid (NaOH) als Katalysator benutzt. Der chemische Prozess wird Umesterung genannt, welcher Biodiesel und Glycerin produziert werden. Das Biodiesel wird in der Chemie Sprache einen Methylester genannt, wenn der benutzte Alkohol Methanol ist. Wenn Ethanol benutzt wird, wird es einen Ethylester genannt. Sie sind beide ähnlich und z.Z. verwendet man in der Praxis Methanol statt Ethanol wegen seines niedrigeren Kostens. Biodiesel kann als rein Kraftstoff oder gemischt mit Dieselkraftstoff für Gebrauch in den Kompressionszündungsmaschinen verwendet werden. Die genaue Beschreibung des Prozesses wird in dieser Arbeit erläutert.

### 3.1 Pflanzenöl Arten

Die Pflanzenöle für die Biodieselproduktion können in zwei Kategorien eingestuft werden, nämlich die einjährige Pflanzenöl und die mehrjährige Pflanzenöl (siehe die Abbildung unten). Zu jeder dieser Hauptgruppen des Pflanzenöls für die Biodieselproduktion sind die verschiedenen Pflanzenöle länderspezifisch auflistet. Die Verarbeitung der Rohstoffe zum Zweck der Biodieselgewinnung wird nun in meiner folgenden Arbeit erläutert.

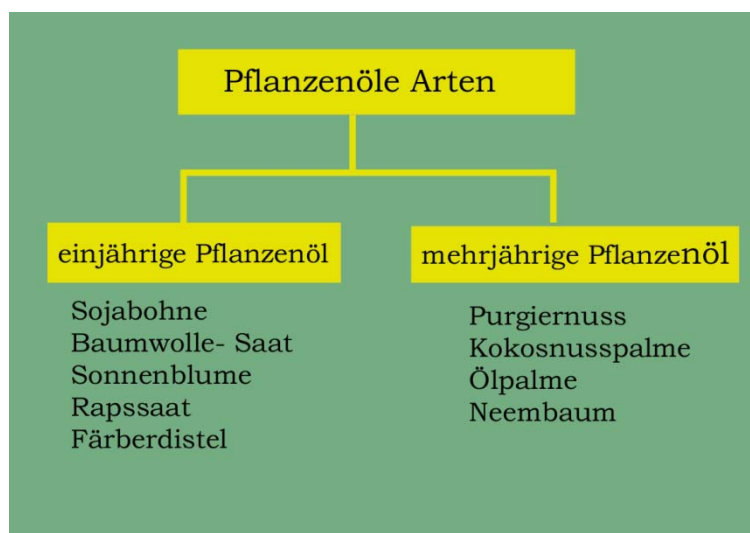


Abbildung 18 Die Pflanzenöle Arten

### 3.1.1 Einjährige Pflanzenöl

#### Beispiel die USA: Sojabohne

Die Sojabohne ist eine wichtige Ölsaat, die zur Familie der Hülsenfrüchtler (Fabaceae oder Leguminosae) gehört. Ursprünglich stammt die Sojabohne aus Ostasien und wird in China schon seit mindestens 3000 Jahren angebaut. Sie gelangte erst im 17. und 18. Jahrhundert auf die anderen



**Abbildung 19 Sojabohne**

Kontinente. Heute ist sie als Nutzpflanze in den subtropischen Regionen, Nordamerika und Ostasien, aber auch in den tropischen Zonen und in Europa kultiviert. Die USA produzieren fast 70% der Gesamtweltproduktion an Sojabohnen. Der höchste Verbrauch ist in Asien, dort ist sie seit Jahrhunderten ein Grundnahrungsmittel. Die Sojabohne wird hauptsächlich wegen ihrer Samen angepflanzt. Sie werden als Lebensmittel,

Viehfutter und für die Extraktion des Öls verwendet. Sie ist momentan der wichtigste ölhaltige Samen der Welt, in Hinblick auf die Gesamtproduktion und im internationalen Handel.

Die Sojabohnepflanze ist eine einjährige Pflanze. Sie wächst bis zu einer Höhe von 80 cm. Ihr Wuchs gleicht dem der Buschbohne. Die dreizähligen, großen, ganzrandigen Blätter sowie der Stängel sind dicht behaart. Ihre Hülsen enthalten bis zu 5 Samen. Die Sojabohnenpflanze ist durch Züchtungen von standortgerechten Formen in der Lage, sich unterschiedlichen klimatischen Bedingungen anzupassen. Durch diese Anpassungsfähigkeit gibt es die vielen unterschiedlichen Kultursorten, jede Sorte hat ihre eigenen Eigenschaften und bevorzugten Bedingungen. Sie bevorzugen in der Regel warmes Klima, also z.B. eine Temperatur zwischen 24-25°C im Sommer und Herbst, um die Reife der Samen zu unterstützen und neutrale lockere Böden mit regelmäßiger Wasserversorgung, z.B. lehmiger Boden, Löss oder schwarzer Boden, da diese die Fähigkeit haben, Wasser zu speichern. Der pH-Wert sollte zwischen 6-6.5 und der Niederschlag zwischen 500-750 mm liegen, um einen guten Ertrag an Sojabohnen in den wärmeren Regionen zu erzielen. Die Sojabohne hat eine ungefähr 4-5-monatige Wachstumsperiode.

Sojabohnensamen besteht hauptsächlich aus zwei Teilen, 8% Samenschale und 90% Keimblätter (Kotyledon). Ihre Form ist rund bis oval und ihre Farbe

schwankt von weißlichem Gelb zu Braun oder Schwarz-Braun. Die Sojabohneninhaltsstoffe setzen sich aus ungefähr 38-43% Proteinen, 18-20% Öl (davon ca. 3-11% Linolsäure) und 24% Kohlenhydraten zusammen. Der Aufbau des Samens wird durch genetische~ sowie Klimafaktoren beeinflusst.

In den USA wurde im Rahmen einer Studie zur Untersuchung der Ölgetreide durch *Goering und Daugherty* festgestellt, dass die Energie für eine nicht bewässerte Sojabohne 20,777MJ/ha und das Gesamtverhältnis Output/Input Energie 4.56 war. Dieses basiert auf einem Samenergebnis von 2623 kg/ha und einem Ölinhalt von 20%. Andererseits ist der Ernteertrag von Sojabohnen nicht so groß, dass er ausreicht, um Pflanzenöl als erschwingliche Energiequelle zu gebrauchen. Ernten in Deutschland ergaben 2.1 t/ha an Sojabohnen mit einem Ölgehalt von 18%. Daraus ergibt sich ein Ölertrag von 0.378 t/ha. Die Sojabohnen werden geerntet, wenn die Blätter gelb werden und der Wassergehalt der Samen unter 20% liegt. Die geernteten Bohnen werden für Lagerung gesäubert und getrocknet. Der Feuchtigkeitsgehalt soll zwischen 12-14% liegen. Danach kann die Bohne in den Silos gespeichert werden. Dadurch wird eine ununterbrochen Versorgung mit Sojabohnen für die Weiterverarbeitung gewährleistet.

### Beispiel Russland: Sonnenblume

Die Sonnenblume (*Helianthus Annuus*) ist eine einjährige Pflanze in der Familie der Asteraceae. Sie ist eine der wichtigsten Ölpflanzen der Welt. Die Bezeichnung "Sonnenblume" *Helianthus annuus* kommt aus dem Griechischen leitet sich von den griechischen Wörtern *helios* und *anthos* ab. *Helios* bedeutet Sonne und *anthos* Blume. „Sonnenblume“ wird aber auch



verwendet, um sich auf alle Pflanzen der Klasse *Helianthus* zu beziehen. Sonnenblumen stammen aus dem Südwesten der USA und Mexiko. In Russland und anderen osteuropäischer Ländern ist die Sonnenblume über Jahrhunderte die Hauptquelle der Speiseölgewinnung gewesen. Der Stamm der Blume kann bis zu 3 Meter hoch wachsen, die Blüte kann einen Durchmesser von 30 cm erreichen.

**Abbildung 20 Sonnenblume**

Die Sonnenblume kann sich unterschiedlichen klimatischen~ und Bodenbedingungen anpassen. Für das Wachstum ist es ausreichend, wenn die Temperaturen nicht unter 10°C fallen. Sonnenblumen wachsen auf einer Vielzahl von Böden, vom sandigen Boden bis zu Lehm. Der beste pH-Wert

liegt zwischen 6.5 bis 8.0. Mit ihrem entwickelten Wurzelsystem, können sie Trockenperioden ausgleichen. Der durchschnittliche Samenertrag liegt bei 1473 kg/ha und hängt von der Bodenart, klimatischen Faktoren sowie der Bewässerung der Felder ab.

Die Sonnenblumenköpfe sollten völlig reif sein, bevor sie geerntet werden. Schätzungsweise nimmt, während der letzten vierzehn Reifetage, die Trockensubstanz der Samen um 50-100% zu. Jedoch ist der Reifeprozess der Samen in einem Blütenkopf nicht konstant. Allerdings kann das Warten, bis alle Samen völlig reif sind, zu erheblichen Verlusten führen. Weitere Verluste können durch Vögel, die die Samen essen verursacht werden, oder durch Abbrechen. Die Samen sollen geerntet werden, wenn die Rückseiten der Sonnenblumenköpfe gelb sind und die äußeren Hochblätter anfangen, braun zu werden. Der Kopf der reifen Sonnenblume enthält ungefähr 50% der Trockensubstanz der gesamten Pflanze. Fast die Hälfte des Gewichts der getrockneten Köpfe ist Samen.

In Russland werden zwei Arten von Sonnenblume angebaut: die Ölsamen- und die nicht- Ölsamen Art. Der Blütenkorb der Ölsamen-Art besteht zu 22-28% aus Fruchtwand und 72-78% aus Kern. Er besteht durchschnittlich aus 40-50 % Öl, 15-20% Protein und 10-15% Faser, das ist abhängig von *Genart* der Sonnenblume und von den Klimafaktoren. Die nicht- Ölsamen Art stellt weniger als 10% der Gesamtsonnenblumenproduktion dar. Ihr Blütenkorb besteht zu 45-50% aus Fruchtwand und zu 50-55% aus Kern. Ihre Achäne hat einen Ölgehalt von 30 bis 35% und einen höheren Fasergehalt von 20 bis 25%.

### Beispiel Der Sudan: Baumwoll- Saat

Baumwolle (*Gossypium* spp.) ist ein Mitglied der Familie der Malvengewächse (Malvaceae). Die Kulturbaumwollarten können in vier



**Abbildung 21 Baumwolle-Saat**

Sorten eingeteilt werden, nämlich *Gossypium Arboretum* L., *Gossypium herbacum* L., *Gossypium hirsutum* L. und *Gossypium barbadense*. Im Sudan wird hauptsächlich *Gossypium barbadense* angebaut. Sie ist besonders langstapelig (29-34 mm) und aus ihr werden feinste Garne hergestellt, die der Produktion hochwertiger Textilien dienen. Baumwolle ist eine der wichtigsten Pflanzen im Sudan, die hauptsächlich wegen ihrer Fasern angebaut wird. Sie ist ein wichtiges

landwirtschaftliches Exportgut. Die optimale Temperatur für die Keimung

der Baumwolle liegt bei 25°C. Bei Temperaturen über 40°C werden die Samenkapseln beschädigt. Baumwolle ist extrem frostempfindlich, sie benötigt ca. 200 frostfreie Tage. Die höchsten Erträge werden im trockenen Klima mit Bewässerung erzielt. Das Reifen sollte in einer regenfreien Periode geschehen, weil Niederschlag nach der Öffnung der Samenkapseln die Qualität der Fasern schadet. Baumwolle benötigt tiefen Boden mit genügender Entwässerung. Der pH-Wert sollte zwischen 6 und 8 liegen. Die Pflanze ist verhältnismäßig salzig, die auf niedrigen Salzigen Boden tolerant ist.

Die Baumwollsamensamen sind spitz, annähernd eiförmig, 8-12 mm lang und von brauner bis schwarzer Farbe. Der Baumwollsamensamenmantel ist verhältnismäßig dünn, aber haltbar. Baumwolle wird hauptsächlich wegen der Baumwollfaser (Naturfaser der Baumwolle) angebaut. Die Faser ist das reife Baumwollsamensamenhaar, das während des Egrenierens mechanisch vom Baumwollsamensamen entfernt wird. Entsprechend der vier Sorten schwankt die Faserlänge von 1,5 bis ungefähr 5cm. Die kurzen unreifen Samensamenhaare bekannt als Linters, die nicht während des entkörnenden Arbeitsablaufs entfernt werden, werden bei der Weiterverarbeitung des Baumwollsamens vom Samen entfernt.

Der Ertrag der Baumwollsamensamen kann unter optimalen Bedingungen bis zu 4 t/ha im Jahr erreichen, ist aber in der Praxis selten über 2,5 t/ha im Jahr. Der Baumwollsamensamen besteht normalerweise aus ungefähr 10-15% Linters, 35-40% Schale (Hull), und 50-55% Kern. Ihr Korn liefert ungefähr 24% Cottonöl und 33% Ölkuchen. Der Kuchen und das Mehl enthalten 23-44% Protein und sind wertvolles Tierfutter. Die Linters haben einen hohen Zellulosefasernanteil, der als Füllmaterial für Kissen und in der Papierherstellung genutzt wird.

### Beispiel Deutschland: Raps

Raps ist eine einjährige wirtschaftliche bedeutsame Nutzpflanze, die aus der Mittelmeerregion stammt. Er gehört zur Familie der Kreuzblütler (Cruciferae) und zur Gattung der Brassicaceae. An den Enden der Stämme wachsen die gold-gelben Blüten in Trauben. Rapssamen sind hart und die schwarz-braunen bis schwarzen Samensamenhülsen klappern. Raps kann im Winter und im Frühling angepflanzt werden. Die Pflanze keimt schnell aus. Im Gegensatz zum Winterraps, der eine tief wachsende Pfahlwurzel besitzt, sorgt vor allem der *Sommerraps* mit einer guten Durchwurzelung des Bodens für dessen gute Durchlüftung und Sauerstoffversorgung. Die nachfolgenden Kulturpflanzen können dann leichter wachsen. Ein sandiger Lehm, reich an Humus und Nährstoffen und mit einem optimalen Kalkgehalt, ist der geeignete Boden für den Rapsanbau. Der *Sommerraps* ist wegen der schwächeren Wurzelent-



wicklung empfindlicher gegen Wasserverlust, als der Winterraps. Der Winterraps wird im Juli, nach einer Vegetationsperiode von ungefähr 330 Tagen geerntet. Nach Raps werden häufig Weizen, Gerste oder Roggen angebaut, denn Raps als Vorfrucht bewirkt einen höheren Kornertrag bei Getreide.

Die Zusammensetzung des Rapssamens schwankt und ist abhängig von den genetischen und klimatischen Faktoren. Der Ölgehalt der Samen von Winter- bzw. Sommerraps liegt bei durchschnittlich 39 - 43% bzw. 38 - 40% und vom Proteingehalt von 29,5 - 57,5%. Im Allgemeinen enthalten Rapssamen über zweimal so viel Öl wie Sojabohnen. Bei der Ernte liegt der Feuchtigkeitsgehalt bei ungefähr 20%. Ein Trocknen kann notwendig sein, um den Feuchtigkeitsgehalt auf 9% zu senken, um so den Samen speicherbar und bereit zur



**Abbildung 22 Raps**

Weiterverarbeitung zu machen. Winterraps hat ein jährliches Samenergebnis von ungefähr 3 t/ha und ein Rückständeertrag von bis zu 10-12 t/ha. Der *Sommerrap* ist zum Ernten bereit, wenn die Pflanze eine braune Farbe angenommen hat und die Samen in ihren Hülsen klappern. *Sommerrap* hat ein Samenergebnis von 1,5 - 2,5 t/ha.

In einer Studie über Ölgetreide in den USA durch Goering und Daugherty wurde festgestellt, dass die Ausgangsenergie für einen nicht bewässerten Frühlingsraps bei 20.066 MJ/ha lag. Diese basiert auf einem Samenergebnis von 1233 kg/ha und einem Ölgehalt von 41%. Das Verhältnis der Energie Output/Input war 4,18.

### Beispiel Indien: Die Färberdistel

Die Färberdistel ist eine schnellwachsende, krautige Pflanze, mit vielen langen scharfen Dornen auf den Blättern. Die Pflanze wächst 30 - 150 cm hoch, mit kugelförmigen gelben, orangen oder roten Blumenköpfen (Capitula), die im Juli blühen. Die Färberdistel stammt vermutlich aus den Regionen des östlichen Mittelmeers und dem persischen Golf. Beim Klima spielt besonders die Temperatur eine wichtige Rolle für das Färberdistelwachstum. Die Pflanze benötigt kühle Temperaturen zwischen 15 - 20°C. Für das Wurzelwachstum und den Rosettenaufbau eine Temperatur zwischen 20 - 30°C während des Stammwachstums, des Blühens und der Samenentwicklung. Die junge Pflanze ist frostbeständig von -7 bis -14°C. Dies ist aber abhängig von der Sorte der Färberdistel.

Die reiferen Pflanzen werden dagegen bereits beim geringfügigen Frost ab - 2°C zerstört. Der beste pH-Wert liegt zwischen 6,5 – 7,5. Wegen ihres tiefen Wurzelsystems ist die Färberdistel tolerant gegenüber Dürre und sie kann auch einen jährlichen Niederschlag von 300 mm/m<sup>2</sup> überleben. Um ein gutes Ergebnis sicherzustellen (zu erreichen), ist es notwendig, dass sie regelmäßig bewässert wird besonders während der Blütezeit. Die



Färberdistel wird hauptsächlich zur Speiseölgewinnung in der Region der trockenen (ariden) und semiariden (halbtrockenen) Tropen von Indien, Mexiko, den USA, Äthiopien und Australien angebaut. Obgleich sie nur ungefähr 0,5% der Gesamtsamenproduktion der Welt ausmacht, wird das Färberdistelöl als erstklassiges Öl, wegen seines hohen Gehalts an Linolsäure (73 - 79%, abhängig von der Kultursorte), geschätzt.

**Abbildung 23 Färberdistel**

Es wird auch für technische Zwecke verwendet. Das Öl trocknet schneller und wird nicht dunkler, deshalb wird es für Farben und Lacke verwendet. Es wird auch als Kraftstoff für Beleuchtung und als Zusatz in der Seifenproduktion verwendet. Die Ernte findet von Mitte August bis Ende September statt. Die exakte Erntezeit ist, wenn die Stiele, die Blätter und die Blumenköpfe austrocknen und ihre Farbe braun werden. Die Samen sollten einen Feuchtigkeitsgehalt von 8 - 9% haben, um sie sicher einzulagern.

Der Samenertrag kann 1,1 - 1,7 t/ha im Jahr erreichen. Mit Bewässerung und guter Düngung können Ergebnisse von 2,8 – 4,5 t/ha im Jahr erzielt werden, aber der Weltdurchschnitt liegt bei 0,5 t/ha im Jahr. Der Ölgehalt in den Samen schwankt von 14,9 bis 47,45%, abhängig von Sorte und Wachstumsbedingungen, wie Klima, Bewässerung bzw. Nichtbewässerung usw.

In der Studie über die Ölgetreide in den USA durch Goering und Daugherty wurde es festgestellt, dass der Energieausgang für die nicht bewässerte Färberdistel um 19.483 MJ/ha beträgt. Dieses basierte auf einem Samenergebnis von 1233 kg/ha und Ölgehalt von 40%. Für die bewässerte Färberdistel war der Energieausgang 44.278 MJ/ha, basierend auf einem Samenergebnis von 2802 kg/ha. Das Verhältnis der Energie output/input verringerte sich von 3,39 ohne Bewässerung auf 1,14 mit Bewässerung.

### 3.1.2 Mehrjährige Pflanzenöl

#### Beispiel Indonesien: Kokosnusspalme

Der Ursprung der Kokosnusspalme ist umstritten. Während einige behaupten, dass sie aus Südasiens stammt, behaupten andere, ihr Ursprung ist im nordwestlichen Südamerika. Die Kokosnusspalme erreicht eine Höhe bis zu 25 m. Ihr Stamm ist schlank und hat keine Äste und Blätter. Die Krone ist aus 2,5 – 5,5 m langen und 1-1,7 m breiten Blättern aufgebaut. Die Früchte sind eiförmig und 15 - 25 cm groß. Die äußere Schicht ist eine



starke faserartige Hülse. Nach 5 - 7 Jahren fängt die Palme an zu blühen. Sie erreicht ihr maximales Ertragsvolumen nach 10 - 12 Jahren, die Reife nach ungefähr 15 Jahren. In der Wildnis kann sie 60 - 100 Jahre alt werden, und unter Kultivierung 50 - 70 Jahre. Die Kokosnusspalme kann auf sandigem Boden angebaut werden und ist in hohem Grade gegen salzigen Boden tolerant. Sie bevorzugt Regionen mit reichlich vorhandenem Tageslicht und regelmäßigem Niederschlag (750 bis 2.000 mm/m<sup>2</sup> jährlich). Kokosnüsse benötigen für ein optimales Wachstum eine hohe Luftfeuchtigkeit

**Abbildung 24 Kokosnusspalme**

(70-80%), deshalb wachsen sie selten in Regionen mit niedriger Luftfeuchtigkeit (z.B. am Mittelmeer), auch wenn die Temperaturen ausreichend sind (regelmäßig über 24°C). Sie sind sehr schwer in trockenem Klima anzubauen und können dort nicht ohne regelmäßige Bewässerung wachsen. Die Kokosnusspalmen vertragen keinen Frost. Sie zeigen Blattverletzung unter 1°C, entlauben ab -1°C und sterben ab -3°C.

Es gibt vier Möglichkeiten, um die Früchte zu ernten:

- mit einem Messer abschneiden, das zu einem Bambuspfeiler angebracht wird;
- jemand klettert den Baum hoch und erntet die Früchte;
- in Indonesien werden Affen für das Ernten ausgebildet. Sie können bis zu 1000 Nüssen pro Tag einsammeln;
- Warten bis die Nüsse herunterfallen, und dann einsammeln;

Vor der Verarbeitung die Nüsse werden sie noch für einige Wochen gelagert werden. Bei der Verarbeitung werden die faserartigen Hülsen entfernt und die Nüsse aufgebrochen. Die geöffneten Nüsse werden während einer kurzen Periode getrocknet, dann wird das Fleisch entfernt und wieder getrocknet, um die Kopra (getrocknetes Kernfleisch) zu gewinnen. Das Trocknen wird in der Sonne oder in Trockenöfen. Die Kopra ist ein Zwischenprodukt, das für die Erdölgewinnung oder für den Export benutzt werden kann. Das Kopra enthält 65-70% Öl. Der Höchstertrag an Kopra ist 9 t/ha im Jahr, die 6 t/ha im Jahr an Öl ergeben. Das Kopra hat einen Trockensubstanzgehalt von 94% und enthält 66% Fett. Das Kopra wird ausgepresst, um das Öl zu erhalten. Der Presskuchen enthält ungefähr 20% Protein und wird als Futter verwendet. Das Kokosnussöl wird hauptsächlich als Speisöl genutzt. Ein geringer Anteil wird in der Seifen- und der Stearin- Industrie verwendet. In den tropischen Regionen wird das Kokosnussöl als Kraftstoff für spezielle Maschinen verwendet.

### Beispiel der Sudan: Purgiernuss

Die Purgiernuss (*Jatropha curcas*) ist eine trockenfeste mehrjährige Pflanze und zählt zur Familie der Wolfsmilchgewächse (Euphorbiaceae). Sie stammt



ursprünglich aus den Tropen Amerikas, aber heute ist sie in den tropischen und subtropischen Regionen verbreitet. Die Purgiernuss ist ein kleiner Baum oder ein Strauch, der normalerweise zwischen 3 - 5 m hoch wächst. Sie bildet pflaumengroße Früchte mit - 3 ölhaltigen Samen. Während die Samen reifen, ändert die Kapsel ihre Farbe von grün zu gelb. Der Ölgehalt der Samen beträgt ungefähr 40% - 60% im Kern und hängt von der Herkunft und den

**Abbildung 25 Purgiernuss**

Anbaubedingungen, wie Klima, Boden, Pflanzabstand, Wasserversorgung und Düngung ab. Die Purgiernuss erzeugt Samen in einer Wachstumsperiode von ein bis zwei Jahren und erreicht ihre maximale Produktivität nach 4 - 5 Jahren. Die Pflanze kann ca. 30 - 50 Jahren genutzt werden.

Nach fünf Jahren Wachstum werden ungefähr 0,4 – 12 t Samen pro ha und Jahr geerntet (Jones N, Miller J.H. 1992). Die Früchte werden entweder geerntet, indem man sie pflückt oder es wird gewartet bis sie reif sind und auf den Boden fallen, um sie dann einzusammeln.

Die Purgiernuss benötigt einen Mindestniederschlag von 500 - 600 mm. Jedoch hängt die genaue Grenze von den lokalen Feuchtigkeitsbedingungen, oder von den speziellen lokalen Bedingungen wie hoher Grundwasserspiegel, usw. ab. Sie ist nicht frostbeständig und:

- Die Purgiernuss kann lange Dürreperioden von 7-8 Monaten überleben und sogar im Wüstenklima angebaut werden;
- Sie gedeiht gut auf fast jedem Boden; im sandigen, salzigen Boden und Kieselboden;
- Niedrige Kosten für ihr Saatgut;
- Hoher Ölgehalt;
- Die Samen sind toxisch aufgrund des Gehalts an Curcin und Phorbolester. Deshalb sind Samen, Öl und Presskuchen für tierische und menschliche Ernährung nicht ohne Vorbehandlung geeignet.
- Die Purgiernuss wird aufgrund des Gehalts an giftigen Curcin und Phorbolester nicht von Schädlinge befallen und auch nicht durch Vieh oder Schafe gefressen;
- Die Größe des Purgiernussbaum erleichtert das Einsammeln der Samen.

Trotz dieser Eigenschaften sind die Bauern in Afrika unfähig, den optimalen ökonomischen Nutzen aus der Purgiernuss zu ziehen, besonders für ihren ganz verschiedenen Gebrauch. Das hat technische, ökonomische, kulturelle und institutionelle Gründe. Der Anbau und die Vermarktung von Purgiernüssen auf privaten und staatlich betriebenen Anbauflächen wird schlecht dokumentiert und es gibt nur wenig Erfahrungen, die weitergegeben werden. Die Märkte für die unterschiedlichen Produkte sind nicht ausreichend erforscht, oder quantitativ bestimmt worden. Infolgedessen haben die Bauern keine ausreichenden Informationen über das Potential und den ökonomischen Nutzen dieser Pflanze.

### Beispiel der Sudan: Neembaum

Der Neembaum ist ein schnell wachsender immergrüner Baum, der zur Familie der Mahagonigewächse (Meliaceae) gehört. Die genaue Ursprungsregion des Neembaum ist nicht sicher bekannt, obgleich man vermutet, dass er aus Myanmar (Burma) und/oder Südindien stammt. Heutzutage wird der Neembaum bis weit in die trockeneren tropischen und subtropischen Regionen der Welt kultiviert, in denen der Niederschlag 400-1200 mm pro Jahr beträgt. Er wächst gut in einem Temperaturbereich zwischen 21-32°C, toleriert aber auch Temperaturen bis zu 50°C. Der Neembaum kann auf verschiedenen Bodenarten angebaut werden, die dick

und gut bewässert sind. Der pH-Wert sollte aber zwischen 5,5 und 7 liegen. Er ist für seinen Widerstand gegenüber Dürre bekannt. Das gelingt ihm



durch eine starke Pfahlwurzel, sowie einem verzweigten Wurzelsystem. Bei ungünstigen klimatischen Bedingungen, verliert er die meisten seiner Blätter. Im Sudan produziert der Neembaum zweimal jährlich Früchte, im März/April und im Juli/August.

Die Früchte sind ellipsenförmige Steinfrüchte, die sich während des Reifens von Grün, über Gelbgrün zu Gelborange färben.

**Abbildung 26 Neembaum**

Der Neembaum wird im Allgemeinen entlang der Straßen, in den Parks und Gärten angebaut, um während des Jahres Schatten und Schutz von der Hitze zu spenden. Der Neembaum wird in Afrika auch zur Wiederaufforstung genutzt. Er wird angepflanzt, um die Bodenerosion zu verringern und Schutzstreifen entlang der Randzone der Sahara zur Verfügung zu stellen.

Die Früchte des Neembauums sind ellipsenförmige Steinfrüchte, die sich während des Reifens von Grün, über Gelbgrün zu Gelborange färben. Die traditionelle Methode, um die Samen einzusammeln, ist das Pflücken per Hand oder das Auflesen der heruntergefallenen Früchte auf den Grund. Der mit einer dünnen süßen Schicht überzogene Samen muss von dieser entfernt werden. Die Kerne stellen nur einen Anteil von ungefähr 35 Prozent der frischen Früchte. Die Samen werden entrindet, bevor man das Öl extrahiert. Entrindete Samen können für 8-12 Monate ohne irgendeine Verschlechterung der Qualität auch gelagert werden.

Man unterscheidet zwischen trockenen und nassen Verfahren für die Entfernung der Frucht von dem Samen. Beim nassen Verfahren werden die Steinfrüchte im Wasser eingeweicht und dann ausgewaschen. Danach werden die Samen in der Sonne getrocknet. Beim trockenen Verfahren werden die Steinfrüchte zuerst in der Sonne oder im Trockner getrocknet. Danach wird der Kern von der Samenschale entfernt. Dies kann mit einer Schälmaschine erreicht werden. Diese Schälmaschine besteht im Wesentlichen aus doppelten Gummirollen, die sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen. Die Rolle presst die Samenschale und gibt den Samenkern frei. Die Mischung aus Samen und Samenschale wird durch ein Sieb in einen Behälter, an der Unterseite der Maschine geführt. Dabei wird die leichte Samenschale durch ein Luftgebläse entfernt.

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Neembaum zu nutzen: - als Brennholzquelle, der optimale Holztertrag beträgt nach 8 Jahren Wachstum 169 m<sup>3</sup>/ha; oder

man nutzt sein Öl als Kraftstoff, die Samen enthalten ungefähr 45% Öl. Der Neembaumölertrag liegt bei ungefähr 600 l/ha.

### Beispiel Indonesia: Die Ölpalme

Die Ölpalme (*Elaeis Guineensis*) ist ein einkeimblättriger Baum, sie wird, zusammen mit Kokosnuss- und Dattelpalme, der *Arecaceae* Familie zugeordnet. Es gibt zwei Hauptsorten von *Elaeis*: *E. guineensis*, die westafrikanische Ölpalme, sie ist die kommerzielle Sorte, und *E. Oleifera*, die südamerikanische Ölpalme, die eine kürzere Statur hat und gegen die *Marchitez* Krankheit resistent ist.



In Hinblick auf die Gesamtölproduktion der Welt, stellt die Ölpalme ungefähr 16% der Pflanzenöle. Damit ist sie momentan der zweitwichtigste Pflanzenöllieferant nach der

**Abbildung 27 Ölpalme**

Sojabohne. Wegen seiner vielseitigen Verwendung in der Lebensmittelindustrie und Technik hat die Ölpalme einen hohen ökonomischen Nutzen. Sie wird deshalb in vielen Ländern der tropischen Klimazone, die innerhalb 10° nördlicher und südlicher Breite liegen und hohe Niederschlagsmengen haben (Minimum 1600 mm/J.), angebaut.)

Bei der Ölpalme wachsen normalerweise die männlichen und weiblichen Blüten an einem Baum. Sie produziert Tausenden Früchte in kompakten Bündeln, deren Gewicht zwischen 10 und 40 Kilogramm schwankt. Die einzelne Frucht, die zwischen 6 und 20 g wiegt, besteht aus einer Außenhaut (das Exokarp) und dem Fruchtfleisch (*Mesokarp*), das das Palmöl in einer faserartigen Struktur enthält. Sie ist kugelförmig oder oval und von dunkel lila bis fast schwarzer Farbe. Wenn die Früchte reift sind, wandelt sich die Farbe zu Orangerot um. In der Mitte der Frucht befindet sich eine Nuss, die aus der Schale (Endokarp) und dem Kern besteht, der selbst ein Öl enthält. Der Baum erbringt seinen ersten Ernteertrag nach 3-5 Jahre und die höchsten Erträge für weitere 15-20 Jahre.

Aus der Palme kann man zwei Öle mit ziemlich unterschiedlichem Fettsäuregehalt gewinnen. Das Primärprodukt ist das Palmöl, welches man aus dem Fruchtfleisch gewinnt und das reich an Palmitin (ungefähr 40%) und Ölsäure (über 40%) ist. Der Samen oder der Kern liefert ein zweites Öl, das Kernöl und entspricht einer Menge von 10-20% des Palmöls. Es besteht meistens aus kurzkettigen Fettsäuren, wie Laurin und Myristinsäure, deren Eigenschaften und Aufbau dem Kokosnussöl ähnlich sind.

Im Vergleich zu anderen Pflanzenölen, erbringt das Palmöl einen hohen Ölertrag von ungefähr 4-5 t/ha an Palmöl und ungefähr 0,5 Tonnen Palmkernöl.

Im Gegensatz zu anderen Ölen wird Palmöl gewonnen, indem man es kocht oder sterilisiert und dann auspresst. Zuerst wird es mit Dampf von 130-140°C ungefähr eine Stunde lang entkeimt. Durch das Kochen oder Sterilisieren wird folgendes erreicht:

- Die Inaktivierung der hydrolytischen Enzyme,
- Das Kochen der Frucht schwächt und erweicht die Struktur, infolgedessen wird während des Digestionsprozesses die Abtrennung des Faserstoffs und seines Inhalts einfacher. Die Kochtemperatur ist hoch genug, um die ölhaltigen Zellen im Fruchtfleisch teilweise zu zerstören und um das Öl leichter auszulösen;
- Wenn für die Sterilisation ein hoher Dampfdruck genutzt wird, führt die Hitze dazu, dass sich die Feuchtigkeit in den Nüssen ausdehnt. Durch Druckabnahme und Trocknung, schrumpfen die Nüsse. Dies führt zu der Trennung des Kerns von der Schale. Demzufolge liegt es auf der Hand, dass die Sterilisation (Kochen) einer der wichtigsten Prozesse bei der Ölverarbeitung ist und die nachfolgenden Verarbeitungsschritte erleichtert;
- Das Wasser (Dampf), das eingeführt wird, führt zu einer chemischen Reaktion, um Gummi und Harze zu spalten. Gummi und Harze führen während der Nutzung des Öls zur Schaumbildung. Einige der Gummi und Harze sind im Wasser löslich. Andere können durch Nassdampf (Hydrolyse) wasserlöslich gemacht werden. Danach können sie während der Ölklärung entfernt werden. Die Stärken, die in der Frucht vorhanden sind, werden auf diese Art hydrolysiert und entfernt.
- Die Erhitzung hilft, die Proteine zu kristallisieren, wobei die ölführenden Zellen mikroskopisch dispergiert werden. Die Kristallisierung des Proteins (Koagulation) führt dazu, dass die ölführenden Zellen zusammenkommen und durch den erzeugten Druck in der Presse leicht heraus fließen.

Die Früchte werden entweder im Wasser gekocht oder mit Dampf sterilisiert. Die ganzen Bündel schließen die Ähren (Fruchtstände) ein. Diese Ähren absorbieren eine große Menge Wasser im Kochprozess, deshalb sollten die Bündel gedroschen werden, bevor man die Früchte kocht. Alternativ kann hoher Druckdampf bei der Erhitzung der Bündel angewendet werden. Dies ist wirkungsvoller und verbraucht weniger Wasser.



Die Bündel werden anschließend gedroschen um so die Früchte zu lösen. Das Bündel der frischen Frucht besteht aus der Frucht, die in den Ährchen eingebettet wird, die auf einem Hauptstamm wachsen. Das manuelle Dreschen wird durchgeführt, indem man die Ährchen vom Bündelstamm mit einer Axt oder einer Machete schneidet und dann die Frucht von den Ährchen trennt. In einem mechanisierten System trennt eine drehende Trommel oder eine fixierte Trommel, die mit drehenden Quirlstäben ausgerüstet wird, die Frucht vom Bündel und lässt die Ährchen auf dem Stamm.

Danach werden die Früchte für 20-30 min auf 95-100°C in einem Digestor wieder erwärmt (gekocht), um die Fruchtwand von den Nüssen zu lösen und die Ölzelle zu brechen. Die Flüssigkeit und die semisoliden Phase werden dann mit einer Spindelpresse, ähnlich der für Samenextraktion verwendeten, getrennt. Die aus der Presse herauskommende Flüssigkeit ist eine Mischung aus dem Palmöl, dem Wasser, dem Faserstoff und der nicht-ölgigen Körper. Wegen der nicht-ölgigen Körper ist die Mischung sehr dickflüssig. Folglich wird der Pressausgangs-Mischung Heißwasser hinzugefügt, um sie zu verdünnen. Diese Verdünnung (Hinzufügung des Wassers) führt dazu, dass die schweren Körper (Feststoffe) an der Unterseite des Behälters sedimentieren. Das Wasser wird in einem Verhältnis von 3:1 hinzugefügt. Die verdünnte Mischung wird durch ein Sieb gegossen, um die groben Fasern zu entfernen. Danach wird die gesiebte Mischung 1-2 Stunden gekocht. Die übrigen Bestandteile Öl und Wasser, können dann wegen der unterschiedlichen Dichte, mittels Schwerkraft im großen Behälter getrennt werden. Zuletzt wird das Öl vakuumgetrocknet (Entfernung der Feuchtigkeit), um die Erhöhung der FFA (freie Fettsäuren) durch autokatalytische Hydrolyse des Öls zu verhindern. Die Rückstände aus der Presse bestehen aus einer Mischung von Fasern und Palmennüssen. Die Nüsse werden von der Faser manuell oder maschinell getrennt. Die Gewinnung des Öls aus den Nüssen ist vergleichbar mit den bereits beschriebenen Prozessen, wie beispielsweise der Rapsölgewinnung.

Die Qualität des Palmöls hängt vom Zustand der Fruchtbündel bei der Anlieferung in der Ölmühle ab. Überreife Früchte quetschen leicht und beschleunigen den freien Fettsäure (FFA) Anstieg durch enzymatische Hydrolyse und beeinflussen den Bleichprozess des extrahierten Öls nachteilig.

## 3.2 Pflanzenölgewinnung

### 3.2.1 Vorbehandlung

Die ölhaltigen Samen erfordern einen Reinigungs- und Vorbereitungsschritt bevor das Öl aus den Samen entnommen werden kann. Fremdstoffe wie Stämme, Schalen, Blätter, gebrochenes Korn, kleine Steine, und fremde Samen verringern den Ertrag des Proteins, des Öls und seine Qualität und erhöhen den Grad der Abnutzung und Beschädigung der Verarbeitungsgeräte der Anlage. Die Beseitigung aller Fremdstoffe erfolgt durch die Nutzung einer Kombination bestehend aus einem Sieb und Luftabsaugvorrichtung. Die Bestandteile, die einen größeren Durchmesser als der des Siebs aufweisen, werden durch das Absaugen entfernt. Bei Baumwollsamensamen ist ein zusätzlicher Schritt notwendig, um die weißen oder flockigen Samenhaare vom Samen zu entfernen. Nachdem man die Samen gesäubert hat, werden die meisten Samen enthülst. Das Schälen oder die Entrindung werden in einem trommelförmigen Behälter durchgeführt, der eine rotierende Platte enthält, die die Samen gegen die glatte innere Wand der Trommel durch Zentrifugalkraft presst. Die Trennung der Schalen und der Kerne wird in einer Maschine vollzogen, die aus Schüttel-Apparate und Luftseparatoren besteht. Die Schale hat einen niedrigen Ölgehalt (normalerweise weniger als 1%). Diese Schalen werden ansonsten das Öl im Presskuchen absorbieren und verringern die Kapazität der Extraktionsgeräte. Zusätzlich enthalten einige Samenschalen hohe schmelzende Wachse, die mit dem Öl extrahieren. Sesam und Sonnenblumensamen werden nicht enthülst, weil ihre kleine Samengröße dem Vorgang erschwert. Eine Zerkleinerung vor der Extraktion des Öls ist notwendig. Um die Ölabscheidung zu erleichtern, werden während der Zerkleinerung, das Speichergewebe, sowie die Samenschale aufgebrochen um eine größere Oberfläche zu schaffen. Dies kann erreicht werden, indem man die Samen vermahlt oder rollt, um Flocken zu produzieren. Die meisten Extraktionsanlagen ziehen es vor, die ölhaltigen Samen abzublätern, wobei es notwendig ist, dass die größeren ölhaltigen Samen fein vermahlt werden, bevor man die Stücke durch die Rollen schickt.

Danach werden die vermahlten oder flockigen ölhaltigen Samen erhitzt oder gekocht. Die Kochtemperaturen schwanken zwischen 80 und 105C, abhängig von der Samenart. Jedoch haben Untersuchungen gezeigt, dass ein Enzym (Phospholipase D), das Entfernen des Phosphatide erschwert. Dieses Enzym ist in hohem Grade aktiv bei Temperaturen zwischen 57 bis 85C, weshalb dieser Temperaturbereich vermieden werden sollte. Das korrekte Kochen erfüllt folgende Aufgaben:

- Den kompletten Zusammenbruch der Ölzellen,

- Die Koagulation des Proteins um die Öltrennung zu erleichtern,
- Das Phospholipide nicht löslich zu machen,
- Der Zerstörung der Schimmelpilze und die Bakterien
- Der Verringerung der Affinität des Öls für feste Oberflächen,
- Der Inaktivierung der Enzyme
- Die Trocknung hin zu einem bearbeitbaren Feuchtigkeitsgehalt.

### 3.2.2 Vorpresen und Extraktion des Öls

Das ist die einfachste und am meisten verwendete Methode für die Extraktion des Pflanzenöls. Bei dieser Methode werden die Kerne erst mit einer Schneckenpresse ausgepresst. Dabei entstehen zwei Produkte, das Pressöl und der Presskuchen mit noch ungefähr 15 - 18% Ölgehalt. Der erhaltene Kuchen ist granuliert oder geflockt.

Nachdem man es sich ausgepresst hat wird der Presskuchen durch eine abblätternde Mühle zu den Flocken von 0.3 bis 0.4 mm Dick geführt. Bei diesem Schritt wird die Oberfläche des Presskuchens vergrößert. Diese Oberflächenvergrößerung führt zu kurzen Diffusionswegen und beeinflusst die nachfolgende Extraktion und damit den erreichbaren Restölgehalt des Schrots.

Die flüssige Extraktion findet in einem Abzieher statt. Dieser Abzieher ist ein geschlossener Behälter, der entworfen ist, um diese Flocken zu waschen, zu extrahieren und ihre Schrott abzulassen. Zwei Arten Abzieher können eingesetzt werden; Immersionsabzieher (Versenkungsextractor) und Filtrationsabzieher. Im Immersionsabzieher werden die Flocken im Lösungsmittel versenkt. Dabei wird das Öl vom Presskuchen herausgelöst. In einem Filtrationsabzieher fließt das Lösungsmittel über die Oberfläche der Partikel und diffundiert durch das Material durch Schwerkraft durch ein Bett des Materials. Das Miscella (das Öl und die Lösemittel) fließt in aufeinanderfolgende Durchläufe durch das Bett, während das Lösungsmittel und das ausgeflockte Öl bewegen sich im Gegenfluss, wobei wird die benutzte Menge an die Lösungsmittel verringert. Man benutzt im Allgemeinen Hexan als Lösungsmittel, auf Grund seiner geringen Kosten und geringeren toxischen Bestandteile. Im Vergleich mit dem Filtrationsabzieher wird beim Immersionsabzieher mehr Lösungsmittel verwendet (angefordert). Den Filtrationsabzieher haben auch die größeren Extraktionskapazitäten, wenige Betriebsprobleme und sie nehmen in weniger Raum (Platz).

Bei der Extraktion wird das Öl durch das Lösungsmittel aus dem flockierten oder granulierten Presskuchen herausgelöst. Dabei entstehen zwei Produkte,

das mit Öl angereicherte Lösungsmittel, die so genannte Miscella und das Lösemittel und Extraktionsschrot. Um das Pflanzenöl in Reinform zu gewinnen, muss das Lösungsmittel von der Miscella getrennt werden. Dieses wird durch mehrstufige Destillation erreicht. Das verdunstete Lösungsmittel wird kondensiert und dann aufbereitet.

### 3.3 Refinement

#### 3.3.1 Degumming - Entschleimung

Unter der Entschleimung (Degumming) versteht man die Entfernung der so genannten Schleimstoffe (u.a. Phosphatide) aus dem Öl, um nachfolgende Raffinierungsverluste zu verringern. Die Entschleimung des Öls wird häufig durch Behandlung mit Heißwasser oder Wasser, plus phosphorige Säure, Zitronensäure oder andere säurehaltige Materialien durchgeführt. Die Entschleimung mit Wasser bezieht die Mischung des Öls mit ungefähr 2% Wasser an 60-80°C für ungefähr 30 Minuten ein, um die Phosphatide zu hydratisieren. Bei der Zugabe von Wasser wird ein Teil der Phosphatide und anderen Schleimstoffe hydratisiert. Sie fallen aus und bilden eine unlösliche Schlammschicht mit anderen sedimentierbaren Stoffen (Sattteilchen, Wasser, Öl). Der Schlamm wird dann vom Öl durch Separatoren getrennt. Je nach der Ölart wird er entweder zum Schrot hinzu gegeben oder weiter verwendet. Die Entschleimung mit Säure und Wasser folgt den ähnlichen Verfahren, ausgenommen wird das Öl erst kräftig mit einer 0.1-0.5% Lösung der 50% Zitronen-, Apfel-, oder phosphorige Säure gemischt und dann wird mit 2% Wasser leicht gemischt. Am Ende wird die Mischung zentrifugiert, um das ausgefällte Material zu entfernen. Bei der Zugabe von Wasser und Säuren werden einerseits nicht-hydratisierbare Phosphatide durch die Säure zerstört, andererseits wird der Hydratationseffekt verstärkt. Die Konzentration der Säure darf nur so stark sein, dass sie die Phosphatide zerstört, nicht aber das Öl.

#### 3.3.2 Neutralisation

Bei der Neutralisation wird eine errechnete Menge an ätzenden Lösungsmitteln (gewöhnlich Natriumhydroxid, aber auch Kaliumhydroxid oder eine Natriumkieselsäureverbindung) zum Öl hinzugefügt, um die freien Fettsäuren in Natriumsalze (sodium salts) umzuwandeln.

Im Allgemeinen werden zwei Arten von Mischer-Reaktor Prozessen verwendet. Nämlich Kurz- und Lang-Mischungs-Prozess. Der Kurz-Mischungs-Prozess wurde in Europa entwickelt, um den Raffinierungsverlust des mit höherem Gehalt an freier Fettsäure

verarbeiteten (neutralisierten)Öls zu minimieren. Das entschleimte Öl wird mit konzentriertem ätzendem Lösungsmittel (12% Natronlauge) an 30-40°C gemischt, dann wird die Mischung zu ungefähr 90C geheizt. Der Seifengrundstoff und andere Bestandteile werden durch eine Zentrifuge getrennt. Das Öl wird mit weiterem Wasser gewaschen und zentrifugiert, um abschließende Spuren der Seife zu entfernen.

Der Lang-Mischungs-Prozess wird in den USA genutzt. Das Öl wird bei Raumtemperatur ungefähr 15 Minuten mit einem niedriger konzentriertem, ätzendem Lösungsmittels gemischt, dann wird es auf 70°C erhitzt, um die Viskosität zu verringern und am Ende wird die Mischung zentrifugiert.

Es ist wichtig, die gewünschte Verringerung des Gehalts an freier Fettsäure mit einem geringen Ölverlust zu erzielen. Das ätzende Soda reagiert mit den Glyceriden, sowie mit freien Fettsäuren. So gibt es unvermeidlich einen Ölverlust durch die Esterspaltung. Ölverluste können auch wegen der Emulgierung in die Wasserphase und durch die Absorption der Tröpfchen in dem Seifengrundstoff auftreten. Diese Verluste können verringert werden, indem man auf die folgende Punkte achtet:

- Die Art des benutzten Alkalis Natriumhydroxid (ätzendes Soda), Natriumkarbonat (Sodaasche), Natriumkieselsäureverbindung, Ammoniumhydroxid;
- Die Stärke der Alkalilauge:
  - je stärker die benutzte Alkalilauge ist, desto stärker ist die Trennung des Gummis und der Pigmente sowie freier Fettsäuren, aber desto höher sind die Ölverluste, wegen der Seifenbildung;
  - niedriger konzentrierte Alkalilaugen können diese Probleme überwinden, können aber zu erhöhten Ölverlusten wegen der Emulgierung führen;
- Es ist ein Überschuss an Alkalilauge über der stöchiometrischen Quantität erfordert, um die freie Fettsäure und phosphorige Säure zu neutralisieren:
  - Je mehr Alkalilauge zugegeben wird (excess), desto größer sind der Seifenbildungsverlust, aber damit auch der reinigende Effekt des Öls;
  - Niedrigere Zugabe (excess) des Alkalis verringern den Seifenbildungsverlust, aber erhöhen die Gefahr der Emulgierung;
  - Wahl der Alkaliart, -stärke und -zugabemenge basiert im Allgemeinen auf Erfahrung mit der Art des Öls, das verarbeitet wird;
- Die Temperatur, bei der die Reaktion durchgeführt wird;
- Die Art und der Grad des Rührens während und nach der Alkalihinzufügung;

- Die Zeit zwischen Alkalihinzufügung und der Seifengrundstofftrennung;

### 3.3.3 Bleichung (Entfärbung)

Das Öl wird mit ungefähr 71°C in einen offenen Behälter gepumpt, der mit einer Dampfrohrschlange und einem Paddelrührer ausgerüstet ist. Das Bleichmittel wird von der Oberseite des Behälters hinzugefügt, dabei muss der Paddelrührer laufen. Die Menge des Bleichmittels hängt von der Art des genutzten Adsorbenttyp und der Art des raffinierten Öls ab. Der Prozentsatz der erforderlichen Menge an Bleicherde schwankt von 0,15 - 3,0%. Nach der Zugabe der erforderlichen Bleichmittelmenge wird die komplette Mischung abschließend auf die Bleichtemperatur von 90-100°C angebracht.

Mit steigender Temperatur nimmt, durch das Verringern der Viskosität des Öls, die Aktivität der Bleicherde zu; andererseits sinkt die Entfärbungsprozess, nachdem die optimale Temperatur erreicht worden ist. Die optimale Bleicherde-Öl Kontakttemperatur hängt von der Ölart und der Art des Bleichsystems ab. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Farben nach der Bleichung dunkler sind, wenn Adsorber zum heißen Öl hinzugefügt werden.

Zunächst zirkuliert das Öl durch eine Filterpresse und zurück zum Bleichbehälter, bis das Öl komplett entfärbt ist. Normalerweise ist eine Kontaktzeit von 15 - 20 min bei einer Bleichtemperatur über dem Siedepunkt des Wassers ausreichend, um die ganze Farbe Pigmente und die Verunreinigungen abziehen. Die Kontaktzeit für die Bleichung wird in zwei Zeitabschnitte eingeteilt: 1. die Zeit im Bleichbehälter und 2. die Zeit im Filter während des Umlaufes.

Nachdem ein Adsorbent selektiv die Verunreinigungen aufgenommen hat, muss er vom Öl entfernt werden, bevor er ein Katalysator für die Farbentwicklung, oder andere nicht wünschenswerte Reaktionen wird. Filtration ist eine einfache und häufig verwendete Methode, um Partikel mit Hilfe eines durchlässigen Filtermaterials von der Flüssigkeit zu trennen. Beispiele verwendeter Filtermaterialien sind: Filterpapier, Filterstoff, Filtrationssieb und Membranen. Filterhilfsmittel wie Diatomit, Perlstein oder Zellulose werden normalerweise in Verbindung mit durchlässigen Filtern für Oberflächenschutz genutzt.

### 3.3.4 Die Desodorierung (Dämpfung)

Die Desodorierung ist der letzte Schritt im Raffinierungsprozess. Die Zielsetzung der Desodorierung ist die Entfernung der Verbindungen, die für

nicht erwünschte Gerüche und Aromen verantwortlich sind, wie restliche freie Fettsäuren (besonders Fettsäuren mit niedrigem Molekulargewicht), Ketone und Alkohole. Der Desodorierungsprozess kann als Zeitstapelbetrieb (batch operation) in kleineren Anlagen oder als kontinuierlicher oder semikontinuierlicher Prozess in größeren desodorierenden Anlagen geleitet werden. Das Öl muss vollständig vom gelösten Sauerstoff befreit werden, da dieser bei hoher Temperatur zur Oxidation führt. Dieses wird erreicht, indem man das Öl auf ungefähr 100°C erhitzt und dann in einen Entlüftungsbehälter führt, der mit einem gemäßigten Vakuumdruck ausgerüstet.

Der Desodorierungsprozess besteht aus einem Wasserdampfdestillationsprozess, bei welchem das Öl auf 200-260 °C unter Vakuum von 2 bis 10 Hg aufgeheizt wird. Danach wird Stripddampf in das Öl eingeblasen, um die flüchtige Bestandteile zu entfernen.

Sobald das Öl unter 120°C abgekühlt wird, wird es mit ungefähr 50-100 mg/kg Zitronensäure versetzt. Die Säure wird vorzugsweise als 30-50% Lösung zugesetzt, um die Gefahr von blockierenden Übergangslinien und -düsen mit kristalliner Zitronensäure, zu minimieren. Die Funktion der Zitronensäure ist es, die Metalle, die im Öl vorhanden sind, zu chelieren, damit das Chelat durch die folgende Filtration entfernt werden kann.

Das desodorierte Öl wird schließlich auf eine Temperatur von 30-35 °C abgekühlt. Um die gewünschten Temperaturen zu erzielen, wird normalerweise kaltes Wasser genutzt.

Metallchelate, Partikel des polymerisierten Öls, und/oder Spuren des Bleichmittels sollten vom abgekühlten, desodorierten Öl entfernt werden. Dieses wird gewöhnlich durch den Gebrauch des Beutel- oder Kerzenfilters erzielt. Ein Anzeichen, dass das Filterelement ausgewechselt werden muss, kann ein Differenzdruckmaß, Verringerung der Öldurchsatzrate oder Operatorurteil sein.

### 3.4 Die Umesterung

Bei der Umesterung der Pflanzenöle reagiert ein Triglycerid mit Alkohol (Methanol), in Anwesenheit einer starken Säure oder Base und produziert eine Mischung aus Fettsäurealkylester und Glycerin. Der Umesterungsprozess mit den Säuren wird vorzugsweise durch Sulfonsäure und Schwefelsäure katalysiert. Diese Katalysatoren bringen sehr hohe Ergebnisse in den Alkylestern, aber die Reaktionen sind langsam und erfordern Temperaturen über 100°C und mehr als 3 h, um die komplette Umwandlung zu erreichen. Das molare Verhältnis des Alkohol/Pflanzenöl ist

einer der Hauptfaktoren, die die Umesterung beeinflussen. Ein Überschuss an Alkohol bevorzugt die Entstehung der Produkte, macht aber andererseits die Trennung der Produkte vom Glycerin schwierig. Deshalb muss das ideale Alkoholverhältnis empirisch hergestellt werden und betrachtet jeden einzelnen Prozess. Die Base-katalysierte Umesterung der Pflanzenöle läuft schneller als die Säure-katalysierte Reaktion. Aus diesem Grund, zusammen mit der Tatsache, dass die alkalischen Katalysatoren weniger korrosiv als säurehaltige Mittel ist, werden in der industriellen Verarbeitung der Pflanzenöl normalerweise Base-Katalysatoren, wie alkalische Metalalkoxide und Hydroxide sowie Natrium- oder Kaliumkarbonate, bevorzugt. Alkalische Metalloxide sind die aktivsten Katalysatoren, da sie sehr hohe Ergebnisse (98%) bei kurzen Reaktionszeiten (30 Minuten) bringen, selbst wenn sie bei niedrigen molaren Konzentrationen (0.5 mol%) angewendet werden. Sie erfordern jedoch die Abwesenheit von Wasser. Alkalische Metallhydroxide (KOH und NaOH) sind preiswerter als Metalloxide, aber weniger aktiv. Dennoch sind sie eine gute Alternative, da sie die gleichen hohen Umwandlungen der Pflanzenöle geben können, indem man die Katalysatorkonzentration auf 1 oder 2 mol% erhöht.

Einige Aspekte einschließlich die Art des Katalysators (alkalisch oder sauer), molares Verhältnis des Alkohol/Pflanzenöl, Temperatur, Reinheit der Reaktionsmittel (hauptsächlich Wassergehalt) und Gehalt an freien Fettsäure, haben einen Einfluss auf den Umesterungsprozess. Der Mechanismus des Umesterungsprozesses wird wie folgt beschrieben:

- Das Kaliumhydroxid wird zum Methanol im abgedeckten Behälter hinzugefügt, dann wird kräftig gerührt bis das Kaliumhydroxid vollständig aufgelöst ist. An diesem Punkt wird das aufgelöste KOH in Kaliummethoxid- Katalysator umgewandelt. Ungelöstes Kaliumhydroxid wird die Umesterung negativ beeinflussen, indem sie die Menge des Katalysators reduziert.
- Die Methanol-Katalysator Mischung wird in das Öl im Hauptreaktor gegossen und schnell gerührt. Das Mischen dauert bei Raumtemperatur ca. 6 Stunden.
- Bei einer guten, abgeschlossenen Reaktion fängt das Glycerin an, sich sofort nach Aufhören des Rührens zu trennen und die komplette Absetzung wird in einer Stunde erreicht. Nach dieser Absetzung wird der gesamte Inhalt des Reaktionsbehälters wieder zusammen gemischt und für 40 Minuten kräftig gerührt. Diese Mischung sammelt und entfernt die Verunreinigungen und die Produkte der unvollständigen Reaktion des Esters. Dabei wird die Zeit für die waschende Phase verkürzt. Nach den ersten 20 Minuten Rühren, wird Wasser bei 15%



des genutzten Ölvolumens in der Reaktion hinzugefügt. Das Rühren sollte weitere 20 Minuten fortgesetzt werden, nachdem das Wasser hinzugefügt wurde. Diese Mischung wird dann über Nacht stehen gelassen, um die Absetzung des Glycerins zu ermöglichen. Eine längere Trennungszeit erleichtert den Waschprozess. Die Glycerin/Wasser Schicht wird abgossen

- Schließlich müssen die restlichen Alkoholmengen und Spuren des Kaliums und Glycerins vom Ester entfernt werden, um seine man den Ester mit Wasser, dessen Menge ungefähr 30% des Estervolumens betragen sollte, wäscht. Dieser Prozess wird mit maschineller Durchmischung und Durchdringung mit Belüftung (Luft oder Sauerstoff- Anreicherung) unterstützt. Beste Resultate sind mit einem maschinellen Rührapparat erreicht worden, dessen Drehbewegung kontrolliert werden kann. Die beste Geschwindigkeit für die genutzte Apparatur beträgt ungefähr 50 bis 70 U/min. Der Rührapparat sollte mit zwei Paddeln an der Achse ausgerüstet werden. Eins in der Esterphase, die sich dreht, um das Glycerin anzuheben und das andere in der Wasserphase. Dieser Prozess zusammen mit der Belüftung entwickelt maximalen Kontakt zwischen Ester und Wasser, und führt dabei zur Entfernung der maximalen Menge an nicht erwünschten Stoffen. Nach einigen Stunden werden die maschinelle Durchmischung und die Belüftung gestoppt. Nach zwei bis drei Tage setzt sich das Wasser ab.

## 4 Thermochemische Umwandlung

Es gibt hauptsächlich drei thermochemische Umwandlungsprozesse, mit denen die Biomasse (Ernterückstände, Holz und Holzabfälle) in Formen einer nützlicheren Energie umwandelt werden können: die Verbrennung (oder Einäscherung), die Vergasung und die Pyrolyse: Die Hauptunterschiede zwischen die Pyrolyse-, die Vergasungs- und die Verbrennungsprozess liegt an der Menge des Sauerstoffes, die zum thermischen Reaktor geliefert werden muss. während der Pyrolyseprozess findet in anaerober Umgebung statt, fordert der Vergasungsprozess eine begrenzte Menge an Sauerstoff an, so dass komplette Verbrennung nicht stattfindet. stattdessen Brennbare Gase wie Kohlenmonoxid und Wasserstoff werden produziert. Der Sauerstoff für die Vergasung wird in der Form der Luft, des Dampfs oder des reinen Sauerstoffes geliefert. Die Verbrennung bezieht die komplette Oxidation der Biomasse in ein Zugang Versorgungsmaterial Sauerstoff ein, um das Kohlendioxyd, das Wasser und die Asche zu erzeugen.

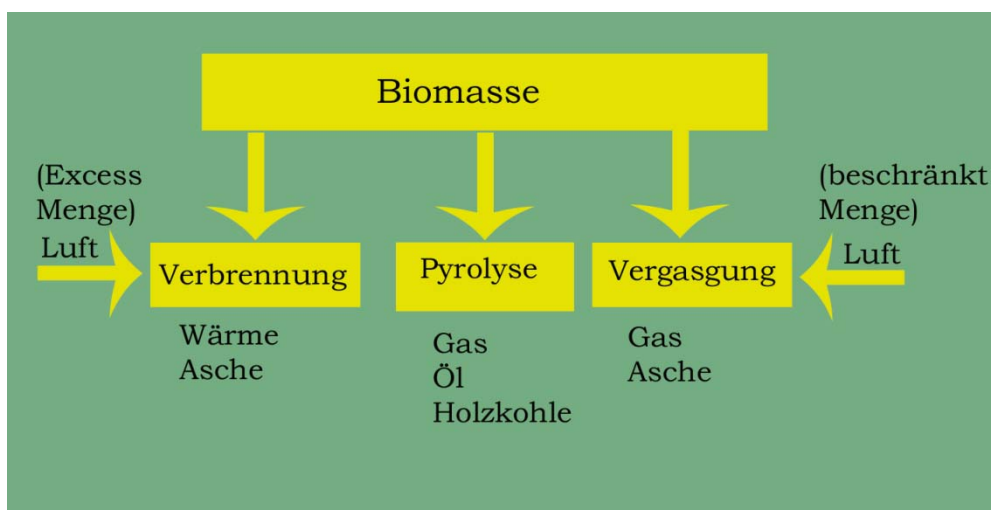


Abbildung 28 Darstellung der Grundlage thermochemische Umwandlungsprozesse

Die Zielsetzungen der Verbrennungsprozess sind, das Rohmaterial thermisch zu zerstören und Wärme zu erzeugen. Demgegenüber ist die Zielsetzung der Vergasungs- und Pyrolyseprozess, das Rohmaterial in die wertvolleren, umweltfreundlicheren Zwischenprodukte umzuwandeln, die für eine Vielzahl von Zwecken einschließlich Chemikalie, Kraftstoff und Energieproduktion benutzt werden können. Von einem Klimastandpunkt bietet Vergasung einige Vorteile über der Verbrennung der Biomasse an. Wie z.B wird die Emmission der Schwefel- und Stickstoffoxide, sowie Partikeln von der Vergasung durch die Gasreinigung erheblich reduziert. Ein zweiter Hauptvorteil ist das Furan und das Dioxin Verbindungen werden nicht

während des Vergasungsprozess gebildet. Die Verbrennung des organischen Materials ist eine Hauptquelle dieser giftigen und krebserzeugenden Schadstoffe und in hohem Grade. Die Gründe, warum das Furan und Dioxine nicht in der Vergasung gebildet werden, sind:

- Der Mangel an Sauerstoff im Umfeld des Vergasers verhindert die Formation (die Entstehung) des freien Chlors von HCl und begrenzt Chlorierung allen möglichen Prekursor Verbindungen im Vergaser.
- Die hohe Temperatur des Vergasungsprozesses zerstört effektiv alle mögliche Furan- oder Dioxin Prekursor in der Biomasse

Die Vergasung der Biomasse basiert auf der teilweisen Verbrennung des Materials mit (in) einer eingeschränkten(bestimmten) Menge von Luft oder Sauerstoff. Durch die Vergasung entstehen Gase nämlich das Kohlenmonoxid, das Wasserstoff und das Methan, die von dem Verfahrensprozess der Vergasung abhängig sind. Während einer Vergasung in einer Luft produziert ein niederenergetisches Gas mit einem niedrigen Heizwert von herum 3-5 MJ/Nm<sup>3</sup>, erbringt eine Vergasung mit reinem Sauerstoff ein Gas mit einem Heizwert von ungefähr 15-20 MJ/Nm<sup>3</sup>, wegen des Fehlens Stickstoff höher (der selbstverständlich in einer Luft anwesend ist). Jedoch ist Produktion mit reinem Sauerstoff kostspielig, und ist folglich in den großen Anlagen wie Kohlevergasung-Kraftwerk nur durchführbar. Für die meisten große Vergasungsbiomasseanlage jedoch ist die Verwendung von Sauerstoff auf ökonomischem Grund nicht erwartet.

Die Vergasungstechnologie bietet das Potential für kosteneffektive und umweltfreundliche Wiederverwendung der Biomasse an. Das erzeugte Gas kann in einem Gasmotor, in einer Gasturbine benutzt werden, oder in einem Dampfkessel verbrannt. Eine der effizienten Verwendung des erzeugten Gases ist BIGCC. BIGCC ist die allgemein verwendete Abkürzung für *Biomass Integrated Gasification Combined Cycle* (Biomasse integrierten Vergasung kombinierten Zyklus). Mit dieser verwendeten Methode wird das Gas, das durch die Vergasung der Biomasse erzeugt wird, erst gesäubert und dann zu einer Gasturbine eingelesen. BIGCC wird auf die Kapazitäten >30MW begrenzt. Sie hat eine elektrische Leistungsfähigkeit von 32-42% und eine gesamte Leistungsfähigkeit bis zu 83%. Die Leistungsfähigkeit hängt stark von der Feuchtigkeit der Biomasse und der entsprechenden Energie ab, die für Vortrocknung der Biomasse benötigt werden. Es wird angenommen, dass sauberes Holz mit Feuchtigkeit von 10% nach Gewicht als Kraftstoff benutzt wird.

## 4.1 Vergasungsrohstoff

### Beispiel die USA Switchgrass



Switchgrass (*Panicum virgatum*) ist ein perennierendes Gras des Sommers, das aus Nordamerika stammt. Es hat einige Eigenschaften, die es als Rohstoff zur Biomasseproduktion verwendbar machen, inbegriffen der Tatsache dass es, gegen viele Schädling und Pflanzenkrankheiten beständig ist, und hohe Ergebnisse mit einer sehr geringen Düngemittelanwendung liefert. Das bedeutet, dass fast keine Notwendigkeit für

**Abbildung 29 Switchgrass**

die Verwendung von landwirtschaftlichen Chemikalien beim Anbau von Switchgrass besteht. Switchgrass ist auch gegen schlechte Boden, Überschwemmungen und Dürre sehr widerstandsfähig. Es gibt zwei Hauptarten von switchgrass: Das *Hochland Switchgrass*, das normalerweise eine Höhe von 5 bis 6 Fuß erreicht und sich an gutem Entwässerungsboden angepasst hat. Das *Tiefland Switchgrass* wird bis zu 12 Fuß hoch und wächst gewöhnlich auf schwerem Boden. Obgleich Switchgrass aus Nordamerika stammt, haben Pflanzenzüchter eine ziemlich große Anzahl von verbesserten Sorten für den Gebrauch als Futtermittel entwickelt. Switchgrass erreicht im ersten Jahr ein drittel des maximal Ertrags, im zweiten Jahr zwei drittel und im dritten Anbaujahr den höchsten Ertrag.

**Tabelle 5 Miscanthus & Switchgrass Eigenschaften**

| Rohstoff Eigenschaften   | Miscanthus | Switchgrass |
|--------------------------|------------|-------------|
| Brennwert (GJ/t)         | 17.1- 19.4 | 18.3        |
| Heizwert (GJ/t)          | 15.8-16.5  | N/A         |
| Feuchtigkeit (%)         | 15         | 15          |
| Dichte kg/m <sup>3</sup> |            |             |
| Zerhackt                 | 70-150     | 108         |
| Ballen                   | 130-150    | 105-133     |

### Beispiel China Miscanthus

Miscanthus auch bekannt als Chinaschilf ist eine mehrjährige Pflanze. Sie gehört zur Familie der Süßgräser (Poaceae) in der Unterfamilie der Bartgrasgewächse (Andropogonoideae). Sie stammt ursprünglich aus dem

ostasiatischen Raum, der das Potential für sehr hohe Zuwachsraten hat. Miscanthus wird im Frühjahr ausgesät und die Binse, die während des Sommers produziert wird, wird im Winter geerntet. Dieses



Wachstumsmuster wird während der Lebenszeit des Getreides jedes Jahr wiederholt, die ungefähr 15-20 Jahre andauert. Miscanthus verbreitet sich natürlich mittels der unterirdischen Speicherorgane (Rhizome). Allerdings ist ihre Verbreitungsart langsam. Diese Rhizome können zerteilt und die Stücke wieder eingesetzt werden, um neue Pflanzen zu produzieren.

**Abbildung 30 Switchgrass**

Der Feuchtigkeitsgehalt der Ernte ist besonders wichtig, wenn sichergestellt sein will, dass eine Biomasse von besonders guter Qualität hergestellt wird, die nicht künstlich getrocknet werden muss. Die Ernte soll des Weiteren vor dem nachfolgenden Wachstum des nächsten Jahres durchgeführt werden, um Schädigung der Sprosse zu vermeiden. Miscanthus gehört wie z. B. Mais oder Hirse zu den C4-Pflanzen und umfasst eine Vielzahl von Varianten, welche vorwiegend als Ziergräser in Gärten Verwendung finden. Die erneute Zufuhr von Nährstoffen von dem Schössling zu den Rhizomen am Spätsommer und am Herbst ist eine Eigenschaft, die den Anbau der Pflanze mit einem niedrigen Verbrauch der Düngemittel ermöglicht. Die Nährstoffe werden in den Rhizomen gespeichert und sind dann im Frühjahr für die jungen Schössling in ausreichender Form vorhanden. Der Feuchtigkeitsgehalt der Biomasse fällt, während der Nährgehalt sich verringert. Diese kombinierten Eigenschaften führen zu einer idealen Eignung in seinem Gebrauch als Kraftstoff. 1. Das hohe Energieergebnis liegt am geringen Feuchtigkeitsgehalt und 2. Der Verbrennungsprozess ist umweltmäßig annehmbar wegen des niedrigen Inhalts von N, von K, von S, von Cl und von Asche. Außer seiner hohen Qualität als Kraftstoff, hat der Rohstoff einen Zelluloseanteil von bis 50%.

Die Ernte kann von Oktober/November bis in den folgenden Frühling geführt werden. Die Verbrennungsqualität ist von der Zeit des Erntens in hohem Grade abhängig. Da der Feuchtigkeitsgehalt des Grases sich von 60-70% im Herbst bis weniger als 20% im April verringert. Während des Winters verliert die Miscanthuspflanze ihre Blätter, und die enthaltenen Mineralien, gelangen durch den auswaschenden Regen in den Boden. Die konsequente Verringerung des Inhalts der Asche, an Kalium und Chlorverbindungen bildet einen technischen Vorteil in Zusammenhang mit dem Verbrennungs- bzw. Vergasungsprozess.

Die beste Kraftstoffqualität wird folglich von dem im Frühling geernteten Miscanthus erreicht. Die Bodenart hat für die Asche und den Mineralgehalt des Grases eine hohe Bedeutung. Sandiger Boden stellt für den Miscanthus die beste Bodenart dar. Dadurch wird der Aschegehalt und Mineraliengehalt niedrig gehalten als beispielsweise auf Lehmboden.

### Die Landwirtschaftlichen Rückstände

Die landwirtschaftlichen Rückstände sind jede mögliche Materialien, die nach der Ernte des gewünschten Anteils übrig geblieben sind. Diese schließen die Stroh, die Schale, die Samen, die Lintres und andere ähnliche Nebenprodukte der Landwirtschaft ein. Zwei Faktoren werden die landwirtschaftliche Rückstandsernte beeinflussen. Die Zeit der Kornernte und Mühelosigkeit der Ernte. Die kleinen Körner wie Weizen, Hafer, Gerste, usw. werden im Allgemeinen am Sommer geerntet. Sie sind trocken und können leicht geerntet werden. Andererseits sind Mais- und Sorghum im Allgemeinen an der Kornernte feucht und werden nicht leicht geerntet.

In den meisten Fällen werden sie auf dem Land gelassen, als Tierfutter verwendet oder in der Ermangelung des Ansammlung Systems werden sie auf dem Feld gebrannt.

Jedoch liegt einen Nachteil für die Einsetzung diesen Rückständen als Rohstoffe für die thermochemische Umwandlung, dass sie einen verhältnismäßig hohen Aschengehalt (2-7%) und in manche Fälle wie Reishülse und Reisstroh haben einen Aschengehalt von 20% und 10%. Dieses ist im Gegensatz zu Holz, in dem der typische Aschengehalt 0.1-2% auf einer Gewichtgrundlage ist. Die Verwendbarkeit bestimmte landwirtschaftliche Rückstände, Gras und Holz wird in Tabelle 4 gezeigt.

Die Ballenerntetechnik ist die effizienteste und kosteneffektivste Methode für das Ernten der landwirtschaftlichen Rückstände und des Grases wie Miscanthus. Alternativ kann ein Viehfutter-Zerkleinerer mit Futterlastwagen auch das Material effizient vom Acker entfernen, aber die folgende Verarbeitung ist schwierig und der Langstreckentransport ist kostenintensiv. Rechteckige oder runde Ballen werden benutzt, für längeren Strecktransport. Runde Ballen gewährleisten eine bessere Qualität in (unbedeckter) aufgedeckter Lagerung. Für hohe Kapazitäten, gute Verarbeitung und für den Transportanforderungen am besten angepasst, werden rechteckige Ballen bevorzugt. Energiepflanzen wie der Neembaum, werden als vollständige Stämme, gehackt oder als Holzspäne mit kommerziellen Holzausschnitt-Ausrüstungen geerntet.

Es ist wichtig einige Faktoren zu betrachten, wenn man die Biomasse als Kraftstoff für thermochemische Prozesse verwendet. Diese schließen Kraft-

stoffvorbereitung wie Zerkleinerung, Feuchtigkeitsgehalt, Ascheerweichungstemperatur und gefährliche Verunreinigungen ein. Ein Kraftstoff mit niedriger Ascheerweichungstemperatur kann zur Entstehung von geschmolzenen Massen führen, die Klinker genannt werden. Diese behindern den thermochemischen Prozess.

Das Trocknen und die Zerkleinerung ist häufig für die Vorbehandlung oder Vorbereitung für die Biomasseumwandlung nötig. Um den erforderlichen Feuchtigkeitsgehalt für die Paketstabilität und eine gute Lagerfähigkeit zu erreichen, wird wegen des hohen Energiebedarfs und der hohen Kosten durch einen künstlichen Trockner, das natürliche Trocknen der Rückstände auf dem Acker bevorzugt. Dies gilt so lange, wie sich die Jahreszeit und das Wetter für das Trocknen eignet. Der Biomassefeuchtigkeitsgehalt soll im Allgemeinen auf 12 bis 15% verringert werden, um eine Biomasseverschlechterung zu verhindern, wenn diese für lange Perioden gelagert werden soll. Dies verhindert den Verfaulungsprozess und ermöglicht eine langfristige Lagerung. Eine Zerkleinerung der meisten landwirtschaftlichen Rückstände ist im Allgemeinen erforderlich, bevor man sie in einen Energieumwandlungsprozess einbeziehen kann. Futtererntetechniken wie Chopper können verwendet werden, um die Biomassematerial zu zerkleinern. Dadurch wird die erforderliche Zerkleinerung mit niedrigem Energiebedarf erreicht.

Eine spezielle Betrachtung muss der Förderausrüstung der Biomasse gegeben werden, wegen ihrer Tendenz zur Massenbildung in den Zufuhrbehältern. Eine Einzugsschnecke und andere Förderausrüstungen die für das Heu und die Silage entwickelt wurden, können für die Biomasseförderung benutzt werden.

**Tabelle 6 Landwirtschaftliche Rückstände, Holz und Gras Eigenschaften**

| <b>Rohstoff Art</b>    | <b>Brennwert<br/>KJ/kg</b> | <b>Heizwert<br/>MJ/kg</b> | <b>Asche<br/>%</b> | <b>F%</b> |
|------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------|-----------|
| <b>Stroh</b>           |                            |                           |                    |           |
| <b>Triticale</b>       | -                          | 17.1                      | 5.9                | 15        |
| <b>Alfalfa</b>         | 18.45                      | 17.36                     | 7.25               | -         |
| <b>Gerste</b>          | 17.31                      | 16.24                     | 10.30              | -         |
| <b>Bohne</b>           | 17.46                      | 16.32                     | 5.93               | -         |
| <b>Weizen</b>          | 17.51                      | 17.2                      | 8.90               | -         |
| <b>Färbeldistel</b>    | 17.51                      | 18.10                     | 4.65               | -         |
| <b>Reishülse</b>       | 14.56                      | 13.76                     | 24.36              | -         |
| <b>Roggen</b>          | 17.7                       | 17.4                      | 3.97               | -         |
| <b>Der Hafer</b>       | 17.7                       | -                         | 4.5                | -         |
| <b>Die Erdnuss</b>     | 1.3                        | 12.1                      | 17.5               | 12.1      |
| <b>Sonnenblume</b>     | -                          | 15.8                      | 12.2               | 15        |
| <b>Raps</b>            | -                          | 17.1                      | 6.2                | 15        |
| <b>Der Mais Stover</b> | 17.65                      | 16.52                     | 5.58               | -         |
| <b>Kokosnusspalme</b>  | -                          | 13-16                     | -                  | 8         |
| <b>Baumwolle</b>       |                            |                           |                    |           |
| <b>Stängel</b>         | -                          | 16                        | -                  | 10-12     |
| <b>Gin Trash</b>       | -                          | 14                        | -                  | 9         |
| <b>Ölpalme</b>         |                            |                           |                    |           |
| <b>Frucht</b>          | -                          | 5                         | -                  | 63        |
| <b>Rückstände</b>      | -                          | 11                        | -                  | 40        |
| <b>Faser</b>           | -                          | 15                        | -                  | 15        |
| <b>Shells</b>          |                            |                           |                    |           |
| <b>Die Bagasse</b>     | -                          | 6.0                       | 3.2-5.5            | 40-50     |
| <b>Zuckerrohr</b>      |                            |                           |                    |           |
| <b>Gras</b>            | 17.1-19.4                  | 15.8-16.5                 | 1.5-4.5            | -         |
| <b>Miscanthus</b>      | 18.3                       |                           | 4.5-5.8            | -         |
| <b>Switchgrass</b>     |                            |                           |                    |           |
| <b>Holz</b>            |                            |                           |                    |           |
| <b>Der</b>             | 20.5                       | N/A                       | 0.45               | -         |
| <b>Neembaum</b>        |                            |                           |                    |           |

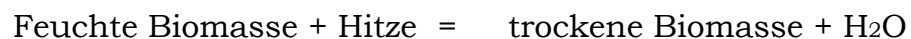
**F = Feuchtigkeit**



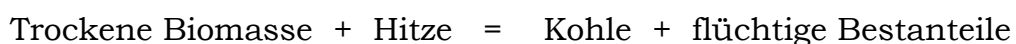
## 4.2 Vergasung

Die Vergasung der festen Brennstoffe bezieht eine Kombination der Aufspaltungs- und Entgasungsreaktionen (devolatilizationsreaktionen) in ein hohen Temperaturumgebung von um 1200-1400C mit kontrollierter Sauerstoff- oder Luftzufuhr ein, um flüchtige Verbindungen und eine Holzkohlematrix zu produzieren. Dieser Prozess findet in einem Vergaser. Man unterscheidet sich zwischen Festbettvergaser und Wirbelsichtvergaser. Die Beschreibung dieser verschiedenen Arten wird in folgende dieser Arbeit erläutert. Die Aufgabe des Vergasers ist, flüchtige Gase und Karbon Holzkohle zu produzieren. Die flüchtigen Anteile in CO, H und CH<sub>4</sub> Gase umzuwandeln, und die Holzkohle in CO umzuwandeln. Wenn die Verweilzeit in der heißen Zone des Vergasers zu kurz ist oder wenn die Temperatur zu niedrig ist, können mittelgroße Moleküle als Holzteer und Öle in der niedrigen Temperatur Reduktionszone entgehen und kondensieren. Während die Biomasse durch einen Vergasungsreaktor oder einen Vergaser durchströmt, ist physikalische, chemische und thermischen Prozesse folgend oder gleichzeitig aufgetreten werden, abhängig von dem Reaktordesign und dem Rohstoff.

- Das Trocknen: Als die Biomasse ist erheizt und seine Temperatur nimmt zu, ist das Wasser der erste Bestandteil, der entfaltet wird.



- Die Pyrolyse: Während die Temperatur der trockenen Biomasse sich erhöht, findet der Pyrolyseprozess statt und die Biomasse wird in Holzkohle umgewandelt. Die Holzkohle ist die restliche Feststoffe, die aus organischen und anorganischen Materialien bestehen. Nach Pyrolyse hat die Holzkohle eine höhere Konzentration an Karbon als die trockene Biomasse;



- Die Vergasung: Die Vergasung ist das Resultat der chemischen Reaktionen zwischen Karbon in der Holzkohle und Dampf, Kohlendioxyd und Wasserstoff im Vergaser sowie chemische Reaktionen zwischen den resultierenden Gasen. Abhängig von den Prozessbedingungen der Vergasung kann oder kann möglicherweise nicht die restliche Holzkohle eine bedeutende Menge an organischen Inhalt oder Heizwert haben.

## Verfahren zur Verwendung zur Energieerzeugung

- Die Verbrennung: Die erforderliche thermische Energie für die Vergasungsreaktionen kann direkt bei der Verbrennung der Holzkohle oder der trockenen Biomasse und in einigen Fällen der flüchtigen Bestandteile innerhalb des Vergasers abgeleitet oder indirekt bei der Verbrennung der Biomasse, der Holzkohle, oder sauberes Gas außer der Vergaser und dann wird die erforderlichen Wärme abgeleitet.

Im Entgasungsschritt oder auch die Pyrolyse werden die flüchtigen Anteile wie Methan und höheren Kohlenwasserstoffen werden durch die Tätigkeit der Hitze abgetrieben und hinterlässt ein reaktives Karbon Holzkohle. Die flüchtigen Produkte werden teilweise bei den höheren Temperaturen in den Sekundärreaktionen verbrannt, während die Holzkohle C weiter in Anwesenheit der eingeschränkten Luft, des Sauerstoffes oder des Dampfs vergast, um die zusätzlichen brennbaren Gase zu produzieren, die das produzierte Gas geben.

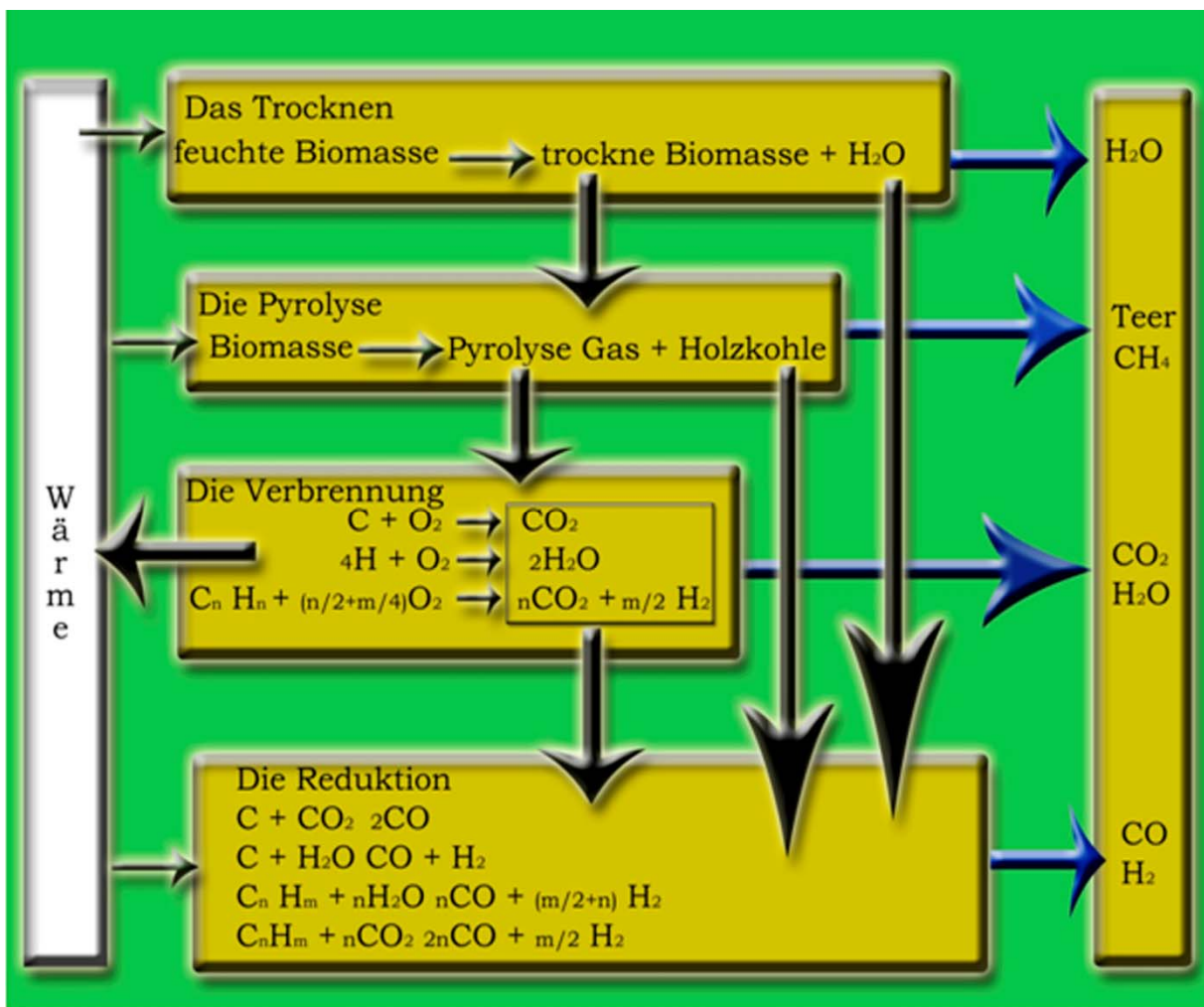


Abbildung 31 Darstellung des Vergasungsprozesses

## 4.3 Vergaser

### 4.3.1 Festbettvergaser

#### 4.3.1.1 Gegenstromvergaser

Diese ist der einfachste Vergasungsapparat. Die Biomasse wird an der Oberseite des Reaktors eingegeben. Luft wird an der Unterseite genommen, und das Gas verlässt an der Oberseite der Vergaser. Durch die entgegengesetzte Bewegungsrichtung von Biomass- und Gasstrom bilden sich im Reaktor abgegrenzte Reaktionszonen, in denen primär die jeweiligen Teilprozesse ablaufen. Die Biomasse strömt durch die Aufheizungs- und die Trocknungs-, die pyrolytische Zersetzungs-, die Reduktions-, und die Oxidationszone nacheinander durch. In der Trocknungszone wird die Biomasse getrocknet und in der Pyrolytische Versetzungszone wird sie in flüchtige Gase und in feste Holzkohle zerlegt. Die Hitze für pyrolytische Zersetzung und Trockner wird hauptsächlich durch aufsteigende erhitzte Gasführung und teils durch die Strahlung von der Oxidationszone überträgt.

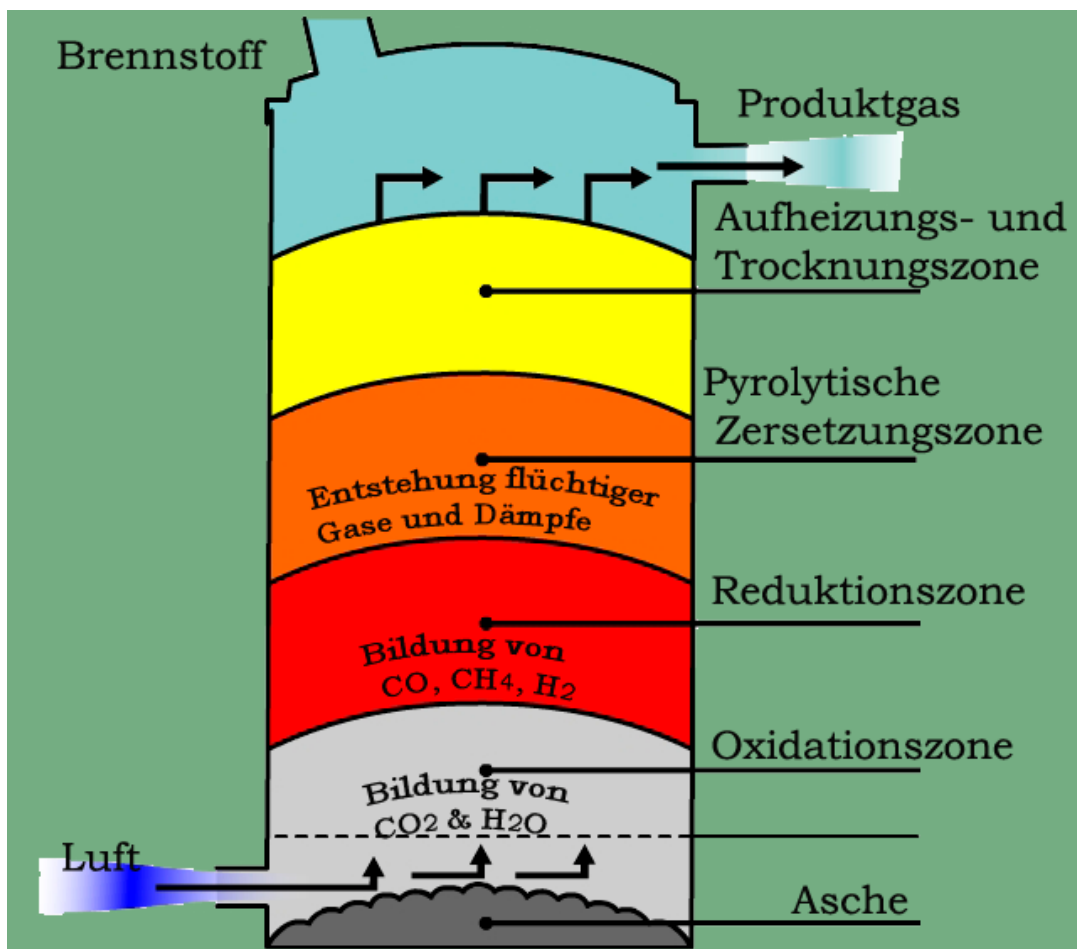


Abbildung 32 Gegenstromvergaser

In der Reduktionszone treten viele Reaktionen auf (hineinziehend Holzkohle, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf) in welchem Kohlenstoff umgewandelt wird und Kohlenmonoxid und Wasserstoff werden als der Hauptbestandteil des Erzeugten Gases produziert. In der Oxidationszone wird die restliche Holzkohle verbrannt und liefert dabei Wärme. Das bei der Oxidation entstandene Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) zu Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) reduziert Wasserdampf zu Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) reduziert. Der Wasserstoff kann mit dem festen Kohlenstoff in Methan umgewandelt werden.

Die Hauptvorteile dieses Vergaser sind seine Einfachheit, hoher Holzkohle Abbrand, und interner Wärmeaustausch, den das zu niedrige Gas-Ausgang Temperaturen und hohe Vergasung-Leistungsfähigkeiten führt. Wegen des internen Wärmeaustausches wird die Biomasse an der Oberseite des Vergasers getrocknet. Folglich können Biomasse mit Feuchtigkeitsgehalt (bis 60%, nasse Grundlage) benutzt werden. Außerdem kann diese Art von Vergaser verhältnismäßig kleine Rohstoffpartikel verarbeiten.

Nachteile dieses Vergasers sind die hohen Mengen des Teers und Pyrolyseprodukte, die auftreten, weil das Pyrolysegas nicht durch die Oxidationszone durchströmt und ist folglich nicht verbrannt. Bei der Nutzung des Gases in Maschinen wird eine erhebliche Reinigung des Gases angefordert.

### 4.3.1.2 Gleichstromvergaser

In einem Gleichstromvergaser wird die Biomasse an der Oberseite des Vergasers zugegeben und die Luft tritt entweder an der Oberseite oder an den Seiten der Vergasungsapparat ein. Das Gas tritt an der Unterseite des Reaktors aus und bewegt sich in die gleiche Richtung.

Die Zonen dieses Vergasers sind ähnlich wie der Gegenstromvergaser, aber sie unterscheidet sich in dem Aufbau (Anordnen) dieser Zonen. Die Biomasse wird in der trocknenden Zone getrocknet, dann versetzt in der in der Destillationszone. Diese Zonen werden hauptsächlich durch Strahlungswärme (und teils durch die Konvektion) von der Oxidationszone geheizt, wo ein Teil der Holzkohle gebrannt wird. Pyrolysegase strömen auch durch diese Zone durch und werden verbrannt.

Der Umfang, in dem die Pyrolysegase verbrannt werden, hängt vom Design, von den Rohstoffen und von den Fähigkeiten des Operators ab. Nach der Oxidation Zone strömen die restliche Holzkohle und die Verbrennungsprodukte (Kohlendioxyd und der Wasserdampf) zur Reduktionszone durch, in der  $\text{CO}$  und  $\text{H}_2$  gebildet werden. Der Hauptvorteil

dieses Vergasers ist die Produktion eines Gases mit dem niedrigen Teerinhalt, der für Maschinen verwendbar ist.

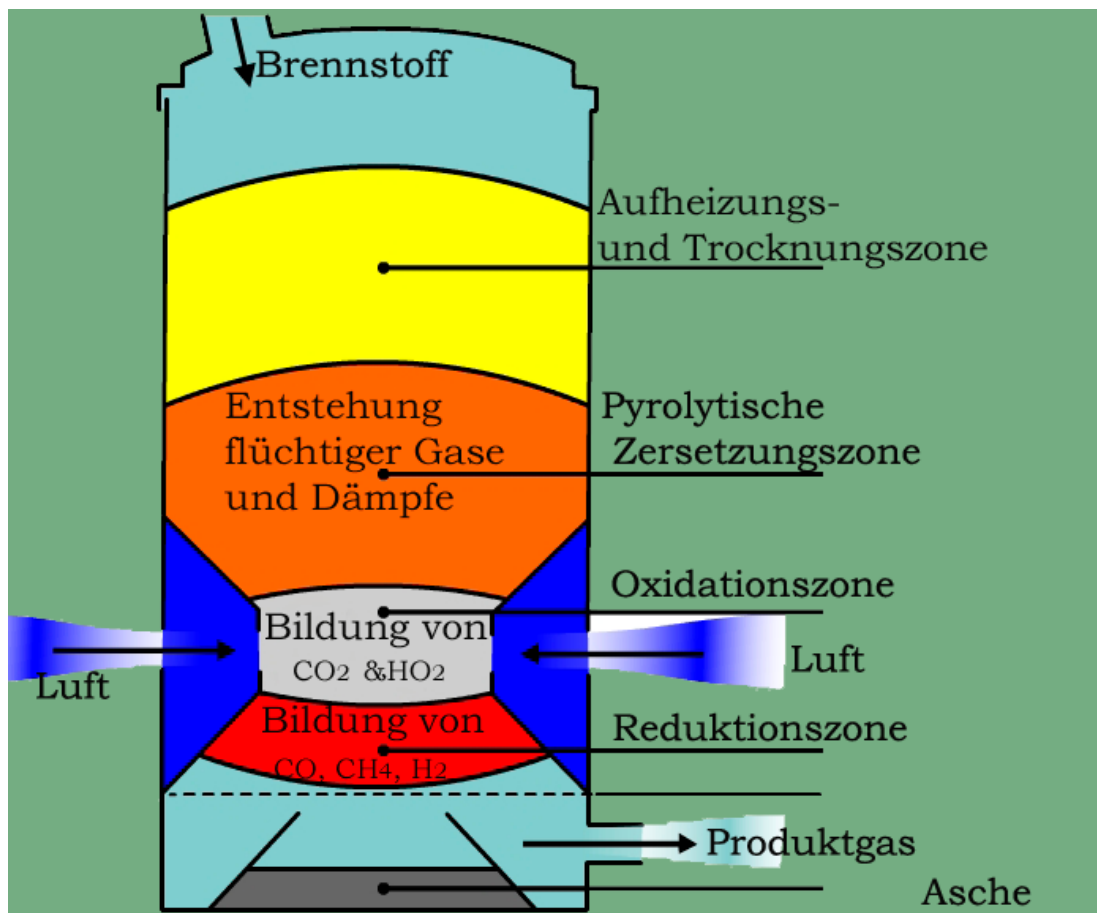


Abbildung 33 Gleichstromvergasers

Nachteile dieses Vergasungsapparats können zusammengefasst werden, wie folgt:

- Hohe Mengen an Asche und Staubpartikel bleiben im Gas, weil das Gas durch die Oxidationszone durchströmen muss, wo kleine Asche-Partikel mit dem Gas anhängen.
- Die Anforderungen an den Rohstoff sind verhältnismäßig streng; der Rohstoff muss gleichmäßig in einer Größe von ungefähr 4 bis 10 cm (z.B. Pellets) zerkleinert werden, um die Einladungsöffnungen nicht zu blockieren und die Pyrolysegase herunter durchströmen zu lassen.
- Der Feuchtigkeitsgehalt der Biomasse muss kleiner als 25% sein (auf einer nassen Grundlage).

- Die verhältnismäßige hohe Temperatur des erzeugten Gases führt zur niedrigeren Vergasungsleistungsfähigkeit.

### 4.3.1.3 Öffnen-Kern Vergaser

Öffnen-Kern Vergaser sind besonders aufgebaut werden, um die feine Materialien mit niedriger Schüttdichte (zum Beispiel, Reishülse) zu vergasen. Wegen der niedrigen Schüttdichte der Rohstoff kann keine Einladungsöffner angewendet werden. Dieses vermeidet die Behinderung (Erschwerung) oder das Stoppen der des Rohstoffzuflusses. Spezielle Vorrichtungen wie drehende Gitter können eingeschlossen werden, um den Rohstoff zu rühren und die Asche zu entfernen. Reishülse Vergaser erfordern insbesondere ununterbrochene Entzugssysteme der Asche wegen des hohen Aschengehaltes der Reishülsen (ungefähr 55% des initialen Rohstoffvolumens). Die Unterseite des Vergasers wird in einem Wasserkessel eingestellt, dass als ein Transportmittel für den Abbau der Asche dient.

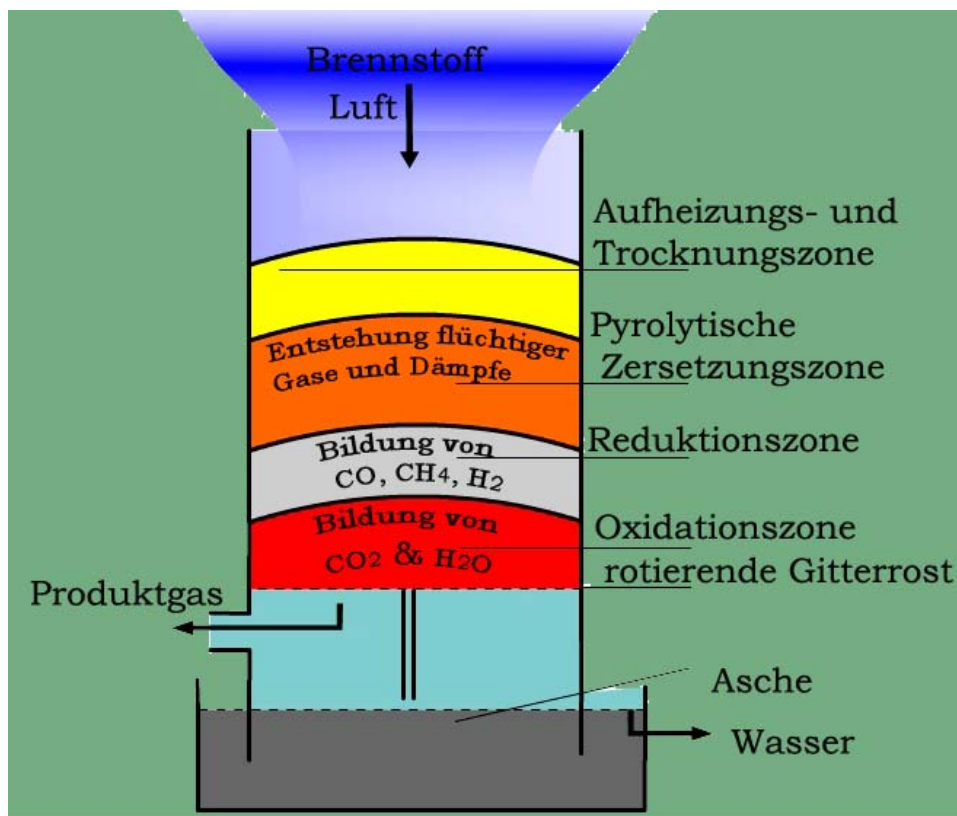


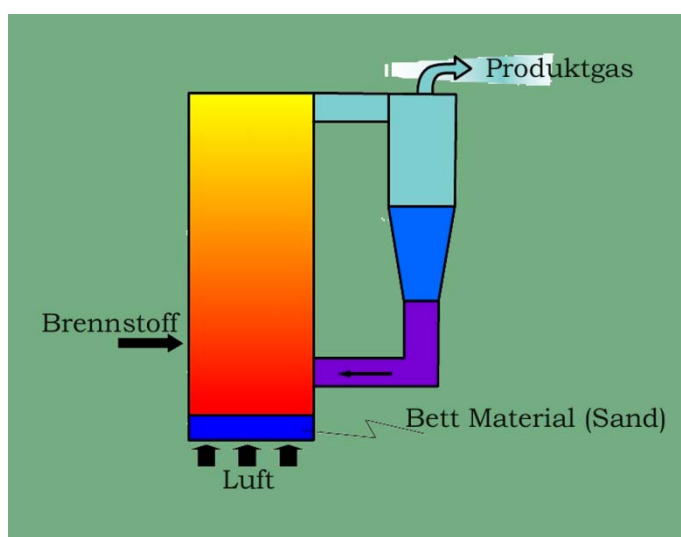
Abbildung 34 Öffnen-Kern Vergaser

**Tabelle 7 Die Eigenschaften der Gleich-, Gegenstrom, Öffnen-KernVergaser** Van Swaay and others 1994; BTG 1995

| Rohstoff                           | Gleichstromvergaser | Gegenstromvergaser | Öffen-core          |
|------------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Feuchtigkeit<br>(% wet basis)      | 12 (max. 25)        | 43 (max. 60)       | 7 - 15<br>(max. 15) |
| Asche<br>(% dry basis)             | 0.5 (max. 6)        | 1.4 (max. 25)      | 1 - 2<br>(max. 20)  |
| Größe (mm)                         | 20 - 100            | 5 - 100            | 1 - 5               |
| Gas Ausgang<br>Temperatur          | 700                 | 200-400            | 250-500             |
| Teer g/Nm <sup>3</sup>             | 0.15 - 0.500        | 30-150             | 2 - 10              |
| Erzeugtergas<br>KJ/Nm <sup>3</sup> | 4.5 - 5.0           | 5.0 - 6.0          | 5.5 - 6.0           |

### 4.3.2 Wirbelschichtvergaser

Der Wirbelschichtvergaser wurde ursprünglich entwickelt, um funktionsbedingte Probleme der Festbettvergaser bei der Vergasung von Biomasse mit hohem Aschegehalt zu überwinden. Die Vergasungstemperatur der Wirbelschichtvergaser ist verhältnismäßig niedrig und liegt ungefähr bei 750-900°C. Im Vergleich dazu liegt die Temperatur bei



den Festbettvergasern in der Oxidationszone bei bis zu 1500°C. Der Rohstoff wird entweder in die Wirbelschicht (stationäre Wirbelschicht oder zirkulierende Wirbelschicht) meist mittels einer Schnecke eingespeist oder über den Freiraum (Freeboard; d.h. Raum oberhalb des Wirbelbettes) auf die Wirbelschicht eingeleitet.

**Abbildung 35 Wirbelsichtvergaser**

Hier werden Dampf, reiner Sauerstoff, oder Luft als Vergasungsmittel verwendet. Das Bett benimmt sich wie eine Flüssigkeit und ist durch hohe Turbulenz gekennzeichnet. Rohstoffpartikel mischen sich schnell mit dem Bettmaterial. Daraus resultieren ein schneller Pyrolyseprozess und eine verhältnismäßige Menge an Pyrolysegase.

Wegen der niedrigen Temperaturen ist die Teer-Umwandlungsrate bei Wirbelschichtvergasern nicht sehr hoch. Im Gegenteil zu dem

Festbettvergaser kann das Verhältnis von Luft zu Rohstoff verändert werden, und infolgedessen kann die Betttemperatur leicht gesteuert werden. Aufgrund der Mischung der Feststoffe sowie das Aufströmen der Partikel, kann eine stationäre Wirbelschicht keine hohen Feststoffumwandlungen erzielen. Eine zirkulierende Wirbelschicht zeichnet sich durch eine sehr gute Wärme- und Stoffübertragung aus, sowie einer längeren Aufenthaltszeit der Biomasse. Infolgedessen kann eine bessere Umwandlung erzielt werden. Auf der Grundlage vom Gas-Feststoff-Kontaktprozess kann man Wirbelschichtvergaser in folgende zwei Arten untergliedern:

- stationäre Wirbelschicht; die stationäre Wirbelschicht wurde 1926 eingeführt. Die Einfachheit der stationären Wirbelschichtentwicklung stellte sich für die Kohlevergasung im Gegensatz zu Zirkulierende Wirbelschichtvergaser als attraktiver heraus. In den Biomasseindustrien werden sie von kleinen bis zu mittleren (<25 MW<sub>th</sub>) Einrichtungen eingesetzt.
- Zirkulierende Wirbelschicht; die Zirkulierende Wirbelschicht hat gegenüber der stationäre Wirbelschicht mehrere Vorteile. Eine höhere Karbonumwandlung, mehr Leistungsfähigkeit und kleinere Größen der Anlagen. Infolgedessen sind sie die weit verbreitetsten Anlagen bei kleinen (einige MW<sub>th</sub>) bis zu großen (100MW<sub>th</sub> oder mehr) Biomasseprojekten.

Der Wirbelschichtvergaser eignet sich für die Vergasung von Biomasse gut und zwar aus zwei Gründen:

- Der Wirbelschichtvergaser-Prozess wird bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen durchgeführt. Rohstoffe mit hohem Aschegehalt, können in Wirbelschichtbetten ohne das Problem der Ascheanlagerung vergast werden.
- In Wirbelschichtvergaser können unterschiedlichen Arten und Mischungen von Rohstoffen verarbeitet werden. Diese Eigenschaft ist für Biomasse, wie landwirtschaftliche Rückstände und Holz besonders attraktiv, da man sich auf die jahreszeitlich bedingt vorhandenen Rohstoffe zur Vergasung einstellen kann.

Die Vorteile der Wirbelschichtvergaser im Vergleich mit Festbettvergaser sind zusammengefasst wie folgt:

- Die Kompaktbauweise: aufgrund der höheren Wärmeübertragung und der hohen Reaktionsgeschwindigkeit, wegen der intensiven Mischung im Bett.
- Flexibilität der Anpassung bei verschiedenen Feuchtigkeits-, Aschegehalt und anderen Rohstoffeigenschaften (flockigen und



feinkörnigen Materialien mit hohem Aschegehalt, niedriger Schüttdichte oder beides zusammen)

- Niedriger Asche-Schmelzpunkt wegen der niedrigen Reaktionstemperaturen.

Die Nachteile sind wie folgt:

- Energie wird benötigt für die Kompression des Gasdampfs
- Komplizierter Betriebsvorgang wegen der aufwändigen Steuerung beim Versorgungsverhältnis zwischen Luft und den festen Brennstoffen
- hoher Teer- und Staubgehalt des erzeugten Gases.
- Hohe Gastemperaturen, diese hinterlassen Alkalimetalle im Dampfzustand
- Unvollständige Verbrennung des Kohlens.

### 4.4 Gas Reinigung

Bevor das erzeugte Gas in einem Gasmotor oder einer Turbine benutzt werden kann, muss es vom Teer, den Alkalimetallen und vom Staub gereinigt werden. Der Teergehalt muss zum Beispiel unter  $50 \text{ mg/Nm}^3$  für Gasmotoren, unter ungefähr  $15 \text{ mg/Nm}^3$  für Turbinen und auf möglichst  $0.02 \text{ mg/Nm}^3$  für Synthesegassysteme verringert werden. Teer kann in den Ventilen und den Armaturen kondensieren und ihre Arbeitsleistung negativ beeinflussen. Alkalimetalle, Staub und Teer-Korrosion verursachen eine Abnutzung der Zylinderwände und Zylinderkolben. Wenn das Gas als Wärmeenergie benutzt wird, sind die Anforderungen an der Reinigungsqualität des Gases nicht so hoch, besonders wenn das Gas bei einer hohen Temperatur, während des Transportes zum Brenner bleibt (dies verhindert, dass Teer und Alkalimetalle kondensieren).

#### 4.4.1 Teerabscheidung

Wenn die Biomasse aufgeheizt wird, brechen die molekularen Bindungen; die kleinsten Moleküle sind Gase, und die größeren Moleküle werden Primärteer genannt. Primärteer sind die Fragmente des ursprünglichen Materials. Durch weitere Reaktionen entsteht bei gleicher Temperatur Sekundärteer und bei höheren Temperaturen wird tertiärer Teer produziert.

Teer kann vom Gasproduzenten durch chemische und physikalische Methoden entfernt werden. Chemische Methoden zerstören den Teer und wandeln ihn in kleinere Moleküle um. Physikalische Methoden entfernen nur

den Teer. Einige Vorrichtungen für Teerumwandlung und -entfernung sind in der Tabelle 8 aufgelistet.

Das katalytische Cracken wird gegenüber anderen Formen der Reinigung bevorzugt, weil es den Heizwert des Teers beibehält, indem es ihn in andere Gase umwandelt. Kalzinierter Dolomite und Nickel-Base Katalysatoren werden nach dem Vergaser, für das katalytische Cracken des Teers benutzt.

**Tabelle 8 chemische und physikalische Methoden für die Teerentfernung**

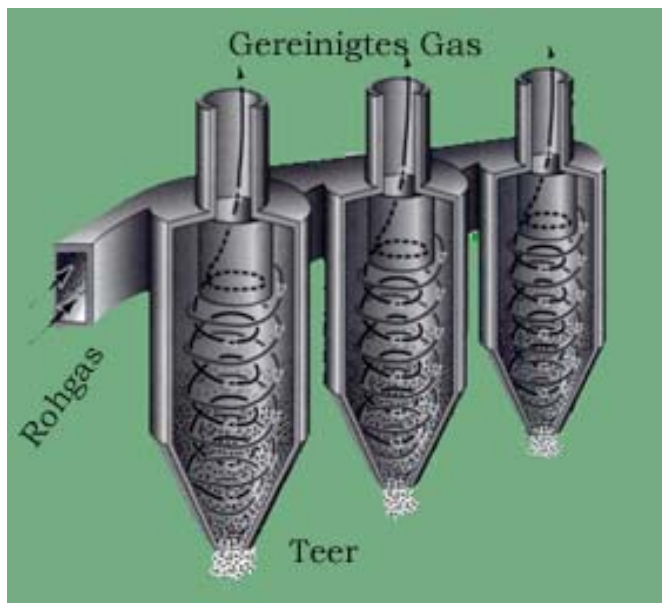
| Chemische Methoden<br>(Teer-Umwandlung)                        | Physikalische Methoden<br>(Teer-Entfernen)     |
|--|--|
| <b>Katalytisches Cracken</b>                                   | Zyklone  |
| <b>Das thermische Kracken</b>                                  | Filter(das Baffle, Keramik, granuliert Betten) |
| <b>Plasmareaktoren (Pyroarc, Corona)</b>                       | elektrostatisches Filter                       |
| <b>Nutzung von katalytischen Bettmaterialien (das Olivin )</b> | Wäscher  |

*Biomasse Technolgy Group* hat den Rückstrom katalytischer Teer-Konverter (Reverse-Flow, *Catalytic Tar Converter RFTC*) entwickelt, um den Teer bei der Gasproduktion in eine leistungsfähige Energie umzuwandeln. Das rohe erzeugte Gas von einem Biomassevergaser wird dem RFTC bei einer Temperatur zwischen 350 und 650°C zugeführt. Im Eingangsabschnitt des RFTC wird das erzeugte Gas bis zur gewünschten Reaktionstemperatur von 900-950°C aufgeheizt. Im zentralen Abschnitt befindet sich ein Ni-Katalysator, indem Dampfreformierungsreaktionen stattfinden. Teerbestandteile und leichte Kohlenwasserstoffe einschließlich Methan, werden in CO und H<sub>2</sub> umgewandelt. Zusätzlich wird fast alles NH<sub>3</sub> entfernt. Dabei entsteht N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> durch eine Ammoniakreaktion. Luft im Verhältnis zu ungefähr 5% des erzeugten Gases wird dem Reaktor zugegeben, um die endothermen Reaktionen auszugleichen. Der Heizwert des Gases wird dadurch etwas verringert, aber durch die erhöhte Menge des Gases wird er völlig ausgeglichen.

### 4.4.2 Partikelentfernung

Die Partikel im Gas werden meistens durch die Zyklone Filter entfernt, die mit dem Vergaser ausgerüstet sind. Die Zyklone Filter sind wirkungsvolle Mittel für die Entfernung der größeren Partikel. Dadurch wird die Belastung des Filters oder des Waschwassers mit schwer abbaubaren, organischen Verbindungen in dem nachfolgenden Arbeitsschritt stark reduziert. Sie können 90% von Partikeln  $\geq 5$  Mikron im Durchmesser von den Gasströmen entfernen.

Zyklone Filter sind auf Zentrifugalkraft angewiesen, um Feststoffe vom Gas



zu trennen, indem sie die Gasströmung in einen kreisförmigen Weg (Kreisbahn) führen. Die Partikel sind wegen ihrer Schwerkraft nicht in der Lage den gleichen Weg, wie das Gas zu verfolgen und so werden die dichteren Partikel zu den Wänden getragen, wobei sie in einen Zufuhrbehälter an der Unterseite fallen. Das gesäuberte Gas steigt in die Mitte des Filters und wird durch die Oberseite aufgesaugt.

**Abbildung 36 Zyklone Filter**

Die Zentrifugalkraft ist umgekehrt proportional zum Durchmesser des kreisförmigen Wegs (Kreisbahn), durch den die Partikel entnommen werden. Aus diesem Grund haben die Zyklone mit kleineren Durchmessern, größere Entfernungsleistungsfähigkeiten im Vergleich zu Filtern mit großen Durchmessern. Deshalb werden mehrere kleinere Zyklone in einer Reihe (siehe Abbildung....) parallel benutzt. Ein Nachteil beim Gebrauch von Filtern mit kleinerem Durchmesser ist, dass sie dazu neigen schneller zu verstopfen als Filter mit einem größeren Durchmesser.

Zyklone Filter sind einfach zu entwerfen, billig zu installieren und zu reparieren, zuverlässig, tolerant zu den hohen Temperaturen und erfordern eine minimale Menge an Energie. Andererseits neigen sie dazu, bedingt durch ihre Größe, viel Raum einzunehmen.

Nach der Zyklone Filter folgt entweder ein weiterer Filter oder Wasserwäscher. Bevor das Gas den Wasserwäscher durchströmt muss mit einem Wärmeübertrager die Vorrichtung abgekühlt werden. Wasserwäscher entfernen die Partikel in einem dünnflüssigen Schlamm, der später entwässert wird, und entfernen zudem auch einige der anderen Verunreinigung. Für die Nasswäsche kommen unterschiedliche Apparate zum Einsatz wie z.B. Waschtürme, Strahlwäscher, Rotationswäscher und Venturiwäscher. Mit dieser Methode wird das Gas durch Einspritzen von Wasser abgekühlt. Die Partikel werden durch kondensierte Wassertropfchen beschwert und fallen nach unten. Die Wirksamkeit der Partikelentfernung kann gesteuert werden, indem man den Druckabfall über die Spraydüse einstellt, der die Tröpfchengrößen des eingespritzten Wassers beeinflusst. Befeuchtete gepackte Betten werden auch angewendet, um die abkühlende Oberfläche in einer Partikelkondensierenden Einrichtung zu erhöhen.

Das Bettmaterial kann aus einfachen Kokosnusssfasern bestehen. Bei der Verwendung dieses Verfahrens wird eine Menge von Staub, HCl, Schwefeloxide und (abhängig von der Temperatur in den Kondensator) Alkalimetallen zusätzlich durch das Wasser entfernt. Ein Nachteil der direkt wassergekühlten Systeme ist, dass man das kontaminierte Abwasser mit dem Teer, vor der Entsorgung behandeln muss, um dadurch jede Gefahr für die Umwelt abzuschließen.

Die wachsende Bedeutung der IGCC-Systeme (*Biomass Integrated Gasification Combined Cycle* – Biomasse integrierten Vergasung kombinierten Zyklus) als Wahl zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Stromerzeugung hat viel Interesse an den heißen Gasreinigungstechniken gezeigt. Dadurch werden chemische Verunreinigungen sowie die Partikel vom Gas entfernt, ohne es erheblich abzukühlen. Heiße Gasreinigung vermeidet den Verlust der thermischen Energie, welche mit kalter Gasreinigung verbunden ist und im Fall der IGCC wird die Leistungsfähigkeit der Stromerzeugung zudem, ungefähr bis zu 2% oder mehr gesteigert. Eine Vielzahl von Techniken wurde für die Entfernung der Partikel bei hohen Temperaturen entwickelt. Diese schließen hohe Temperaturgewebefilter, Granulierbettfilter, Keramikfilter etc. ein. Die Keramikfilter in Form von Kerzen sind sehr effektiv und zur kommerziellen Nutzung für die Reinigung bei Temperaturen bis zu 500°C geeignet.

### 5 Biogaserzeugung

Die Prozesse für die Umwandlung der Biomasse zu Methan können in zwei Kategorien unterteilt werden. Dies sind der Thermische und Biologische Prozess. Die Nutzung des thermischen Prozesses ist aus ökonomischen Gründen beschränkt möglich. Dies liegt zum einen an dem Energiebedarf, um die hohen Temperaturen zu erzielen, welche für die Verdampfung des enthaltenen Wassers benötigt wird. Zum anderen entstehen Gasmischungen die erst noch zu Methan umgewandelt werden müssen. Dieser Prozess ist nur in größeren Mengen ökonomisch sinnvoll. Als ein Vorteil für den thermischen Prozess, ist die schnelle und komplette Umwandlung des organischen Rohstoffs hervorzuheben.

Beim biologischen Prozess werden dagegen nur geringe Temperaturen erzeugt. Das dabei entstehende Gasgemisch besteht hauptsächlich aus Methan und Kohlendioxid, sowie Spuren von Wasserstoffsulfid. Die Umwandlung des organischen Materials erfolgt nicht komplett und es bleiben häufig ungefähr 50 Prozent oder höher übrig. Im Vergleich zum thermischen Prozess ist die Umwandlungsrate beim biologischen Prozess nur sehr langsam.

Die Entscheidung zwischen dem biologischen oder dem thermischen Vergasungsprozess zur Methanproduktion aus Biomasse, ist folglich von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Diese finden sich im Feuchtigkeitsgehalt, der biologischen Abbaubarkeit, dem Nährgehalt des Rohstoffs und der Größe der vorhandenen Aufbereitungsanlagen.

Die Produktion mit Biogas-Technologie basiert auf der biologisch anaeroben Aufspaltung von organischen Materialien. Biogaserzeugung bietet eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber anderen Formen der Energiegewinnung und Erzeugung. Sie wandelt effizient das in der organischen Substanz enthaltene Karbon, in einen verwendbaren Kraftstoff um und findet, wie bereits erwähnt bei einer niedrigen Temperatur und Umgebungsdruck statt. Dazu ist sie betriebssicher und erzeugt einen preiswerten und guten Kraftstoff für den bestehenden Energiebedarf. Gleichzeitig entsteht als Nebenprodukt ein qualitativ hochwertiges Düngemittel, welches den Gebrauch von chemischen Mitteln optimiert, ergänzt oder wenn möglich sogar ersetzt.

Es gibt eine große Nachfrage nach den beschriebenen Gastechnologien, um den steigenden Bedarf nach Energie abzudecken. Biogas ist ein verhältnismäßig sauberes Produktgas und damit ein umweltfreundlicher Kraftstoff. Er verbrennt besser als Erdgas oder verflüssigtes Erdölgas, weil es nicht Schwefel enthält. Bei der Verbrennung wird Schwefel in Schwefeldioxid

umgewandelt, welches nachweislich für Atemwegserkrankungen verantwortlich ist.

### 5.1 Biogasrohstoff

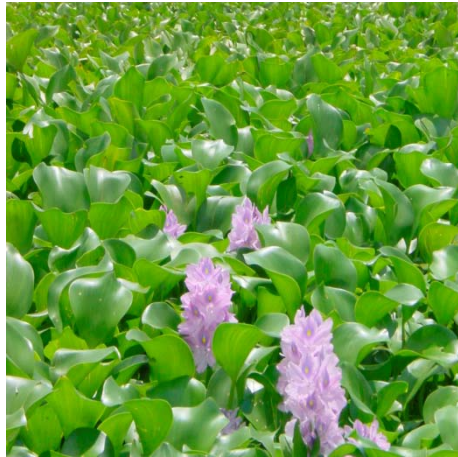
#### Beispiel Indien: der Kuhfladen

Die bisherigen Methoden der Kuhfladenbeseitigung schließen das auf dem Land verbreitete, Abbrennen oder Einsammeln in Gruben ein. Diese stellen eine große Gefahr für die Umwelt da. Beim Abbrennen, Verbrennen werden die Kuhfladen gesammelt und verbrannt. Dabei wird die enthaltene Energie nicht genutzt und entstehende Gase entweichen in die Atmosphäre. Das Sammeln und Eingraben in Gruben führt zu einer Grundwasserbelastung.

Die anaerobe Behandlung des Kuhfladens, um Kraftstoff zu gewinnen, stellt zum einen ein umweltfreundliches Beseitigungsverfahren dar und zum anderen leistet es einen Beitrag als Energie-Versorgungsmaterial. Die Biogas Produktion in Indien erfolgt fast nur durch die Verfaulung des Tierdunges. Der Kuhfladen wird am meisten in Indien verwendet, weil er leicht in einen homogenen Schlamm geformt werden kann und sein C/N Verhältnis nahezu dem optimalen Wert (30:1) entspricht. Ungefähr 70-75 Prozent des ursprünglichen Gewichts der Kuhfladen werden in einer Biogasanlage umgewandelt. Nach der anaeroben Stabilisierung (Behandlung) bleibt der Faulschlamm übrig, der als Düngemittel verwendet werden kann. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung des Faulschlammes als Düngemittel, die Bodenfruchtbarkeit verbessert und der Ernteertrag bis zu 10-20 Prozent zunimmt. Es wird geschätzt, dass 2 Millionen Tonen Kuhfladen pro Tag durch 257 Million Rinder in Indien produziert werden. Wenn davon die Hälfte für das Biogas Erzeugung genutzt werden könnte, würde man 80 Millionen Tonen an Kohle ersetzen. Die Mehrheit der vorhandenen Faulbehälter ist für die Umwandlung des Tierdunges geeignet, weil dieser mit Hilfe von Wasser in einen dünnflüssigen homogenen Schlamm, ohne viel Schwierigkeiten gemischt werden kann. Der dünnflüssige Schlamm kann innerhalb des Faulbehälters leicht verteilt werden und nach der Verfaulung, kann der Faulschlamm aufgrund der hydrostatischen Grundregel sedimentiert und kann später herausgenommen werden. Dieses ist jedoch nicht der Fall bei landwirtschaftlichen Rückständen. Mechanische Ausrüstungen müssen hier zusätzlich die Biomasse im Faulbehälter in Bewegung bringen und später den Faulschlamm entsorgen.

### Beispiel der Sudan: Die Wasserhyazinthen

Die Wasserhyazinthe wird umgangssprachlich als eine der schlechtesten Wasserpflanzen in der Welt genannt. Sie gehört zur Familie der



Wasserhyazinthengewächse (Pontederiaceae) und stammt aus Südamerika. Sie hat eine enorme Wachstumsrate und bildet an der Oberfläche des Wassers eine schwimmende Matte, die erhebliche Probleme verursacht, wie z.B. die Behinderung der Stromerzeugung, der Bewässerung, der Navigation und des Fischfangs. Wasserhyazinthen erhöhen den Wasserverlust durch die Evapotranspiration; und unterstützen Krankheiten wie *Bilharzie*.

**Abbildung 37 Wasserhyazinthen**

Die Wasserhyazinthe ist eine schwimmende Wasserpflanze mit einem faserartigen Wurzelsystem, die bis zu einer Höhe von 0.9144 m (3 Fuß) wachsen kann. Sie hat blaugrüne Blätter, starke Stiele und eine auffällige lavendelfarbende Blüte. Sie wächst in den tropischen Wasserregionen, welche an Nährstoffen reich ist.

Im Sudan wuchert die Wasserhyazinthe über einen 300 km langen Teil des Nils, zwischen den Städten Juba, Malakal und Kosti und verursacht im Südsudan erheblichen Schaden. Der Sudan hat teilweise die sozioökonomischen Kosten der Wasserhyazinthe ausgewertet und geschätzt, dass der jährliche Wasserverlust, durch die Evapotranspiration auf dem über 300 km langen Teil des Nils genügen würde, um mehr als 400 ha Land zu bewässern. Die Kosten der chemischen Eindämmung beliefen sich in den letzten 15 Jahren auf über 19 Million \$ (USD). Die Biogaserzeugung mit Hilfe der Wasserhyazinthen könnte ein guter und ökologischer Weg sein dieses Problem zu lösen, und stellt sich zum anderen als eine umweltfreundliche Energiequelle zur Verfügung. Die Wasserhyazinthe im nassen sowie trockenen Zustand hat eine niedrige Dichte von 0.3-0.4 g/cm<sup>3</sup> und infolgedessen würde sie im Faulbehälter aufschwimmen. Um die ideale Verfaulung der Wasserhyazinthe zu erreichen, wird ein Vorbehandlungsverfahren erforderlich sein. Drei Vorbehandlungsmethoden können benutzt werden:

- Physikalische Vorbehandlung (Zerhacken, Zerkleinerung, Pressen in eine Kugelform etc.)
- Chemische Vorbehandlung (Zugabe von Alkali oder Säurehydrolyse)

- Biologische Vorbehandlung wie z.B. Vorkompostierung für einen bestimmten Zeitraum um die wachshaltigen Schichten zu entfernen und um das trockene Polymer zu hydratisieren, die das Substrat umgibt. Oder man verfüttert den Rohstoff an Tiere sammelt den Dung, um diesen dann zur Energiegewinnung zu nutzen.

Unter den oben genannten Vorbehandlungsmethoden ist die physikalische Vorbehandlungsmethode am sinnvollsten. Sie ist Energieaufwendig aber das Verhältnis zwischen Gasertrag und der investierten Energie ist angemessen.

### 5.2 Beschreibung des Prozesses

Beim Faulungsprozess wird das organische Material unter anaeroben Bedingungen, biologisch in Methan und Kohlendioxid umgewandelt. Der Prozess beinhaltet eine Aktivität von verschiedenen Bakteriengruppen und ist in vier Schritte unterteilbar.

- Die Biomasse (hochmolekulare Substanzen, wie z.B. Zellulose, Stärke, Proteine und Fette etc.) werden durch die Einwirkung des Wassers zu niedermolekularen Verbindungen wie Fettsäuren, Aminosäuren, Kohlendioxid und Wasserstoff abgebaut. Diese Verbindungen werden dann mit Hilfe eines Fermentationsbakteriums zu folgenden Produkten vergärt:  
H, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, Essigsäure (CH<sub>3</sub>COOH), Alkohol und organische Säuren.
- Im zweiten Schritt werden Alkohol und die organischen Säuren zu Essigsäure (CH<sub>3</sub>COOH), Wasserstoff (H), Wasser (H<sub>2</sub>O) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mit Hilfe von *Acetogenischen* Bakterien fermentiert.
- Organismen bekannt als *Homoacetogens* wandeln den Wasserstoff und die Karbonverbindungen in Azetat um.
- Im letzten Schritt werden Azetat, Kohlendioxid und Wasserstoff durch Organismen, die als *Methanogens* bekannt sind, in Methan umgewandelt.

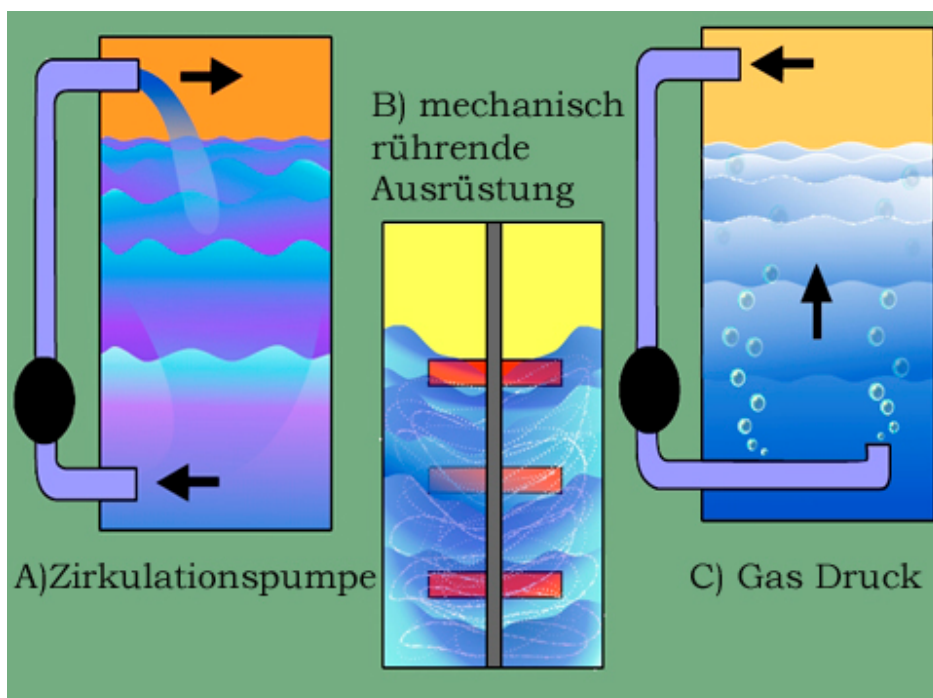
Der Prozess findet in einem luftdichten Faulbehälter statt. Dabei wird der dünnflüssige, homogene Schlamm ununterbrochen oder intermittierend beigemischt und verweilt im Faulbehälter für unterschiedliche Zeit. Dieses Mischen bietet wichtige und notwendige Vorteile.

- Es bewirkt eine Gleichförmigkeit in der Substratkonzentration in Verbindung mit den Mikroben und erzielt eine gleich bleibende Temperatur im Faulbehälter.



- Minimierung der Schaumbildung an der Oberfläche. Schaumbildung hängt von der Zusammensetzung der Rohstoffe ab. Rohstoffe mit einer großen Menge an Fasern und Fetten neigen zu erhöhter Schaumbildung. Folglich würden die zugeleiteten organischen Materialien in der Schaumschicht schwimmen und sich nur schlecht untermischen lassen. Somit ständen sie nur schlecht als Nahrungsstoff für die Organismen im Faulbehälter zur Verfügung und würden zu einer Verminderung der Gasproduktion führen.
- Das Mischen verhindert zudem das Absetzen von Feststoffen am Grund des Behälters. Diese würden zu einer Verlängerung der Verfaulungszeit führen. Diese wiederum ist ein Primärfaktor für die ökonomische Gasproduktion.

Der Grad des Mischens hängt von dem Rohstoff und den Betriebsbedingungen ab. Normalerweise wird eine mechanisch rührende Ausrüstung zur Mischung des Substrates angewendet. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung einer Zirkulationspumpe, die den Inhalt des Faulbehälters in Bewegung versetzt. Eine weitere Methode ist die Nutzung des entstehenden Gases im Faulbehälter, welches aus dem Substrat entweicht. Dadurch wird ein Druck erzeugt, der den Inhalt in Bewegung setzt. Diese Methoden werden in der Abbildung 38 grafisch aufgezeigt.



**Abbildung 38 Methoden der Mischung im Faulbehälter**

Drei Verfahren stehen zur Verfügung:

- Normale Verfaulungsprozess, einstufiges Verfahren

- Schnelle Verfaulungsprozess, einstufiges Verfahren
- zweistufiges Verfahren

Der Normale Faulungsprozess erfolgt unbeheizt und ungemischt. Die Verfaulungszeiten für diesen Prozess schwanken zwischen 30 bis 60 Tage. Beim schnellen Faulungsprozess wird der Inhalt des Faulbehälters beheizt und vollständig gemischt. Die Verfaulungszeit beträgt hier 15 Tage. Wegen der kurzen Verfaulungszeit dieses Verfahrens werden 40-60% des möglichen Biogases, welches der dünnflüssige Schlamm hergeben könnte, nicht genutzt.

Die Kombination beider Prozesse, wird als zweistufiger Prozess bezeichnet. Dabei ist die Primärfunktion der zweiten Stufe die Trennung des verfaulten Feststoffanteils von der aufschwimmenden Flüssigkeit.

### 5.3 Prozess Management

Der Rohstoff ist der Nährstoff für die Bakterien und es ist wichtig, dass sie ausreichende Mengen an Kohlenstoff und Stickstoff enthalten. Das Methan-Bildungsbakterium benötigt Kohlenstoff, um Gas zu erzeugen. Stickstoff ist für den Aufbau der Zellen nötig. Das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) ist sehr wichtig. Die Bakterien benötigen ungefähr 25 bis 30 mal mehr Kohlenstoff als Stickstoff. Das C/N-Verhältnis des Rohstoffes sollte ungefähr 25-30:1 betragen. Um eine optimale Biogas-Produktion zu gewährleisten, ist es erforderlich korrekte Rohstoffe im richtigen Verhältnis zu benutzen. Dabei ist Wasser für das Überleben und die Aktivität der Mikroorganismen besonders wichtig. Wasser gewährleistet die Bewegung der Bakterien, die Tätigkeit der extrazellulären Enzyme und die Hydratation der biologischen Makromoleküle, um so die Zersetzung zu begünstigen. Der optimale Wassergehalt schwankt mit den unterschiedlichen Substraten und hängt von den chemischen Eigenschaften des Rohstoffes und der biologischen Zersetzung ab. Für die meisten Biogas-Systeme ist das ideale Verhältnis von Rohstoff zu Wasser 1:1 und einer optimalen Feststoffkonzentration von 7 bis 9 Prozent. Bei der Verfaulung von Abwasserschläm, oder beispielsweise der Wasserhyazinthen ist der Wassergehalt bereits mit 91 Prozent sehr hoch. Der feste Inhalt demzufolge sehr niedrig. Folglich muss der Anteil an festem Inhalt auf ein optimales Niveau beigemischt und damit erhöht werden. Der Kuhfladen zum Beispiel besteht aus ungefähr 18 Prozent Feststoff, deshalb sollte er mit Wasser im Verhältnis von 1:1 (nach Gewicht) verdünnt werden um so die optimale Konzentration von 7-9 Prozent **Feststoff** zu erreichen. Kuhfladen sind ein leicht zu handhabender Rohstoff, welcher verdünnt sich leicht in den Faulbehälter einleiten lässt.

Es gibt ein enges Verhältnis zwischen der Biogasproduktion und der

Temperatur, weil die Leistungsfähigkeit der Methan produzierenden Bakterien von der Temperatur abhängt. Es gibt zwei Arten von Methan produzierenden Bakterien: *Thermophyllic* und *Mesophyllic*. Die *Thermophyllic* Bakterien erzeugen ungefähr  $2.5 \text{ m}^3 \text{ Gas} / \text{m}^3 \text{ Reaktorvolumen}$  bei einer optimalen Temperatur von  $47\text{-}50^\circ\text{C}$ . Das *Mesophyllic*-Bakterium produziert täglich ungefähr  $1.0\text{-}1.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  des Reaktorvolumens bei einer optimalen Temperatur von  $27\text{-}38^\circ\text{C}$ .

Ein weiterer wichtiger Faktor, der den Betrieb des Umwandlungsprozesses beeinflusst, ist der pH-Wert. Die Biogas-Gärung findet in einem leicht alkalischen Umfeld (Klima) statt. Der pH-Wert liegt zwischen 7-8. Es ist beobachtet worden, dass während des initialen Schrittes der Fermentation, der pH-Wert fällt, bevor er sich (die Mischung wird säurehaltig) stabilisiert. Während dieses Vorgangs kann es nützlich sein, alkalische Materialien zu zuführen, um das pH Niveau zwischen 7 und 8 zuhalten. Alkali und Kalk, werden zum Beispiel dazu benutzt, den pH-Wert des anaeroben Systems zu erhöhen. Jedoch können weitere Zunahmen des pH-Werts nur erzielt werden, indem man die meisten aufgelösten Karbonate als Kalziumkarbonat abscheidet. Beim pH-Wert  $> 7.0$  reagiert der Kalk mit Kohlendioxyd, welches nicht nur viel Schaum bildet, sondern auch den Gasdruck über den verfaulten Materialien verringert, indem es das Kohlendioxyd bindet.

### 5.4 Die Biogasreinigung

#### 5.4.1 Entfernung des Schwefelwasserstoffs

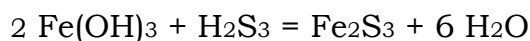
Der Schwefelwasserstoff ist ein Bestandteil des erzeugten Biogases. Er wird durch die Umwandlung der schwefelhaltigen Proteine in der Biomasse gebildet. Seine Konzentration liegt zwischen  $0,15\text{-}0,5\%$  des Biogasvolumens und hängt vom Schwefelinhalt des verfaulten Rohstoffs ab. Wenn jedoch tierische und menschliche Exkrememente benutzt werden, sind die Bakterien, welche aus den Därmen ausgeschieden werden, die Hauptproteinquelle. Anorganischer Schwefel, besonders Sulfate werden im Faulbehälter biochemisch in  $\text{H}_2\text{S}$  umgewandelt. Je nach der Art der Gasnutzung wird das  $\text{H}_2\text{S}$  vom Biogas getrennt:

- Für den Gebrauch des Biogases in Verbrennungsmotoren benötigen die Hersteller normalerweise Konzentrationen von weniger als 50 bis 100 ppm ( $0.005\text{-}0.01 \text{ Vol.}\%$ ).
- Wenn das Biogas als Dampfkesselkraftstoff verwendet wird, verursacht  $\text{H}_2\text{S}$  eine Zunahme des Abgas-Taupunkts (der sogenannte saure Taupunkt). Mit der allgemeinen Konzentration des  $\text{H}_2\text{S}$  (mehrerer Hundert ppm) im Biogas, nimmt die Kondensationstemperatur des

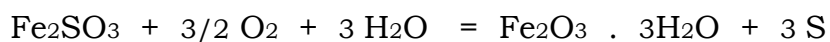
Abgases bis zu 160°C zu. Im Vergleich dazu hat Erdgas einen Taupunkt von 57°C. Die kondensierte Form ist reich an Schwefelsäure und führt zu schweren Korrosionen der Auspuffrohre, der Kamine und an Teilen des Heizaggregats.

- Praktisch muss das ganze H<sub>2</sub>S, bei der Ablagerung des Biogases, unter hohem Druck (200 bar) entfernt werden. Zusammen mit Spuren von Wasser, führt H<sub>2</sub>S zu schweren Korrosionen der Druckflaschen innerhalb nur einiger Wochen.
- Das gleiche gilt für das Kochen, wo H<sub>2</sub>S auf SO<sub>2</sub> verringert wird. Dies ist zwar geruchlos aber dafür giftiger ist als das H<sub>2</sub>S.

Eine der ältesten Technologien, die für die Trennung des H<sub>2</sub>S von dem Biogas verwendet wird, ist die aktivierte Absorption durch Eisenoxid. Dieser Prozess findet in einem kleinen Reinigungsbehälter statt. Die nicht mehr als 20-30 cm dicken Absorptionsschichten werden mehrmals übereinander in diesem Reinigungsraum gelegt. Das Biogas wird an der Unterseite des Reinigungsraumes eingespeist, strömt durch die Absorptionsschichten und wird an der Oberseite des Behälters eingesogen:



Das verbrauchte Absorptionsmittel kann auch wieder regeneriert werden, indem man ihn Sauerstoff aussetzt. Dieses kann getan werden, indem man das benutzte Absorptionsmittel aus dem Behälter heraus nimmt und ihn der Luft aussetzt. Dieser Regenerationsprozess kann bis zu 10mal wiederholt werden, danach müssen sie ersetzt werden.



Der reine Schwefel, der während der Reaktion gebildet wird, ist eine ökologische, harmlose Verbindung und normalerweise ist am Eisenoxid gebunden. Dieser trockene Reinigungsprozess passt hervorragend in die Anforderungen der landwirtschaftlichen Biogasproduktion:

- Er ist technisch einfach und verursacht nur niedrige Kosten
- Er ist leicht an kleinere oder größere Gasströmungsgeschwindigkeiten von 10 bis 500 m<sup>3</sup> pro Tag anzupassen.

### 5.4.2 Entfernung des Kohlendioxids

Die komplette Trennung von CO<sub>2</sub> kann den Heizwert des Gases bis zu ungefähr 80% (Volumenbasis) verbessern. Das Methan brennt schneller im Vergleich zum Biogas und folglich erbringt es eine höhere spezifische Ausgangleistung und thermische Leistungsfähigkeit. Durch das Entfernen

von CO<sub>2</sub> erhöht sich zusätzlich das Volumen in der Maschine, bzw. dem Zylinder. Die volumetrische Leistungsfähigkeit der Maschine wird dadurch verbessert. Die Trennung des Biogases in Methan und CO<sub>2</sub> kann einen doppelten Zweck dienen, zu einem der Verbesserung der Qualität der Verbrennung, zum anderen die Erhaltung des CO<sub>2</sub> als kommerzielles Nebenprodukt.

Die Entfernung des CO<sub>2</sub> vom Biogas wird erreicht, indem das Biogas unter Druck in Kontakt mit einer Flüssigkeit bringt. Dadurch werden die Gase voneinander getrennt und in der Flüssigkeit gebunden bzw. entweichen dieser. Wasser ist eine Flüssigkeit, die für das Auswaschen des Biogases benutzt werden kann. Dank der Tatsache, dass das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ein besseres Lösungsvermögen im Wasser besitzt als Methan, kann man beide Gase voneinander trennen. Das rohe Biogas wird zu ca. 9bar verdichtet (zusammengedrückt). Während es in den Behälter an der Unterseite eingespeist wird, wird das Wasser mit dem gleichen Druck von der Oberseite eingesprüht. Infolgedessen wird durch den entstandenen Druck das im Wasser gebundene CO<sub>2</sub> durch ein Rohrsystem abgeleitet und in einem offenen Wasserbehälter eingespeist. An der Oberfläche des Wassers entweicht nun das CO<sub>2</sub> und wird an die Umgebung abgegeben und kann nun abgesaugt werden. Dadurch steht es weiter zur kommerziellen Nutzung zur Verfügung. Das Wasser kann mehrere Male durch das System zirkulieren. Die erforderliche Menge an Wasser hängt vom betrieblichen Druck des Gaswäschers ab. Jedoch nach einer gewissen Zeitspanne, muss das Wasser ersetzt werden, ansonsten bildet CO<sub>2</sub> und Spuren organischer Produkte, Monoxidsulfid und verunreinigen das Wasser.

Die Größe des Ausdehnungsgefäßes erlaubt keine gesamte Regeneration des Wassers. So müssen ungefähr 10 Prozent Frischwasser zugegeben werden, um eine konstante Ablösungsrate von CO<sub>2</sub> zu erzielen.

Der Dehydrationsprozess wird für das Entfernen des Wassers vom Biogas eingesetzt. Zusätzlich zu den erhöhten Korrosionsproblemen kondensiert der Wasserdampf, wenn das Gas abgekühlt oder zusammengedrückt wird. Die Feuchtigkeit verringert den Heizwert des Gases und führt zu einer Verlangsamung der Transportgeschwindigkeit innerhalb der Rohrleitungen. Die Dehydration wird erreicht durch:

- die Absorption mittels hygroskopischer Flüssigkeiten
- Kondensation durch Kompression bzw. Abkühle

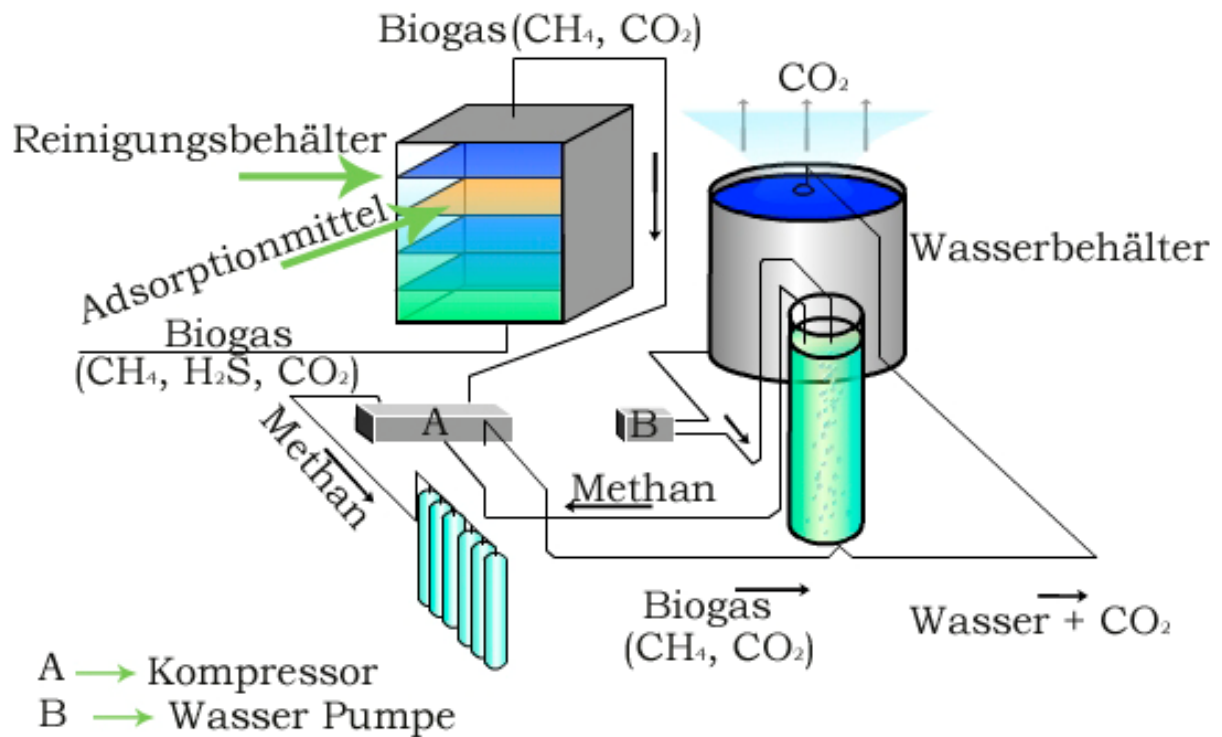


Abbildung 39 Biogas Reinigung

## 6 Vergleich der Biomasse bezüglich der Energiegewinnung

Die Ethanolproduktion, wie in dieser Arbeit beschrieben, kann in drei Kategorien eingegliedert werden, nämlich Ethanolgewinnung aus Getreide, aus Wurzelpflanzen (Kartoffeln, ...) und aus zuckerhaltigen Pflanzen (Zuckerrohr, ...). Um die von diesen Pflanzen über die Ethanolproduktion gewonnene Energie zu ermitteln und mit den anderen Energiegewinnungsverfahren (Biodiesel, thermochemische Umwandlung und Biogaserzeugung) vergleichen zu können, wird der Ethanolertrag pro Gewicht (Liter/Tonnen), der auf dem Stärke- bzw. Zuckergehalt des Stoffes basiert, und der Ernteertrag pro Fläche (Tonnen/Hektar) ermittelt (siehe Tabelle 9). Am Beispiel des Mais soll im folgenden die Berechnung der erreichbaren Energie gezeigt werden.

Der Ernteertrag von Mais beträgt 6-10 t/ha ~ 8 t/ha,  
der Ethanolertrag 400 l/t.

Ethanolertrag pro ha = 8 t/ha \* 400 l/t = 3200 l/ha

Ethanol hat einen Heizwert von 21.1 MJ/l.

Energie pro Ton = 400l/t \* 21.1MJ/l = 8440MJ/t = 8.44 GJ/t

Energie pro ha = 3200l/ha \* 21.1MJ/l = 67520MJ/t = 67.52GJ/ha

Die Ergebnisse für verschiedene Rohstoffe sind in Tabelle 9 getragen.

**Tabelle 9 Ernte-, Ethanolertrag und Energie aus Ethanolrohstoffe**

| Rohstoff            | Ertrag<br>t/ha | Ethanol<br>l/t | Ethanol<br>(l/ha) | Energie<br>GJ/ha | Energie<br>GJ/t |
|---------------------|----------------|----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| <b>Mais</b>         | 6-10 (8)       | 400            | 3200              | 67.52            | 8.44            |
| <b>Sorghum</b>      | 3-5            | 400            | 1600              | 33.76            | 8.44            |
| <b>Roggen</b>       | 3-5            | 370            | 1480              | 31.228           | 7.807           |
| <b>Triticale</b>    | 4-6            | 380            | 1900              | 40.090           | 8.018           |
| <b>Gerste</b>       | 2-4            | 350            | 1050              | 22.155           | 7.385           |
| <b>Weizen</b>       | 3-6            | 380            | 1710              | 36.081           | 8.018           |
| <b>Kartoffel</b>    | 36-42          | 100            | 3900              | 82.290           | 2.11            |
| <b>Süßkartoffel</b> | 20             | 125            | 2500              | 52.75            | 2.638           |
| <b>Maniok</b>       | 30             | 115            | 3440              | 83.3028          | 2.427           |
| <b>Zuckerhirse</b>  | 114-119        | 70             | 9209.95           | 173.230          | 1.477           |
| <b>Zuckerrübe</b>   | 50-60          | 95             | 5225              | 110.247          | 2.005           |
| <b>Zuckerrohr</b>   | 70             | 70-90          | 5600              | 118.160          | 1.688           |

Vergleicht man nun die erreichbare Energie pro Gewicht (GJ/t) der einzelnen Stoffgruppen, erbringt das Getreide die meiste Energie mit einem Wert von 7-9 GJ/t, gefolgt von den Wurzelpflanzen mit einem Wert von 2-3 GJ/t. Die zuckerhaltigen Stoffe erbringen eine Energie von 1.4-2 GJ/t und liefern somit in diesem Vergleich den geringsten Ertrag. Andererseits liegt der Ernteertrag von Getreide bzw. den Wurzelpflanzen zwischen 3-6 t/ha (Ausnahme: Mais 6-10 t/ha) bzw. 20-42 t/ha. Der Ernteertrag der zuckerhaltigen Stoffe entspricht diesbezüglich dem 2-11-fachen, in folgedessen sie eine Energie von 110-173 GJ/ha erbringen. Dies entspricht 3-5 fachen der durch Ethanolproduktion aus Getreide gewonnenen Energie, sowohl 7 mal der von Gerste und 1.7 mal der von Mais. Die Wurzelpflanzen erbringen eine Energie von ungefähr 55-83 GJ/ha. Vergleicht man diesen Wert mit dem der zuckerhaltigen Pflanzen, so erbringen letztere bezüglich der Wurzelpflanzen Maniok und Kartoffel den 1.3-2-fachen Energieertrag und bezüglich der Süßkartoffel den 2.3- 3.3-fachen Energieertrag. Vergleicht man nun noch die Wurzelpflanzen und das Getreide, so ist der Energieertrag der Wurzelpflanzen 2.3 mal höher als der von Getreide.

Deshalb werden für die Ethanolproduktion in der Praxis die zuckerhaltigen Stoffe, insbesondere Zuckerrohr und Zuckerhirse, wegen ihres höheren Ernteertrages bevorzugt.

Die Pflanzenöle für die Biodieselproduktion können in zwei Kategorien untergliedert werden, die jährlichen Pflanzen (wie Baumwolle, Sojabohne usw.) und die mehrjährigen Pflanzen (wie Kokospalme, Neembaum usw.). Für die Umwandlung von Pflanzenöl zu Biodiesel gilt ein Wert von 0.8, d.h., aus z.B. 10 Litern gewonnenem Pflanzenöl ergeben sich 8 Liter Biodiesel. Für die Ertragsrechnung bezüglich Biodiesel wird der prozentuale Ölanteil der einzelnen Pflanzen sowie der Samenertrag bzw. Fruchtfleischertrag (Tonnen/Hektar) verwendet. Am Beispiel des Raps wird im Anschluss die Berechnung des gewinnbaren Ertrages an Pflanzenöl gezeigt. Tabelle 10 zeigt den Ölertrag für verschiedene Pflanzensorten, Tabelle 11 den daraus resultierenden Biodieselertrag.

Der Ölgehalt von Raps ist 37% bezogen auf 100 kg Samen.

Dies ergibt 37kg Öl pro 100 kg = 370kg Öl/t.

Die Dichte von Raps ist =  $0.9115 \text{ g/cm}^3 = 0.9115 \text{ kg/l}$ .

Der Ölgehalt pro Tonnen ist somit =  $(370\text{kg Öl/t}) / (0.9115\text{kg/l})$   
= 405.92 l/t.



**Tabelle 10 Ölertrag für verschiedene Pflanzenöle**

| Rohstoff         | Öl %  | Dichte Kg/l | Samenertrag t/ha | Öl l/t  | Öl l/ha   |
|------------------|-------|-------------|------------------|---------|-----------|
| Baumwolle        | 13    | 0.9148      | 2.0-2.5          | 142.11  | 325       |
| Die Sojabohne    | 14-16 | 0.9138      | 2.1-2.5          | 175.09  | 446       |
| Die Färbeldistel | 15-47 | 0.9144      | 1.1-1.7          | 458.23  | 779       |
| Sonnenblume      | 32    | 0.9161      | 2.7              | 349.31  | 952       |
| Raps             | 37    | 0.9115      | 3.0              | 405.92  | 1190      |
| Purgiernuss      | 37    | 0.916       | 6-8              | 370-400 | 2100-2800 |
| Kokospalmnuss    | 65    | 0.925       | 4.2              | 688.89  | 2689      |
| Ölpalme          | 20    | -           | 25 -30           | 222.22  | 5950      |
| Der Neembaum     | 40-50 | 0.9         | -                | 500     | 600       |

Bezüglich der Umwandlung von Pflanzenöl zu Biodiesel erbringen die mehrjährigen Pflanzen (Ausnahme: die Ölpalme) einen 1-4 mal höheren Energieertrag pro Tonne als die einjährigen Pflanzen. Angesichts der Energie pro Hektar erbringt die Ölpalme ungefähr 161.8 GJ/ha. Dies entspricht ungefähr dem 4-6-fachen des Wertes von Sonnenblume, Raps und Färberdistel zusammen und bis 18 mal dem Wert für Baumwolle und Sojabohne.

**Tabelle 11 Biodieselertrag und erreichbare Energie aus Pflanzenöle**

| Rohstoff         | l/t    | GJ/t  | l/ha   | GJ/ha |
|------------------|--------|-------|--------|-------|
| Baumwolle        | 113.69 | 3.87  | 260    | 8.84  |
| Die Sojabohne    | 140.07 | 4.76  | 356.8  | 12.13 |
| Die Färbeldistel | 366.58 | 12.46 | 623.2  | 21.19 |
| Sonnenblume      | 279.45 | 9.50  | 761.6  | 25.89 |
| Raps             | 324.74 | 11.04 | 952    | 32.36 |
| Purgiernuss      | 400    | 13.60 | 2080   | 70.72 |
| Kokospalmnuss    | 551.1  | 18.7  | 2151.2 | 73.14 |
| Ölpalme          | 177.78 | 6.04  | 4760   | 161.8 |
| Der Neembaum     | 400    | 13.6  | 480    | 16.32 |

Das Verhältnis der Energie von Biodieselerzeugnissen pro Tonne zu Ethanolrohstoffen pro Tonne ist in Tabelle 12 angegeben. Hierbei erbringen Baumwolle, Sojabohne und Ölpalme für die Biodieselproduktion die geringste Energie im Vergleich mit Getreide für die Ethanolproduktion, sie ergeben nur den 0.49-0.76-fachen Energiewert von Getreide. Das Verhältniss von Biodieselerzeugnissen zu Wurzel- oder zuckerhaltigen Stoffen schwankt von

1.6 bis 7.5 bzw. 1.9 bis 6.8, d.h. die Biodieselrohstoffe ergeben das 1,6-7,5-fache bzw. 1,9-6,8-fache an Energie wie die Wurzelpflanzen bzw. zuckerhaltigen Stoffe.

**Tabelle 12 Das Verhältnis der Energie von Biodieselrohstoffen pro Tonne zu Ethanolrohstoffen pro Tonne**

| Rohstoff         | Getreide | Wurzelpflanze | Zuckerhaltige Stoff |
|------------------|----------|---------------|---------------------|
| Baumwolle        | 0.49     | 1.6           | 1.9                 |
| Die Sojabohne    | 0.6      | 1.9           | 2.4                 |
| Die Färbeldistel | 1.6      | 5.0           | 6.2                 |
| Sonnenblume      | 1.2      | 3.8           | 4.8                 |
| Raps             | 1.4      | 4.4           | 5.5                 |
| Purgiernuss      | 1.7      | 5.4           | 6.8                 |
| Kokospalmnuss    | 2.3      | 7.5           | 9.4                 |
| Ölpalme          | 0.76     | 2.4           | 3.0                 |
| Der Neembaum     | 1.7      | 5.4           | 6.8                 |

Das Verhältnis bezüglich der Energie pro Hektar (GJ/ha) von Ethanolrohstoffen zu einjährigen Pflanzenölen und zum Neembaum schwankt von 1 bis 10, für Zuckerhirse zu Baumwolle beträgt es 21. Anders ausgedrückt, die aus den Ethanolrohstoffen gewonnene Energie ist 1-10 mal höher als die Energie, die von den einjährigen Pflanzenölen gewonnen werden kann. Die mehrjährigen Pflanzenöle erbringen eine ungefähr 1.8-10 mal höhere Energie als das Getreide. Das Verhältnis der Energie von Purgiernuss und Kokospalm zu Mais, Wurzelpflanze und zuckerhaltigen Stoffen schwankt zwischen 1-3.4, das bedeutet, die aus Mais, Wurzelpflanzen und zuckerhaltigen Stoffen gewonnene Energie ist 1-3.4 Mal höher als die von Purgiernuss und Kokospalme. Die Ölpalme erbringt mehr Energie als fast alle Ethanolrohstoffe, außer der Zuckerhirse, die eine 1.1 mal höhere Energie als die von Palmöl liefert.

Die Energiegewinnung aus landwirtschaftlichen Rückständen (Holz, Gras) durch thermochemische Umwandlung (Vergasung) unterscheidet sich von der Ethanol-, Biodiesel- und Biogaserzeugung dadurch, dass bei der Vergasung die gesamten Inhaltsstoffe umgewandelt werden. Bei der Ethanolproduktion bleibt eine Schlempe, bei der Bio-Dieselproduktion ein Presskuchen und bei der Biogaserzeugung ein Faulschlamm als Rückstände übrig, die alle noch energiereich sind. Bei dem Thermochemischen Umwandlungsprozess wird durch den *Biomass Integrated Gasification Combined Cycle* (Biomasse integrierten Vergasung kombinierten Zyklus) eine maximale Energieeffizienz von 83% erreicht. Diese setzt sich zusammen aus 50% Wärmeenergie und 33% Elektrizität. Diese Werte wurden auf die

Berechnung der gesamten Output-Energie, sowie der Strom und Wärmeenergie angewendet (siehe Tabelle 14).

**Tabelle 13 Das Verhältnis der Energie von Ethanolrohstoffen pro Hectare zu Biodieselrohstoffe pro Hectare**

| Rohstoff     | Baumwolle<br>Sojabohne<br>Neembaum | Färberdistel<br>Sonnenblume<br>Raps | Purgiernuss<br>Kokospalmnuss | Ölpalme   |
|--------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------|
| Getreide     | 2-2.5                              | 1.25                                | 0.4-0.55                     | 0.1-0.25  |
| Mais         | 6.5-4.25                           | 2.5-2.1                             | 1.0-0.93                     | 0.3-0.42  |
| Süßkartoffel | 10-5                               | 3.9-2.6                             | 1.6-1.14                     | 0.5       |
| Kartoffel    | 13-7                               | 5.2-3.7                             | 2.2-1.6                      | 0.68-0.73 |
| Maniok       | 21-10                              | 8.2-5.4                             | 3.4-2.4                      | 1.1       |
| Zuckerrohr   |                                    |                                     |                              |           |
| Zuckerrübe   |                                    |                                     |                              |           |
| Zuckerhirse  |                                    |                                     |                              |           |

Vergleicht man bei der thermochemischen Umwandlung, die in der Tabelle aufgeführten Rohstoffe hinsichtlich ihrer maximal erreichbaren Outputenergie, stellt sich Holz als effizientester Rohstoff heraus. Es muss aber dabei berücksichtigt werden, dass Holz ein nur langsam nachwachsender Rohstoff ist. Das Wachstum benötigt eine längere Zeitspanne über mehrere Jahre hinweg. Im Vergleich dazu können andere Rohstoffe, wie beispielsweise Gras schneller nachwachsen und geerntet werden. Trotzdem erreicht Gras nur rund die Hälfte der maximal erreichbaren Energie pro ha wie Holz, verglichen über den gleichen Zeitraum. Die anderen aufgeführten Rohstoffe, stellen Restrückstände aus anderen Energieumwandlungsverfahren (Bagasse) und landwirtschaftlichen Rückständen (Weizen etc.) dar. Sie erreichen einen kleinen bis mittleren Energieertrag bei der thermochemischen Umwandlung. Dies liegt daran da sie als Rückstände nur einen geringen Teil der ursprünglichen Ausgangsmasse der Pflanzen darstellen. Zum anderen verfügt beispielsweise die Bagasse durch den hohen Feuchtigkeitsgehalt nur über einen niedrigen Heizwert.

Wenn man die Energie von dem thermochemischen Umwandlungsprozess als Wärme und Elektrizität betrachtet im Vergleich mit Biodiesel und Ethanol ist die erzeugte Energie wesentlich höher. Dies liegt daran das bei dem thermochemischen Verfahren der gesamte Rohstoff genutzt und umgewandelt wird. Anders als bei der Biodiesel und Ethanol-Produktion. Hier wird nur ein Teil des Rohstoffs ausgenutzt. Als Beispiel bleibt beim Pflanzenöl als Rückstand ein Presskuchen übrig. Die Tabelle zeigt die

## Verfahren zur Verwendung zur Energieerzeugung

gewinnbare Energie durch die Vergasung bezüglich der verschiedenen Rohstoffe.

**Tabelle 14 Erreichbare Energie aus landwirtschaftlichen Rückständen, Gras und Holz**

| Rohstoff        | Heizwert<br>GJ/t | Ertrag<br>t/ha | Heizwert<br>GJ/ha | Total<br>Energie<br>GJ/ha | Strom<br>GJ/ha | Wärme<br>GJ/ha |
|-----------------|------------------|----------------|-------------------|---------------------------|----------------|----------------|
| Die Weizen      | 16.49            | 3.0-3.5        | 49-58             | 44.41                     | 17.66          | 26.75          |
| Die Gerste      | 16.24            | 3.0-3.7        | 48-60             | 44.82                     | 17.82          | 27             |
| Der Mais Stover | 16.52            | 6.8-10.8       | 112-178           | 120.35                    | 47.85          | 72.5           |
| Die Bagasse     |                  |                |                   |                           |                |                |
| Zuckerrohr      | 6.0              | 20-25          | 120-150           | 112.05                    | 44.55          | 67.5           |
| Zuckerhirse     | 5.44             | 32.2           | 175.17            | 145.39                    | 57.80          | 87.59          |
| <b>Gras</b>     |                  |                |                   |                           |                |                |
| Miscanthus      | 15.8-16.5        | 8-15           | 126-247           | 154.79                    | 61.54          | 93.25          |
| Switchgrass     | 16.5-17.0        | 14.0-16.0      | 231-272           | 208.75                    | 83             | 125.75         |
| <b>Holz</b>     |                  |                |                   |                           |                |                |
| Der Neebaum     | 18.64            | 30             | 559.2             | 464.14                    | 184.54         | 279.60         |

Energie aus Biogas Rohstoff

Kuhfladen

Gasgewinnung =  $0.4 \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{Tag}$

Der Heizwert von Methan =  $36.3 \text{ MJ}/\text{m}^3$  ; der Methangehalt des Gasgemisches = 65%.

$0.34 \text{ m}^3/\text{kg} * 36.3 \text{ MJ}/\text{m}^3 * 0.65 = 8.02 \text{ GJ}/\text{t}$ , entspricht der gewonnenen Energie aus Getreide.

Wasserhyazinten

erzeugen ein Gasvolumen von  $0.4 \text{ m}^3/\text{kg}$

Ertrag pro ha =  $15\text{-}30 \text{ t}/\text{ha} \sim 22.5\text{t}/\text{ha}$

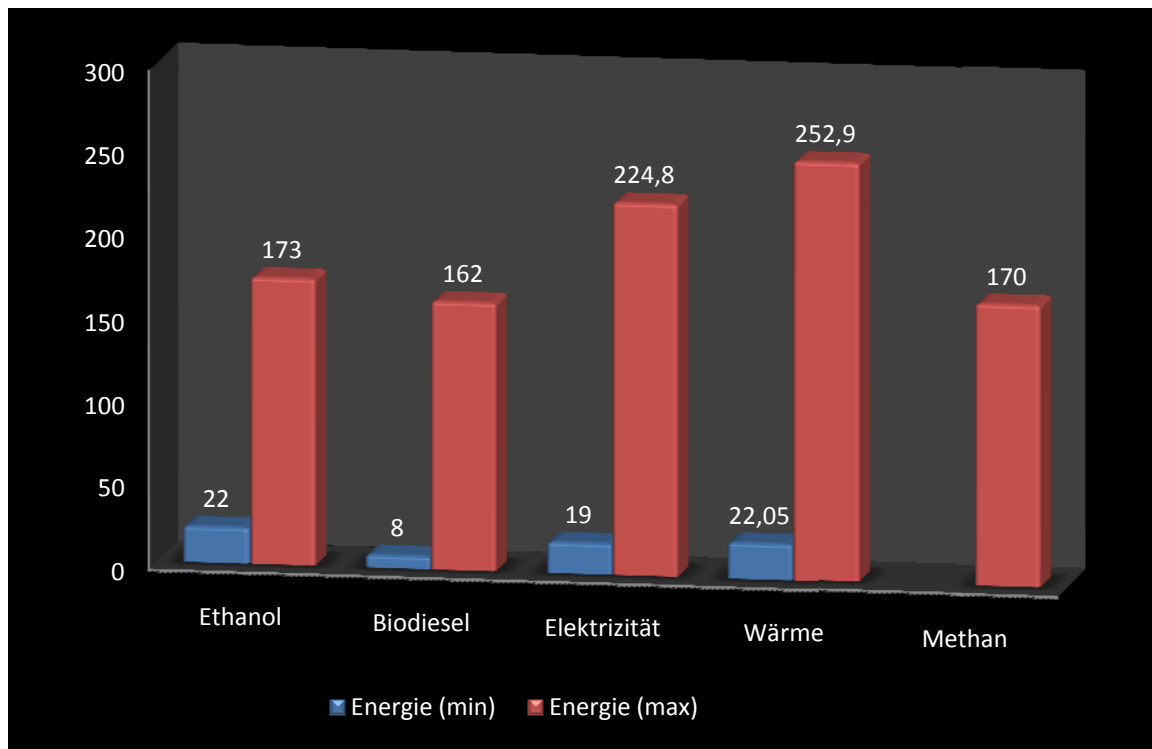
Gasgewinnung pro ha =  $22.5\text{t}/\text{ha} * 0.4 \text{ m}^3/\text{kg} = 9000 \text{ m}^3/\text{ha}$

Methangehalt des Gasgemisches = 52%, mit einem Heizwert von

Methan  $36,3 \text{ MJ}/\text{m}^3$

Energie pro Gewichtseinheit =  $0.4 \text{ m}^3/\text{kg} * 0.52 * 36,3 \text{ MJ}/\text{m}^3 = 7.55 \text{ GJ}/\text{t}$   
dies entspricht der aus Getreide gewonnenen Energie

Energie pro ha =  $9000 \text{ m}^3/\text{ha} * 0.52 * 36,3 \text{ MJ}/\text{m}^3 = 169.88 \text{ GJ}/\text{ha}$ .



**Abbildung 40 minimale und maximale Energie-Output aus Biomasse**

Das Diagramm zeigt die Output-Energie, welche bei den vier angesprochenen Energieumwandlungsprozessen erzeugt wird. Dabei wird die Maximal und Minimal erreichbare Energie der verschiedenen Verfahren dargestellt. Die aufgeführte Elektrizität und Wärme bezieht sich auf die thermochemische Umwandlung. Methan wird aus Wasserhyazinten produziert.

Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Energiebilanz. Energiebilanz zeigt das Verhältnis zwischen aufgewendeter (Input-Energie) und gewonnener Energie (Output-Energie). Dabei wird die Energie, die eine Pflanze benötigt, um zu wachsen, sie zu verarbeiten und zu transportieren miteinander in Beziehung gesetzt. Dadurch erhält man Werte die es zulassen die Pflanzen miteinander zu vergleichen. Die Input Energie kann in zwei Phasen unterteilt werden. Zum einen die landwirtschaftliche Phase, welche den Pflanzenanbau (z.B. Saat, Düngemittel), die Ernte und den Transport bezeichnet. Die industrielle Phase zum anderen bezieht sich auf die Verarbeitung der Pflanzen und dem damit verbundenen Energiebedarf. Die Output-Energie bezieht sich allein auf die erreichbare, gewonnene Energie aus den Pflanzenrohstoffen (z.B. Gas wie Methan, flüssig wie Ethanol). Bei manchen Pflanzen kann man durch die Nutzung der landwirtschaftlichen Rückstände (Pflanzenreste) und der Verarbeitungsrückstände (Schlempe, Presskuchen) den Energiebilanzwert optimieren. Es kommt vor das erst durch die Nutzung dieser Rückstände

sich der Anbau zur Energiegewinnung lohnt und sinnvoll ist. Als Grenzwert bei der Energiebilanz zwischen Output- und Input-Energie wird der Wert 1 bezeichnet.

**Tabelle 15 Onput-Input-Energieverhältnis für verschiedene Getreide und der Maniok**

| Rohstoff         | Input Energie |       | A + B | Output Energie |          |        | Total Output | Output/Input Verhältnis |
|------------------|---------------|-------|-------|----------------|----------|--------|--------------|-------------------------|
|                  | A             | B     |       | Ethanol        | Schlempe | Stroh  |              |                         |
| <b>Weizen</b>    | 15.34         | 16.52 | 31.86 | 54.76          | -        | -      | 54.76        | 1.72                    |
| <b>Weizen</b>    | 16.88         | 16.52 | 33.40 | 54.76          | 6.44     | 106.59 | 167.79       | 5.02                    |
| <b>Triticale</b> | 15.46         | 17.33 | 33.19 | 58.69          | -        | -      | 58.69        | 1.77                    |
| <b>Triticale</b> | 17.16         | 17.33 | 34.89 | 58.69          | 7.27     | 117.76 | 183.72       | 5.27                    |
| <b>Getreide</b>  | 26.2          | 29.9  | 56.1  | 44.5           | 9.6      | 88.1   | 54.1         | 0.96                    |
| <b>Getreide</b>  | 26.2          | 29.9  | 56.1  | 44.5           | 9.6      | 88.1   | 152.3        | 2.71                    |
|                  |               |       |       |                | +10.1    |        |              |                         |
| <b>Mais</b>      | 12.3          | 19.4  | 31.7  | 26.6           | -        | 3.5    | 30.1         | 0.9                     |
| <b>Maniok</b>    | 5.1           | 25.4  | 30.5  | 26.6           | -        | -      | 26.6         | 0.9                     |

Der Energieverbrauch bei der Ethanolproduktion hängt vom benutzten Gewinnungsprozess ab. Wie in dieser Arbeit bereits beschrieben, werden die in den Getreide- und Wurzelpflanzen enthaltene Stärke zuerst verflüssigt und dann verzuckert. Dieser Verflüssigungs- und Verzuckerungsprozess erfordert viel Energie (thermisch und elektrisch). Der Stärkeaufschluss unter Druck ist ein sehr energieaufwendiges Verfahren. Es führt aber dazu, dass das Verhältnis zwischen Output- und Input-Energie bei Getreide bzw. Wurzelpflanzen, wie oben in der Tabelle 15 zu entnehmen, den Grenzwert < 1 erreicht. Am Beispiel des Getreides ist zu sehen, dass ohne Verwendung der Rückstände, der Energiebilanzwert <1 ist. Durch die Nutzung der Rückstände wird allerdings ein deutlich höherer Wert von 2.71 erreicht. Daraus ergibt sich das trotz des hohen Energiebedarfs die Energiegewinnung aus Getreide ökologisch sinnvoll ist.

Ein positives Output-Input-Energieverhältnis wird erreicht indem man bestimmte Verarbeitungsprozesse, wie z.B. den Maisch-Dispergier Prozess anwendet. Im Vergleich zum Stärkeaufschluss unter Druck spart dieser Prozess bis zu 30% Energie (hängt auch von der wiederverwendeten Schlempe ab). Die Verarbeitung von Weizen und Triticale mit dem Maisch-Dispergier Prozess führt wie in der Tabelle 15 zu entnehmen, zu einem positiven Output-Input-Energieverhältnis von ungefähr 1.72 bei Weizen und 1.77 bei Triticale ohne die Verwendung der Rückstände (Stroh, Schlempe). Durch Nutzung der Rückstände bei der Energiegewinnung mit Weizen und Triticale wird der Energiebilanzwert sogar auf ca. 5.5 gesteigert.

Es ist leider festzustellen dass es für einige Pflanzen bisher keine Energiebilanzwerte existieren bzw. nur ohne Einbeziehung der Nutzung von den Rückständen. Beispiele sind Kartoffeln und Süßkartoffeln und Mais.

Wurzelfpflanzen wie Kartoffeln bestehen aus 70% bis 80% Wasser. Deshalb könnte man nur ca. 15% von der Schlempe wiederverwenden. Im Vergleich dazu werden beim Getreide ca. 50% wiederverwendet. Daraus ergibt sich das Getreide im Bezug auf den Energiebilanzwert mehr Potential besitzt, als beispielweise die Kartoffel, um diesen positiv zu verändern. Bei meinen Recherchen habe ich verschiedene Ansichten und Angaben gefunden. Ein Beispiel dafür ist das Output-Input-Energieverhältnis bei Maniok. Eine Quelle (Mariera) bezeichnet diesen generell als negativen Output-Input-Energie verhältnis. Die andere Quelle (Cavalho) spricht von einem hohen positiven Output-Input-Energieverhältnis für Maniok. Diese Unterschiede sind darin zu erklären dass Cavalho durch Miteinbeziehung von Holz als Verbrennungsmittel, für den thermischen Prozess einen Wert von ungefähr 5.9 erreicht. Es ist anzunehmen dass Mariera diesen Aspekt nicht mit einbezieht. Anhand dieses Beispiels wird deutlich das es zu wenig verwendbare Informationen, Studien über die Nutzung in Bezug auf das Output-Input-Energieverhältnis bei Wurzelfpflanzen gibt.

Zuckerhaltige Pflanzen besitzen ohne den Einsatz von Rückständen einen positiven Energiebilanzwert. Dies liegt daran, dass bei der Energiegewinnung mit zuckerhaltigen Pflanzen keine Verflüssigungs- bzw. Verzuckerungsprozesse benötigt werden. Zuckerrohr hat ein Output-Input-Energieverhältnis von ungefähr 2.4. Durch die Nutzung der Bagasse als Verbrennungsmittel wird die thermische Energie bei der Destillation gedeckt und es entsteht sogar ein Überschuss von ungefähr 7.9 MJ/kg. Durch Verbrennung der Rückstände (Bagasse) wird das Output-Input-Energieverhältnis bei Zuckerrohr auf ungefähr 7.4 erhöht. Zuckerhirse hat einen Output-Input-Energieverhältnis von 1.8. Durch die Nutzung der Bagasse als Verbrennungsmittel in der Destillation wird der Bilanzwert bis ungefähr 3.6 erhöht. Dieser Wert wird bei Pflanzen erreicht die während ihres Wachstums mit Sprinkler-Anlagen bewässert wurden. Durch Überschwemmungsbewässerung kann der Wert sogar auf bis zu 6.1 erhöht werden.

Die Rohstoffe der verschiedenen Anbauländer für die Ethanol Produktion, welche in dieser Arbeit aufgelistet sind, sind von den damit verbundenen klimatischen Bedingungen abhängig. Zudem werden Pflanzen wie zum Beispiel die Kartoffel in Europa eher als Nahrungsmittel gesehen und nicht als Rohstoff für die Ethanolproduktion. Wenn man andere Kontinente betrachtet lassen sich ähnliche Beispiele finden. Vielleicht liegt auch darin begründet, dass man in der Literatur keine Information über das Output-Input-Energieverhältnis, beispielsweise für die Kartoffel und Süßkartoffel findet. In der Praxis kann man die Ethanolproduktion von Mais in der USA, Zuckerrohr in Brasilien, und Weizen in Canada nachverfolgen.

**Tabelle 16 Output-Input-Energieverhältnis für Zuckerhaltige Pflanzen**

| Rohstoff    | Input Energie<br>MJ/kg |       |       | Output Energie<br>MJ/kg |         |            | Gesamt<br>Output<br>MJ/kg | Output-<br>Input<br>Verhältnis |
|-------------|------------------------|-------|-------|-------------------------|---------|------------|---------------------------|--------------------------------|
|             | A                      | B     | A + B | Ethanol                 | Bagasse | Tierfutter |                           |                                |
| Zuckerrohr  | 3.8                    | 18.5  | 22.3  | 26.6                    | 25.8    | 0.3        | 52.7                      | 2.4                            |
| Zuckerrohr  | 3.8                    | 0.9   | 4.7   | 26.6                    | 7.9     | 0.3        | 34.8                      | 7.4                            |
| Zuckerhirse | 7.5                    | 23.0  | 30.5  | 26.6                    | 26.9    | -          | 53.5                      | 1.8                            |
| Zuckerhirse | 7.5                    | 0.9   | 8.4   | 26.6                    | 26.9    | -          | 30.5                      | 3.6                            |
| Zucherrübe  | 3.74                   | 13.63 | 17.37 | 21.26                   | -       | 1.25       | 22.51                     | 1.3                            |

A : Landwirtschaftliche Phase & ; B : industrielle Phase

Die US-Biodieselskommission stellt, gibt einen Energiebalancewert für Biodiesel mit 1.44 an. Dies schließt nicht die Verwendung der landwirtschaftlichen Rückstände ein. Einschließlich die landwirtschaftliche Rückstände hebt sich der Wert bis auf 2.51 an. Das Verwenden von modernsten Technologien steigert den Wert deutlich sogar auf 4.1.

Von einer jährlichen Input Energie von 9.2 GJ/ha, erbringt allein die Ölpalme-Produkte (Biodiesel und Rückstände) einen Gesamtenergiegewinn von 182.1 GJ/ha. Diese ergibt einen Output-Input-Energieverhältnis von 9.5. Dies wird nur durch wenige andere landwirtschaftliche Systeme, wie beispielsweise dem Zuckerrohr erzielt. Dies kann auf die Wiederverwertung der Biomasse zurückgeführt werden. Zudem durch wenig Bedarf an anorganischen Düngemitteln und einem niedrigen Verbrauch an Schädlingsbekämpfungsmitteln. Die Sojabohne hat im Gegenteil dazu ein verhältnismäßig niedriges Output-Input-Energieverhältnis. Von einer jährlichen Input-Energie von 20 GJ/ha, erbringen die Sojabohnen-Produkte mit einem Gesamtenergiegewinn von 50 GJ/ha, d.h. ein Output-Input-Energieverhältnis von 2.5. Im Vergleich der Verarbeitungsprozesse ist die Ethanolproduktion arbeitsintensiver als die Bio-Dieselproduktion. Deshalb ist das Output-Input-Energieverhältnis für Bio-Diesel höher.

**Tabelle 17 Output-Input-Energieverhältnis für Pflanzenöle**

| Rohstoff    | Input-<br>Energie<br>GJ/ha | Output Energie<br>GJ/ha |             |          |       | Total<br>Output | Output/<br>Input<br>Verhältnis |
|-------------|----------------------------|-------------------------|-------------|----------|-------|-----------------|--------------------------------|
|             |                            | Biodiesel               | Presskuchen | Glycerin | Stroh |                 |                                |
| Raps        | 34                         | 49                      | 34          | 2        | -     | 85              | 2.5                            |
| Raps        | 34                         | 49                      | 34          | 2        | 38.4  | 123.4           | 3.6                            |
| Ölpalme     | -                          | -                       | -           | -        | -     | -               | 8-10                           |
| Sojabohne   | -                          | -                       | -           | -        | -     | -               | 1.43-3.2                       |
| Sonnenblume | -                          | -                       | -           | -        | -     | -               | 3                              |



Biodiesel wird in Europa überwiegend aus Pflanzenölen und besonders - aus Rapssamen und Sonnenblumen produziert. Selbst wenn Rapssamen die beste Wahl für Biodieselproduktion in den meisten Regionen von Mitteleuropa ist, sprechen die klimatischen Ausgangsbedingungen in Südeuropa dagegen. Es ist daher notwendig andere Ölpflanzen anzubauen. Unter allen möglichen Ölpflanzen für die Bio-Dieselproduktion, sollte die Sonnenblume mit Priorität betrachtet werden. Sonnenblumen bewähren sich gut während Dürreperioden und das Wurzelwerk geht tief ins Erdreich und nutzt das vorhandene Wasser gut aus. Zudem zeichnet sich die Sonnenblume durch wenig oder keine Düngenotwendigkeit und wenig investierte Pflegearbeit aus. Im Gegensatz zu Raps ist der Ertrag aber gering. Dies ist ein einzuplanender Nachteil, wenn man Sonnenblumen in Südeuropa für die Bio-Dieselproduktion anbauen will.

Für die Biogaserzeugung sollte die folgende Berechnungsmethode angewandt werden. Mit dieser Berechnung werde ich das Output-Input-Energieverhältnis für die Wasserhyazinthen berechnen.

Dafür folgende Angaben:

|                      |                                       |
|----------------------|---------------------------------------|
| Pflanzen Anbau       | 10.0 GJ/ha                            |
| Elektrische Energie  | 3.5 GJ/ha                             |
| Thermische Energie   | 31.0 GJ/ha                            |
| Gas Reinigung        | 5.8 GJ/ha                             |
| Gaskompression       | 6.5 GJ/ha                             |
| Gesamt Input Energie | 56.8 GJ/ha                            |
| Output Energie       | 169.88 GJ/ha aus der Wasserhyazinthen |

Output/Input Verhältnis  $(169.88\text{GJ/ha})/(56.8\text{GJ/ha}) = 3$

Micanthus und Holz bzw. Holzrückstände habe das höchsten Output-Input-Energieverhältnis von ungefähr 12-19. Der Input-Energieverbrauch beschränkt sich hierbei nur auf die landwirtschaftliche Phase.

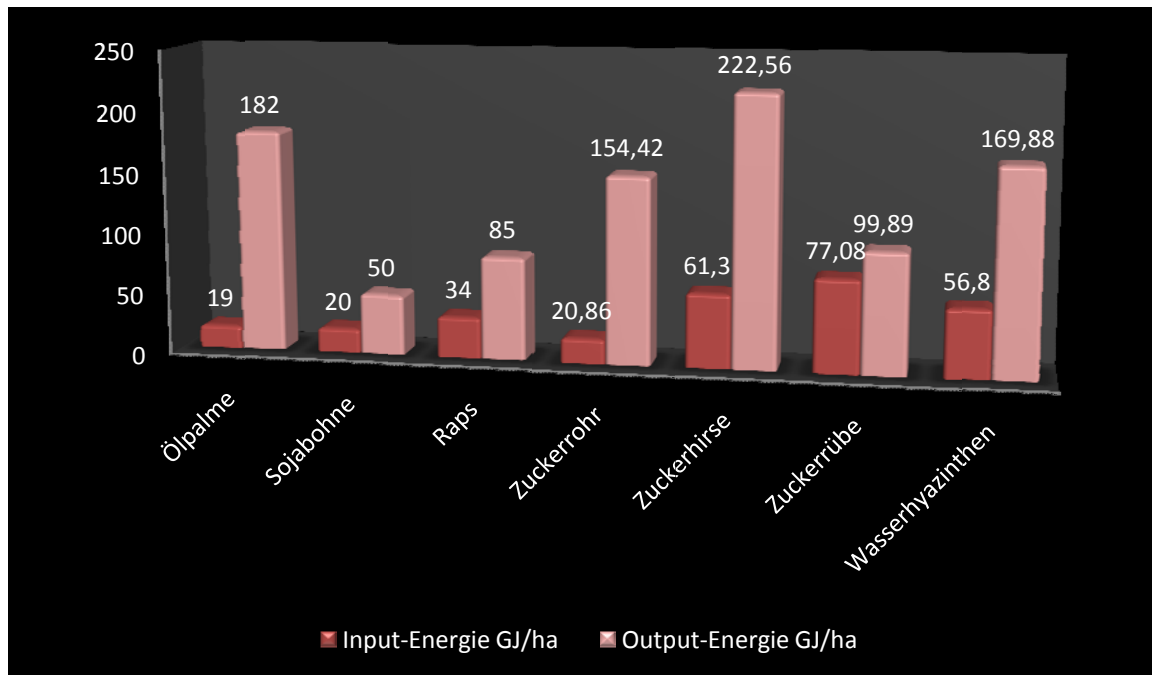


Abbildung 41 Input Energie und Output Energie aus verschiedene Pflanzen

## 7 Fazit

Diese Arbeit befasst sich mit der ökologisch sinnvollen Energiegewinnung aus Biomasse. Sie beschreibt die verschiedenen Prozesse, mit denen Biomasse in wertvolle Energie umgewandelt werden kann. Diese Prozesse sind die Fermentation von stärkehaltigen und zuckerhaltigen Pflanzen, die Umesterung von Pflanzenöl, die thermochemische Umwandlung und die Biogaserzeugung. Ich zeige auf welche Pflanzen länderspezifisch für den jeweiligen Prozess, in Frage kommen. Dabei findet eine Begrenzung hinsichtlich der Ausführungen auf den Sudan, Deutschland, Brasilien und die USA statt. Es werden auch einige interessante Beispiele aus weiteren Ländern kurz aufgezeigt. Die Endprodukte dieser verschiedenen Prozesse, durch Verarbeitung der vorgestellten Pflanzen (Biomasse) sind entweder flüssig wie beispielsweise Ethanol und Biodiesel oder gasförmig wie beispielsweise  $\text{CH}_4$  oder  $\text{CO}_2$ . Am Ende werden die jeweiligen Endprodukte, anhand der gewonnenen Energie und dem Output-Input-Energieverhältnis miteinander verglichen.

### Ethanolproduktion

Die Pflanzenarten die sich für die Ethanolproduktion eignen kann man in drei Gruppen einordnen. Dies sind Getreidepflanzen, Wurzelpflanzen und zuckerhaltige Pflanzen.

Anhand meiner Recherchen über Getreidepflanzen lässt sich schlussfolgern, dass der Anbau von Mais zur ökologisch optimalsten Energiegewinnung durch Ethanolproduktion führt. Er wächst sehr gut in europäischen Regionen, sowie tropischen und subtropischen Gebieten. Außerdem erbringt der Mais einen ungefähr 2-3 Mal höheren Ernteertrag als andere Getreide. Roggen, Gerste und Triticale eignen sich ebenso als Rohstoff für die Ethanolproduktion in europäischen Ländern (Deutschland). Sorghum und Weizen eignen sich für den Anbau in tropischen und subtropischen Regionen, wie den Sudan, die USA und Brasilien.

Bei den Wurzelpflanzen eignen sich die Kartoffel (Mitteleuropa), die Süßkartoffel und der Maniok in tropischen und subtropischen Gebieten. Der Maniok ist wie der Mais bei den Getreidepflanzen, eine ökologisch nützliche Pflanze. Sie lässt sich ohne Verlust als späterer Energierohstoff, in Sekundärprodukte weiterverarbeiten und damit zwischenlagern. Dabei ist besonders der hohe Ernteertrag und der hohe Stärkegehalt der Pflanze hervorzuheben.

Im Vergleich zu den eben angesprochenen Getreidepflanzen, stellen die Wurzel- bzw. Zuckerhaltige Pflanzen, einen energetisch höheren Rohstoff für

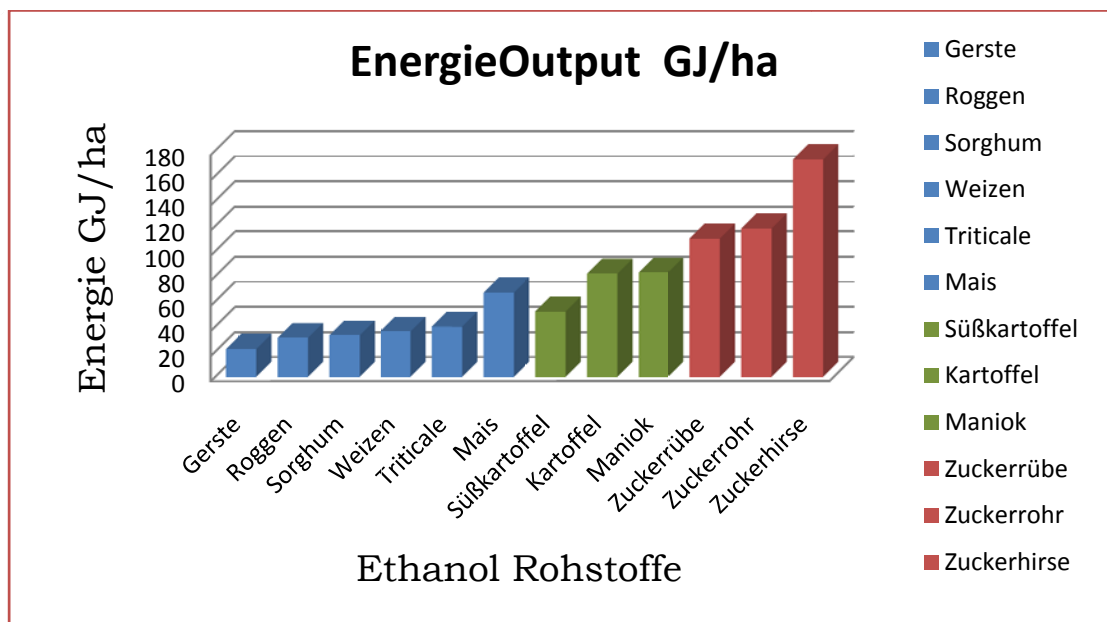
die Ethanolproduktion dar. Obwohl Getreidepflanzen einen hohen Stärkegehalt (50-70% beim Samen) und damit einen hohen Energiewert besitzen, führen sie im Vergleich zu Wurzel- und Zuckerhaltigen Pflanzen, beim Ertrag pro ha, zu einem niedrigeren Gewinn. Das Output-Input-Energieverhältnis, ohne die Einsetzung von landwirtschaftlichen Rückständen und der Restverarbeitung ist bei Getreide positiv, da es den Grenzwert von 1 überschreitet. Die Höhe schwankt allerdings durch die jeweiligen Verarbeitungsprozesse. Obwohl es nur wenige ausreichende Informationen über das Output-Input-Energieverhältnis bei Wurzelpflanzen gibt, ist davon auszugehen, dass dieser höher ist als bei Getreidepflanzen. Trotzdem werden diese Pflanzen nur wenig für die Ethanolproduktion genutzt. Dies könnte darin begründet sein, dass sie in den jeweiligen Ländern als Hauptnahrungsmittel verwendet werden. Das wird besonders deutlich, wenn man den Stellenwert der Kartoffel in Europa oder den Maniok in Afrika betrachtet.

Ein Vorteil von Getreide bei der Ethanolproduktion ist die gute Lagerfähigkeit über längere Zeiträume ohne Verschlechterung der Qualität. Im Vergleich dazu verfügen Wurzel- bzw. zuckerhaltige Pflanzen (Zuckerrübe) über nicht so gute Lagerfähigkeiten. Dies liegt in der kurzen Erntezeit begründet, welche es nicht zulässt die gesamte Ernte in Ethanol umzuwandeln. Deshalb müssen die Rohstoffe eingelagert werden. Dies ist neben der schlechten Lagerfähigkeit, zudem sehr kostenintensiv. Um eine gute Lagerfähigkeit bei Getreide zu erreichen, muss die Feuchtigkeit auf 15-10% verringert und ständig kontrolliert werden.

Um eine Aussage zu treffen, welche Pflanzen sich am effizientesten für die Produktion von Ethanol eignen, ist es wichtig den jeweiligen Umwandlungsprozess mit einzubeziehen. Der Prozess der Umwandlung, mit denen der Stärkeinhalt von Getreide und Wurzelpflanzen verflüssigt und verzuckert wird, hat einen enormen Effekt auf deren Ethanolertrag. Damit verbunden ist das Output-Input-Energieverhältnis. Das Stärkeaufschlussverfahren unter Druck führt beispielsweise zu einem negativen Output-Input-Energieverhältnis. Da dabei große Mengen an thermischer Energie verbraucht werden. Beim drucklosen Verfahren muss auf eine sehr gute Zerkleinerung des Rohstoffs geachtet werden, ansonsten würde dies zur unvollständigen Zersetzung der Stärke führen. Dieser Verlust überträgt sich auf den Ethanolertrag.

Um die maximal erreichbare Energie mit minimaler Input-Energie zu erreichen, sollte man das Dispergier-Maischverfahren hervorheben. Mit oder ohne die Nutzung der amylolytischen Enzymeaktivitäten aus Rogge, Gerste und Triticale stellt dies meiner Meinung nach, die Beste Wahl für den Verflüssigungs- und Verzuckerungsprozess dar. Dadurch werden Verzuckerungsenzyme gespart und die Wiederverwendung der Schlempe

führt zur Erhöhung des Ethanolertrages.



**Abbildung 42 Energie Output aus Ethanol Rohstoffe GJ/ha**

Schlussfolgernd sind für die Ethanolproduktion die zuckerhaltigen Pflanzen als beste Wahl hervorzuheben. Dies sind besonders der Zuckerrohr und die Zuckerhirse. Begründet wird dies durch den hohen Ernteertrag. Zudem entfällt der Verzuckerungsprozess, aufgrund des hohen Eigengehalts an Zucker. Neben dem gewonnenen Ethanol kann aus dem entstehenden Bagasse (Faserrückstände) als Restprodukt, der anfallenden thermischen Energiebedarf gedeckt werden.

### Biodieselproduktion

Für die Produktion zu Biodiesel eignen sich mehrere Pflanzen. Hierbei ist kurz zu erwähnen, dass es einjährige und mehrjährige Pflanzenarten gibt. Der Anbau dieser Pflanzen ist an die jeweiligen geographischen Gegebenheiten gekoppelt. In meiner Arbeit werden diese vorgestellt und miteinander verglichen. Die Nutzung der Pflanzen bezieht sich in Deutschland auf Raps und Sonnenblume. In den USA und Brasilien wird die Sojabohne favorisiert.

Für die einjährigen Pflanzen stellt der Raps die ertragreichste Pflanze hinsichtlich der Biodieselproduktion dar. Sie erzielt einen hohen Ernteertrag und der in den Samen enthaltene prozentuale Anteil, ist sehr hoch im Vergleich zu anderen einjährigen Kulturen. Der Anbau führt zu einem raschen Gewinn. Betrachtet man aber dazu den Ertrag, welchen man mit mehrjährigen Pflanzen erzielen kann, stellen sich diese als ertragsreicher

heraus. Wie bereits erwähnt ist der Anbau von mehrjährigen Pflanzen, wie der Ölpalme, Purgiernuss und Kokospalme auf bestimmte Regionen der Erde begrenzt. Allgemein stellt die Ölpalme die beste Wahl, für die Gewinnung von Biodiesel dar. Sie kommt aber nicht für den Anbau beispielsweise in Europa in Frage.

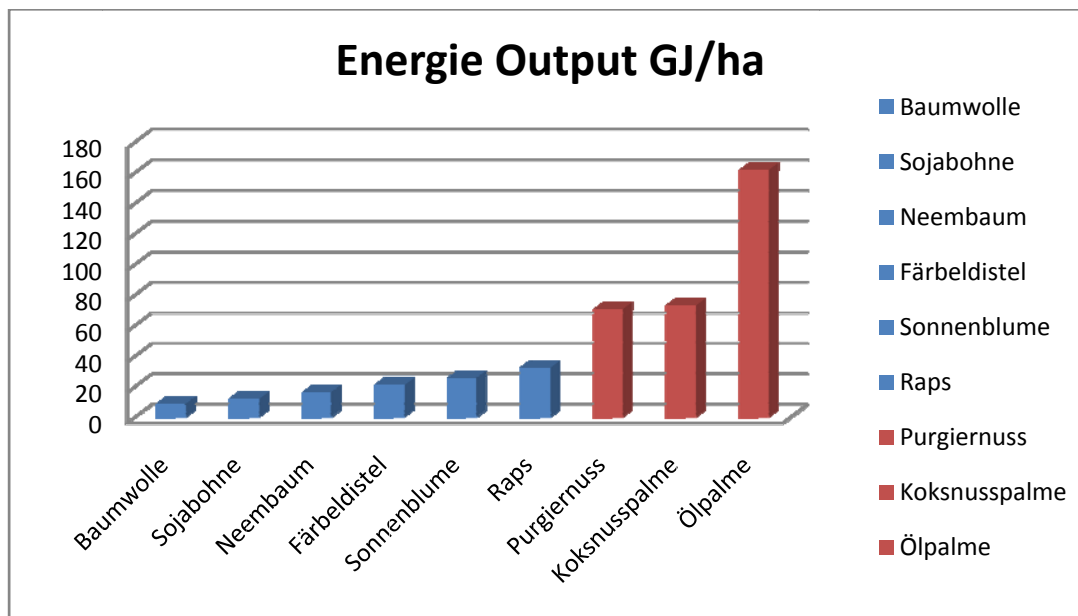


Abbildung 43 Energie Output aus Pflanzenöle GJ/ha

Betrachtet man das Output-Input-Energieverhältnis ist zu erkennen, dass alle verwendeten Pflanzenarten, welche für die Biodieselgewinnung angewandt werden, über ein positiven Wert verfügen. In der Praxis werden heute Raps, Sonnenblume, Sojabohne und Ölpalme für die Biodieselgewinnung angebaut. Den höchsten Wert erzielt dabei die Ölpalme.

### Thermischer Umwandlungsprozess

Im Vergleich zu der Ethanol- und Biodieselproduktion stellt die Vergasung von Biomasse mit der höchsten erreichbaren Energie, dem höheren Output-Input-Energieverhältnis, den ertragreichsten Umwandlungsprozess dar. Dies liegt darin begründet, dass bei der thermischen Umwandlung der gesamte Ausgangsstoff (Biomasse) umgesetzt wird. Wie in der Arbeit aufgeführt, hat Holz vor Gras und landwirtschaftlichen Rückständen, das beste Output-Input-Energieverhältnis.

### Biogaserzeugung

Aus landwirtschaftlichen Rückständen und Pflanzenmaterial kann Biogas gewonnen werden. Dafür werden in der Arbeit zwei Beispiele aufgezeigt. Die

Kuhfladennutzung und der Abbau der Wasserhyazinthen. Beide ermöglichen einen energiereichen und effektiven Umwandlungsprozess. Dabei werden beide Ausgangsstoffe als negative Nebenprodukte angesehen. Erst durch die Nutzung für die Biogaserzeugung gewinnen sie ökologisch enorm an Wert.

### Schlussfolgerungen:

- Biomasse produziert eine umweltfreundliche Energie und verfügt über ein positives Output-Input-Energieverhältnis.
- Der Entscheidungsfaktor für die Umsetzung der Biomasse als Kraftstoff hängt stark von der politischen Unterstützung ab; wie beispielsweise Steuerbegünstigungen oder sogar Steuerfreiheit. Endprodukte aus der Energiegewinnung durch Biomasse dürfen preislich nicht schlechter gestellt sein als konventionelle subventionierte Energiequellen.
- In der Praxis werden für die Gewinnung von Energie aus Biomasse die bestehenden Möglichkeiten durch Nutzung von effizienteren Pflanzen, besonders bei der Biodiesel- und Ethanolproduktion nicht ausreichend genutzt.
- Es ist dringend notwendig, dass aktuelle Studien über die mögliche, erreichbare Energie, dem Output-Input-Energieverhältnis erstellt werden und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.