

## ***Anforderungen an Biomasse zur Kraftstoff- herstellung aus der Sicht von Anlagenbetreibern***

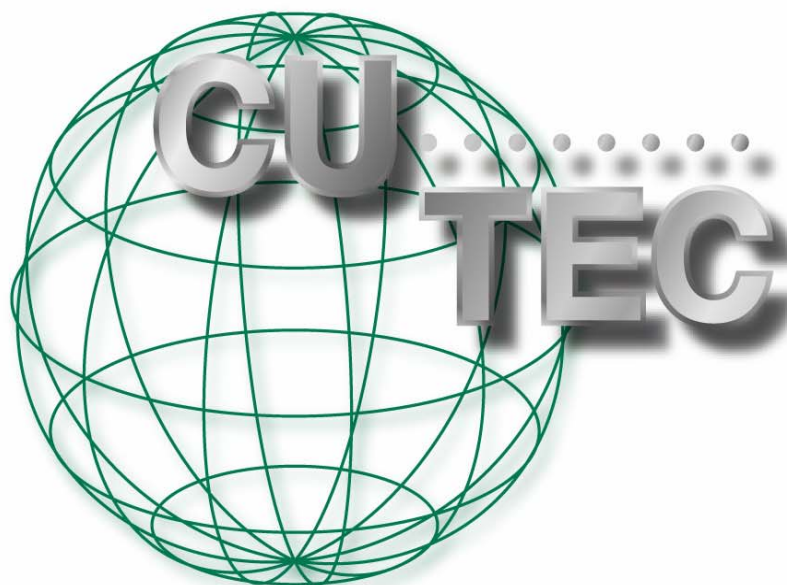
Förderer:

**Volkswagen AG (Wolfsburg) und FNR - Fachagentur  
Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Gülzow)**

**Projekt-Nr.: 2 63 2037**

**Förderkennzeichen: 220 104 04**

**31. Juli 2006**



Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH  
– CUTEC-Institut GmbH –  
Leibnizstr. 21 + 23  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel. (05323) 933-0  
Fax (05323) 933-100  
Internet: [www.cutec.de](http://www.cutec.de)

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>0. Aufgabenstellung .....</b>                                      | <b>4</b>  |
| <b>1. Zusammenfassung .....</b>                                       | <b>5</b>  |
| <b>2. Danksagung .....</b>                                            | <b>11</b> |
| <b>3. Einleitung .....</b>                                            | <b>12</b> |
| <b>4. Vorgehensweise .....</b>                                        | <b>13</b> |
| <b>5. Errechnung der Wirtschaftlichkeit .....</b>                     | <b>14</b> |
| <b>6. Ergebnisse zu land- und forstwirtschaftlichen Vorgaben.....</b> | <b>17</b> |
| 6.1 Forstwirtschaft.....                                              | 17        |
| 6.1.1 Allgemeines                                                     | 17        |
| 6.1.2 Verfügbarkeiten                                                 | 19        |
| 6.1.3 Kosten und Preise                                               | 20        |
| 6.1.4 Lagerung, Transport und Umschlag                                | 22        |
| 6.2 Landwirtschaft.....                                               | 24        |
| 6.2.1 Allgemeines                                                     | 24        |
| 6.2.2 Feuchtkonservierte Biomassen am Beispiel Mais                   | 26        |
| 6.2.3 Trockene Biomassen am Beispiel Getreide (Roggen)                | 28        |
| 6.2.4 Energiepflanzen                                                 | 29        |
| 6.2.5 Kompostwerke                                                    | 31        |
| 6.2.6 Lagerung, Transport und Aufbereitung                            | 32        |
| <b>7. Schmelzpunkte von Aschen aus Pflanzen .....</b>                 | <b>34</b> |
| 7.1 Chemische Betrachtungen .....                                     | 35        |
| 7.2 Entstehung von Ascheklumpen.....                                  | 38        |
| 7.3 Zusammenfassung.....                                              | 40        |
| <b>8. Überlegungen zur Korrosionsgefahr .....</b>                     | <b>41</b> |
| 8.1 Der Einfluß von Rohrwand- und Gastemperatur .....                 | 41        |
| 8.2 Abfangen von Chlor im Vergasungsraum .....                        | 42        |
| 8.3 Fazit .....                                                       | 43        |

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>9. Verfahren zur BtL-Herstellung.....</b>                           | <b>45</b> |
| 9.1 FZK / FUTURE ENERGY.....                                           | 45        |
| 9.2 Güssing-Konzept der Fa. REPOTEC und TU Wien .....                  | 53        |
| 9.3 Carbo-V <sup>®</sup> -Verfahren .....                              | 56        |
| 9.4 ArtFuel-Konzept .....                                              | 59        |
| <b>10. Potenzielle kommerzielle Gasreinigungsverfahren .....</b>       | <b>64</b> |
| <b>11. Vorschläge zum Brennstoffmanagement .....</b>                   | <b>70</b> |
| <b>12. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit .....</b>                  | <b>72</b> |
| 12.2 Exemplarisches Beispiel ArtFuel - Konzept .....                   | 72        |
| 12.2 Parametervariationen an der ArtFuel-Anlage .....                  | 76        |
| 12.2.1 Referenzzustand .....                                           | 76        |
| 12.2.2 Wirtschaftlichkeit als Funktion der Biomasseeigenschaften ..... | 76        |
| 12.2.3 Anlagentechnische Gesichtspunkte .....                          | 83        |
| <b>13. Empfehlungen zur Maximierung der Wirtschaftlichkeit .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>14. Unterschrift .....</b>                                          | <b>85</b> |
| <b>15. Verwendete Unterlagen.....</b>                                  | <b>86</b> |
| <b>16. Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                 | <b>90</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen <b>220 104 04</b> gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Zwar mögen pflanzliche Öle gegenwärtig für eine technische Nutzung unwichtig sein. Aber im Laufe der Zeit könnten sie durchaus die gleiche Bedeutung erlangen, die unseren heutigen Erdöl- und Kohleteer-Produkten zukommt.*

Rudolf Diesel, 1902

## 0. Aufgabenstellung

Für künftige Betreiber von Anlagen zur **Biomass-to-Liquid** (Abk.: BtL)-Produktion ist absehbar, daß aufgrund der Komplexität der Anlagentechnik ein wirtschaftlicher Betrieb eine Verfügbarkeit in der Größenordnung von chemischen Großanlagen oder Raffinerien, d.h.  $\geq 8.000$  Bh/a, erfordert. Der notwendige Input muß somit ganzjährig verfügbar sein. Eventuell ideal, aus ökologischen Gründen sogar notwendig sein wird die Verwendung unterschiedlicher Biomassearten (holz- und halmartig, Ölpflanzen, Biomasse-Reststoffe usw.). Die Materialien besitzen naturgemäß und durch die Aufbereitung bedingt unterschiedliche physikalische Eigenschaften und chemische Zusammensetzungen.

In der Anlieferung der BtL-Anlagen sind Monochargen zu erwarten mit Konzentrationen an Inhaltsstoffen, welche Betreiber „traditioneller“ thermischer Anlagen wie Kraftwerke, Müllverbrennungsanlagen oder Biomassekraftwerke in der Vergangenheit vor etliche Probleme stellten. Zu nennen sind z.B. das Chlor ( $\rightarrow$  Korrosion an Überhitzern), Staub mit hohem Alkali-/Erdalkaligehalt, besonders Kalium ( $\rightarrow$  Belagsbildung an Wärmetauschern bei niedrigen Temperaturen, Schlackefluß im Feuerraum) oder Phosphor ( $\rightarrow$  klebrige Asche an Gewebefiltern).

In den z.Z. in der Diskussion stehenden Technologien zur thermischen Zersetzung befinden sich nicht die robusten Roste aus der Verbrennung. Die verschiedenen Pyrolyse- und Vergasungsaggregate, welche im Technikumsmaßstab vorhanden sind, stellen individuelle Anforderungen an physikalische Eigenschaften (Partikeldurchmesser und -form, Dichte bzw. Förderfähigkeit, Wassergehalt, Heizwert etc.).

In der BtL-Produktion ferner zu beachten sind die Anforderungen der Katalysatoren in der **Fischer-Tropsch Synthese** (Abk.: FTS) an ein sehr reines Synthesegas. Stand der Technik zur Erreichung des Zieles sind verschiedene aus der chemischen Industrie bekannte Möglichkeiten mit z.T. völlig unterschiedlichen Erfordernissen an Invest- und Betriebskosten.

**Aufgabe der vorliegenden Arbeit** ist die Ermittlung von Anforderungen an die Biomasse potenzieller BtL-Anlagenbetreiber aus technischer Sicht sowie die Zusammenstellung finanzieller Daten und deren Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebes. Verglichen werden die z.Z. im Technikumsmaßstab zur BtL-Produktion am chancenreichsten stehenden Konzepte **I. Forschungszentrum Karlsruhe** (Abk.: FZK) / *Fa. FUTURE ENERGY*, **II. Güssing-Konzept** der *Fa. REPOTEC* mit *TU Wien*, **III. Carbo-V<sup>®</sup>-Verfahren** der *Fa. CHOREN Industries* und **IV. das ArtFuel-Verfahren** der *Fa. CUTec-Institut*. Die technischen Anforderungen sind für alle genannten Verfahren zu ermitteln; die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist exemplarisch am ArtFuel-Verfahren durchzuführen.

Die Ergebnisse sind aus der Sicht eines Anlagenbetreibers zusammenzustellen; umfangreich zu berücksichtigen und ohne Bewertung sind Gegebenheiten und Erfordernisse von Biomasseproduzenten aus der Land- und Forstwirtschaft, Aufbereitern und Händlern.

Das Projekt ist als Querschnittsprojekt der Kooperation der Bundesländer Niedersachsen / Brandenburg / Hessen mit der Volkswagen AG eingeordnet. Seine Ergebnisse sollen u.a. Institutionen zur Entwicklung von Energiepflanzen Anhaltspunkte über Erfordernisse an die

Pflanzen bzw. die Aufbereitungstechnik liefern, um entsprechende Zwangspunkte aus Abnehmersicht frühzeitig aufzuzeigen.

## **1. Zusammenfassung**

Audits, Literatur und deren Auswertungen ergaben wesentlich größere Toleranzen an die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Biomasse als aus Veröffentlichungen im Vorfeld der Arbeit zu erwarten war. Als Ursachen sind zu nennen:

- 1) Die thermischen Biomasse-Zersetzungsapparate der BtL-Konzepte arbeiten alle mit Bewegtbetten. Dabei beinhalten die Konzepte der Flugstromvergaser die Bildung flüssiger Schlacken aus den Biomasse-Mineralien; Wirbelbetten kommen mit den Erdalkali- und Alkalimetallen von z.B. halmartigen Biomassen durch Zusatz von Additiven zur Schmelzpunktanhebung gut zurecht.
- 2) Die Technikumsanlagen der BtL-Konzepte liefern keine Hinweise auf Probleme mit HCl. Es läßt sich bei Wirbelbetten mit Branntkalk schon im Vergaser gut einbinden. Für den Wärmetausch nach dem Vergaser lassen sich in BtL-Anlagen niedrig belastete Flächen zur Erzeugung von Niederdruckdampf mit Parametern weit unter den aus der Verbrennung von Siedlungsabfall bekannten Sicherheitswerten zur Korrosionsminimierung von 400°C/40 bar konzipieren. Außerdem liefern einfache Wäscher nach der Synthesegasabkühlung sehr gute Abscheideresultate.
- 3) Für die Synthesegasreinigung existieren aus Branchen wie der chemischen Industrie und der Raffinerietechnik ausgefeilte Verfahren zur Feinreinigung. Z.B. für die Schwefelabscheidung mit hohen Reinheitsanforderungen ist das Rectisol-Verfahren Stand der Technik. Einige BtL-Konzepte tendieren zu Varianten der preisgünstigeren Selexolwäsche. Dabei ist z.Z. noch nicht gesichert, ob der Fischer-Tropsch-KAT gegen Vergiftung ausreichend geschützt ist.
- 4) Bestehende Technikums-/Demonstrationsanlagen besitzen Einschränkungen aufgrund ihrer Konzeption auf einen oder wenige Brennstoff(e). Kommerzielle Anlagen könnten universeller geplant werden. Dies betrifft besonders den Biomasseeintrag.
- 5) Durchdachte Anlieferkonzepte der BtL-Betreiber können die Eigenschaften des Inputs homogenisieren.

Für die Wirkungsweise in der Anlage entscheidend sind die Eigenschaften des Inputs am Aufgabetrichter zur thermischen Zersetzung. **Tab. 1-1** stellt die Anforderungen an die Biomasse-Eigenschaften für die betrachteten BtL-Konzepte aus der technischen Betrachtungsweise übersichtlich dar. In **Tab. 1-2** sind Anforderungen an Biomasse aus betriebswirtschaftlicher Sicht aufgeführt.

Der anschließende Text erläutert die Zahlen und Einschränkungen der betrachteten BtL-Alternativen. Die Kriterien entstammen Angaben der mit den Verfahren befassten Institutionen (s. Kap. 9) und wurden so weit als möglich vergleichbar formuliert. Ausnahme ist die Fa. CHOREN: Die Angaben für das *Carbo-V<sup>®</sup>-Verfahren* beruhen auf Literaturangaben und Tagungsbeiträgen.

|                                     | FZK / FE                                                                                                                                                                         | Güssung / TU Wien                                                         | CHOREN                                                                      | ArtFuel                                                                     |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Partikelmaße [mm]</b>            | im Millimeterbereich                                                                                                                                                             | 2 bis 150                                                                 | max. 120 * 50 * 30                                                          | Ø 50, max. ≤ 200                                                            |
| <b>Wassergehalt [Gew.-%]</b>        | ≤ 15                                                                                                                                                                             | 10 bis 60                                                                 | 10 bis 20, max. 25                                                          | ≤ 35*                                                                       |
| <b>Aschegehalt [Gew.-%]</b>         | $1^{**} \leq X \leq 40^*$                                                                                                                                                        | beliebig                                                                  | keine aschereichen Materialien<br>wie Klärschlamm oder Torf                 | beliebig                                                                    |
| <b>Ascheschmelzpunkt [°C]</b>       | beliebig                                                                                                                                                                         | ≥ 950***                                                                  | k.A.                                                                        | beliebig                                                                    |
| <b>Gehalt an Cl, S, N</b>           | beliebig                                                                                                                                                                         | beliebig                                                                  | k.A.                                                                        | beliebig                                                                    |
| <b>Gehalt an Erd- + Alkali</b>      | beliebig                                                                                                                                                                         | beliebig***                                                               | k.A.                                                                        | beliebig                                                                    |
| <b>Gehalt an Phosphor</b>           | beliebig                                                                                                                                                                         | beliebig*                                                                 | k.A.                                                                        | beliebig*                                                                   |
| <b>Sonstige<br/>Einschränkungen</b> | Keine Knoten in der Biomasse                                                                                                                                                     | Evtl. Si-Gehalt. Noch offen.                                              | keine faserigen Materialien wie<br>Altpapier oder Textilien, keine<br>Späne |                                                                             |
| <b>Sonstige Möglichkeiten</b>       | Kohlenstoffhaltige Stäube,<br>Suspensionen und Flüssig-<br>keiten                                                                                                                | Kohlenstoffhaltige<br>Suspensionen, Flüssigkeiten<br>oder Festbrennstoffe | k.A.                                                                        | Kohlenstoffhaltige Suspen-<br>sionen, Flüssigkeiten oder<br>Festbrennstoffe |
| <b>Bemerkungen</b>                  | - Konzipiert für „schwierige“<br>Biomassen mit niedrigen<br>Ascheschmelzpunkten am<br>exemplarischen Beispiel Stroh<br><br>- $H_u$ , Brennstoff Flugstromvergaser<br>≥ 11 MJ/kg* | - Nachweis der Eignung bisher<br>nur für Holz veröffentlicht              | - Nachweis der Eignung bisher<br>nur für Holz veröffentlicht                | - Eignung für verschiedene<br>Biomassen nachgewiesen                        |

\*: Aus betriebswirtschaftlicher Sicht niedrig zu halten zur Minimierung von Betriebsmitteln, spez. Sauerstoff

\*\*.: Wert ist von Relevanz für die Betriebsplanung. Fa. FE bietet alternativ Vergaser für Aschegehalte von  $0 \leq X \leq 1$  Gew.-% an

\*\*\*.: Solange der minimale Ascheschmelzpunkt in der Mischung überschritten bleibt → CaO- und MgO-Gehalt möglichst hoch

**Tab. 1-1:** Anforderungen an die Biomasse aus der Sicht von BtL-Anlagenbetreibern. Schnittstelle: Brennstoffeintrag in das thermische System  
→ Technischer Blick

| <b>Anforderung</b>                                                   | <b>Betriebswirtschaftliche Auswirkung</b>                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Abbildungs-Nr.</b>          |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Minimaler Aschegehalt                                                | 1) Weniger Biomasse bei gleicher thermischer Leistung einzukaufen (hohe Signifikanz), 2) Minimierung des O <sub>2</sub> -Verbrauchs und damit des Einsatzes von elektrischen Strom (hohe Signifikanz) bzw. von Brennstoff beim Güssing-Konzept, 3) Minimierung der Beseitigungskosten (geringe Signifikanz) | Abb. 12.2.2-1<br>Abb. 12.2.2-6 |
| Ganzjährige, kontinuierliche Verfügbarkeit                           | Hohe Verfügbarkeit der BtL-Anlage aus logistischer Sicht möglich                                                                                                                                                                                                                                            | Abb. 12.2.3-2                  |
| Verlässliche Stoffparameter (Heizwert, Aschegehalt, Zusammensetzung) | Minimierung von Regelschwankungen des Anlagenbetriebes → Fahren auf Nennlast                                                                                                                                                                                                                                | Abb. 12.2.3-2                  |
| Lagerfähig und stabil bis mindestens 5 Tagen                         | Anlagenbetrieb auch an Wochenenden mit folgenden Feiertagen möglich → hohe Verfügbarkeit                                                                                                                                                                                                                    | Abb. 12.2.3-2                  |
| Gut zerkleinerbar                                                    | Minimierung des Stromverbrauchs bei der Aufbereitung                                                                                                                                                                                                                                                        | Abb. 12.2.2-2                  |

**Tab. 1-2:** Anforderungen an die Biomasse aus der Sicht von BtL-Anlagenbetreibern → *Betriebswirtschaftlicher Blick*.



## I. FZK / FUTURE-ENERGY-Verfahren

### a) Anforderungen von Seiten der dezentralen Pyrolyseanlagen:

- aA1. Sehr kleine Partikelgrößen von wenigen Millimetern notwendig.
- aA2. Keine Knoten bei halmartigen Biomassen erwünscht.
- aA3. Niedrige Wassergehalte  $\leq 15$  Gew.-%.

### a) Potenziale von Seiten der dezentralen Pyrolyseanlagen:

- aP1. Beliebige Aschegehalte möglich.
- aP2. Keine Limits für Schwefel, Chlor, Erd- und Alkaliegehalte bekannt.
- aP3. Mischungen mit anderen kohlenstoffhaltigen Stoffen möglich.

Bei der Anlieferung der Slurries sind die Gegebenheiten der zentralen Vergaser zu berücksichtigen:

### b) Anforderungen von Seiten der zentralen Vergaser an ihren Input:

- bA1. Einsatzstoff muß fluidisierbar sein. Dazu bestehen zwei Möglichkeiten:
  - I) Fein aufgemahlen als Pulver mit der Fähigkeit zur Dichtstromförderung oder
  - II) Mischung des Feststoffes mit einer Flüssigkeit oder einem Öl.
- bA2. minimaler Aschegehalt  $\geq 1$  Gew.-%\*, max. Gehalt ca 40 Gew.-% \*\*.
- bA3. Heizwert  $\geq 11.000$  kJ/kg
- (• bA4. Asche sollte im Bereich 1.200 bis 1.500 °C gut fließfähig sein. *Anmerk.:* Dies ist ein Wunsch aus ökonomischer Sicht. Technisch ist es möglich, mittels eines Additivs eine Schmelzpunkt- oder Viskositätserniedrigung herbeizuführen.)

### b) Potenziale an Einsatzstoffen bestehen hinsichtlich:

- bP1. Keine Limits für Schwefel, Chlor, Erd- und Alkaliegehalte bekannt.
- bP2. Mischungen mit anderen kohlenstoffhaltigen Stoffen möglich.

\*: Der Minimalwert gilt für den im bisherigen Konzept vorgesehenen Vergaser mit Kühlschirm und ist für die Betriebsplanung von Relevanz. Sollte eine kommerzielle Anlage vor der Situation stehen, daß die Brennstoffverträge nur nahezu aschefreie Stoffe (z.B. Al-Holz) beinhalten, bietet Fa. FE den Flugstromvergaser mit Kühlwand als Alternative an.

\*\*: Der Oberwert ist als grober Richtwert zu verstehen. Seine Wurzeln liegen in dem ökonomischen Umstand, daß mit steigendem Aschegehalt der Sauerstoffverbrauch zur Aufheizung des inerten Materials anwächst. Eine Überprüfung im Einzelfall ist zu empfehlen.

*Bem.:* Die Anforderungen der Vergaseranlage haben nur noch mittelbar Auswirkung auf die ursprünglichen Biomassen, da durch Mischen von Slurries aus verschiedenen dezentralen Slurryherstellungen die gewünschten Eigenschaften einstellbar sein sollten.

## II. Güssing - Konzept der Fa. REPOTEC und TU Wien

### Anforderungen an die Biomasse:

- A1. Stückigkeit: 2 bis 150 mm.
- A2. Wassergehalt: 10 bis 60 Gew.-%.



- A3. Ascheschmelzpunkt  $\geq 950$  °C.
- (• A4. Siliziumgehalt evtl. zu beschränken; zu untersuchen).

**Potenziale** an Einsatzstoffen bestehen hinsichtlich:

- P1. Keine Limits für Schwefel, Chlor, Erd- und Alkaligehalte bekannt (Anmerk.: Solange der Ascheschmelzpunkt über 950 °C bleibt).
- P2. Keine Einschränkungen beim Aschegehalt.
- P3. Kohlenstoffhaltige Suspensionen oder Flüssigkeiten möglich.

Zu beachten ist, daß das Eintragssystem in die Wirbelschicht eine gute Dichtwirkung bei geringer Störungsanfälligkeit besitzen muß. Kommerzielle, schon vorhandene Anlagen zur Verbrennung besitzen daher z.T. mehrere Einbringungen in den Apparat, um verschiedene Inputs auf evtl. sogar verschiedenen Ebenen zu ermöglichen. Damit sind nicht nur differierende Feststoffqualitäten hinsichtlich Form, Viskosität, Verdichtungsverhalten u.ä. möglich; auch Suspensionen und Gase sind kein Problem.

### **III. Carbo-V®-Verfahren der Fa. CHOREN**

**Anforderungen** an den Input:

- A1. Stückigkeit: 120\*50\*30 mm<sub>max</sub>, keine Späne.
- A2. Wassergehalt: 10 bis 20 %, max. 25 Gew.-%.
- A3. Gehalt an Störstoffen  $\leq 5$  Gew.-% (Anmerk.: Störstoffe = Metallteile, Scherben u.ä.).
- A4. Keine aschereichen Stoffe wie Klärschlamm oder Torf.
- A5. Keine faserigen Materialien wie Altpapier oder Textilien.

**Potenziale** an Biomasse bestehen hinsichtlich:

- P1. Altholz der Klassen A I bis IV.
- P2. Sonstige, wenn o.g. Eigenschaften eingehalten werden.

Nach Angaben der Fa. *CHOREN Industries* sind auch halmgutartige Biomassen wie Stroh einsetzbar. Nachweise der Machbarkeit sind bisher nicht veröffentlicht.

### **IV. ArtFuel-Konzept der Fa. CUTEC-Institut**

**Anforderungen** an den Input:

- **A1.** Stückigkeit: Kantenlänge 0 bis 200 mm, Ø 50 mm als Idealgröße.
- **A2.** Wassergehalt: bis max. 35 Gew.-%\*.

**Potenziale** an Biomasse bestehen hinsichtlich:

- **P1.** Keine Limits für Schwefel, Chlor, Erd- und Alkaligehalte bisher bekannt\*\*.
- **P2.** Keine Einschränkungen beim Aschegehalt.
- **P3.** Kohlenstoffhaltige Suspensionen oder Flüssigkeiten möglich.

\*: Wert ist als grober Richtwert zu verstehen. Seine Wurzeln liegen in dem ökonomischen Umstand, daß mit steigendem Wassergehalt der Sauerstoffverbrauch zur Aufheizung des inerten Materials anwächst. Eine Überprüfung im Einzelfall ist zu empfehlen. Der Wert „35“ entstammt der Möglichkeit der einfachen Lufttrocknung von Holz.

\*\* : Evaluierungen bei Anwendung neuer Energiepflanzen stehen noch aus.

Für die Möglichkeiten der Anpassung der Anlage an verschiedene physikalische Eigenschaften der Biomasse durch Gestaltung des Eintragssystems gilt das für das unter II. *Güssing-Konzept*... gesagte.

Von den untersuchten Demonstrations-/Technikumsanlagen unterhielt keine ein Rectisol-Verfahren vor der FTS. Die realisierten Verfahrensschritte zur Reinigung des Synthesegases waren unterschiedlich, aber sehr ähnlich. Sie lassen sich von den Unit Operations definieren zu

- 1) Wärmenutzung, 2) Entstaubung, 3) Abtrennung saurer Komponenten und Schwermetallen mittels Wäsche, 4) Abtrennung von Teer mittels RME-Wäscher in Wirbelschicht-Konzepten, 5) CO-Shift-Reaktor in Flugstromvergaser-Konzepten, 6) H<sub>2</sub>S-Entfernung, 7) CO<sub>2</sub>-Abtrennung, 8) Polzeifilter.

Die Reihenfolge in der Verschaltung, Temperaturniveaus, Apparateausführungen, Betriebsmittel und Reststoffanfalle sind unterschiedlich. Bei entsprechend vollständiger Ausführung der Stufen in kommerziellen Anlagen resultieren keine Restriktionen an die Biomasse.

Die **Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen** erfolgten aus Betreibersicht für die ArtFuel-Technologie über eine Betriebszeit von 20 Jahren. Dabei ergab sich im einzelnen:

1. Pflanzen mit geringeren Mineraliengehalten erzielen höhere Preise.
2. In der Aufbereitung der Biomassen beeinflusst der Stromverbrauch den Preis des Brennstoffs sehr stark → *Die Zerkleinerung auf feinkörnige Materialien beeinflusst die Wirtschaftlichkeit negativ*. Im Falle der Herstellung von Formkörpern (z.B. Pellets) für Transportzwecke sollten diese möglichst stromsparend produziert werden.
3. Die Quellen für Transportkosten halmgutartiger Biomassen geben stark unterschiedliche spezifische Preise an. Dabei werden die Unterschiede bis zu ca 250% und mehr v.a. durch den Umstand ausgelöst, daß mit neuartigen Pressverfahren wesentlich höhere Transportdichten zu erzielen sind.
4. Bei zu erwartenden Biomassepreisen von über 50 € pro t<sub>FS</sub> frei Produzentenlager dürfte der Verkaufspreis für synthetischen Diesel bei über 1,15 €/l liegen bei einer Anlagenkapazität von 500 MW<sub>therm</sub> und ca 1 Mio t/a Biomasseinput. Der Wert gilt für die Schnittstelle *Ausgang BtL-Anlage*. Enthalten sind Gewinn und Gewerbesteuer des Kraftstoffproduzenten. Für den Verbraucher kämen die Aufschläge für Isomerisierung, Additivierung, Verteilung, Vertrieb, Mehrwert- und evtl. Kraftstoffsteuern hinzu.
5. Effiziente Logistikkonzepte zur ganzjährigen Brennstoffversorgung der BtL-Anlagen sind zwingend.

## 2. Danksagung

Zur Erstellung der Arbeit leisteten etliche Institutionen ihren Beitrag. Die Zeit, die sich etliche Partner nahmen, ist nicht selbstverständlich angesichts des Umstandes, daß sehr viele Aktivitäten zur energetischen Biomassenutzung laufen und viele Beteiligte vor Kapazitätsengpässen stehen.

*Daher gebührt allen, die zum Gelingen des Projektes beigetragen haben, unserer besonderer Dank.*

Im Einzelnen sind zu nennen:

### 1. Aus der Fraktion der Land- und Forstwirtschaft (Anbau, Aufbereitung und Logistik)

- **AGRAVIS Raiffeisen AG** (Hannover)
- **Landwirtschaftskammer Hannover**
- **Universität GH Kassel / Institut für Nutzpflanzenkunde** (Kassel-Witzenhausen)
- **Niedersächsisches Forstamt Clausthal**
- **Niedersächsisches Forstamt Seesen**

### 2. Baugruppe thermisches System

- **Fa. ENVIRO THERM GmbH** (Essen) (Zirkulierende Wirbelschicht)
- **Fa. REPOTEC - Renewable Power Technologies Umwelttechnik GmbH** (Güssing) (Güssing-Konzept)
- **Fa. FUTURE ENERGY GmbH** (Freiberg) (Flugstromvergaser)

### 3. Baugruppe Synthesegasreinigung

- **Fa. Von Roll Umwelttechnik AG** (Zürich) (Heißgasfilter)
- **Fa. H.-J. Keil Anlagenbau GmbH & Co. KG** (Hunteburg) (RME-Wäscher)
- **Fa. Uhde GmbH** (Dortmund) (stufenweises, modifiziertes Selexol-Verfahren)
- **Fa. UOP** (Antwerpen) (Selexol- und Rectisol-Wäschen)

### 4. Baugruppe Nebenanlagen

- **Fa. Westfalen AG** (Münster) (Luftzerlegungsanlage)

Durch ihre finanzielle Unterstützung ermöglichten die Fa. **Volkswagen AG** (Wolfsburg) und die **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe** (Gülzow) das Projekt. Auch ihnen sei gedankt.

### 3. Einleitung

Kraftstoff aus Biomasse - ein geflügeltes Wort unserer Tage, welches viele Aktivitäten in Politik, Landwirtschaft, landwirtschaftlichen Handelsunternehmen, Anlagenbau und interessierten Investoren auslöst. Sehr häufig wird dabei übersehen, daß unter den Begriff „Biomasse“ eine breite Palette an Pflanzen fällt mit völlig unterschiedlichen Charakteristika hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, physikalischen Eigenschaften, Anbau- und Erntemethoden, Lagerungstechniken usw..

Erwähnt werden sollen an dieser Stelle z.B. die unterschiedlichen Aschegehalte von Holz ( $< 1$  Gew.-%<sub>FS</sub>) und Stroh ( $\approx 7$  Gew.-%<sub>FS</sub>), die hohen Schwefelgehalte in Höhe von  $\approx 0,3$  Gew.-%<sub>daf</sub> bei Ölsaatenstroh aus Raps oder die Chlorgehalte von  $0,8$  Gew.-%<sub>daf</sub> bei Gras [1]. Zum Vergleich: Bei Hausmüll liegt der Durchschnittswert von Schwefel bei  $0,2$  bis  $0,5$  Gew.-%<sub>FS</sub> und von Chlor bei  $0,7$  bis  $0,8$  Gew.-%<sub>FS</sub> [2]. Die chemischen Zusammensetzungen führen zu völlig unterschiedlichen Verhaltensweisen bei der thermischen Zersetzung zum Synthesegas.

Die traditionellen Lagerungsmöglichkeiten als wesentlicher Bestandteil der Logistik hängen stark von der Art der Biomasse ab (z.B. feucht konservierte Biomasse wie z.B. Mais als Silage, trockene Materialien wie Getreide in Silos oder Holz auf Waldwegen).

Auch die unterschiedlichen Partikelformen bzw. der daraus resultierenden Transportdichten sind zu beachten, wenn künftige BtL-Anlagen mit hohem Durchsatz und ganzjähriger Verfügbarkeit zu konzeptionieren sind.

Die vorgelagerten Anbaumethoden und Pflanzenarten befinden sich in einem Entwicklungsstadium, wo die Biomasseeigenschaften (chemisch, physikalisch) gezielt beeinflussbar sind, wenn die damit befaßten Institutionen Anforderungen von den späteren Nutzern, in diesem Falle potenziellen Betreibern von BtL-Anlagen, bekommen. Zu nennen sind z.B. das von Prof. Scheffer in verschiedenen Vorhaben gestartete Zwei-Kultur-Nutzungskonzept [3], das Verbundvorhaben *Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands* [4] oder das im Rahmen der Kooperation Niedersachsen / Brandenburg / Hessen und Volkswagen AG angestoßene Verbundvorhaben *Biomasse für SunFuel®* [5].

Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, die unterschiedlichen Interessen von potenziellen Anlagenbetreibern und Biomasseherstellern zu erfassen und auszuwerten. Aufzuzeigen waren besonders die wirtschaftlichen Folgen verschiedener Lösungswege der Biomassebereitstellung.

Um von Detailfragen der Finanzierung unabhängig zu bleiben, wurde als Maßstab zur Beurteilung der Interne Zinsfuß nach einer Betriebszeit von 20 Jahren gewählt. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgte aus Betreibersicht. Die Eingangsgrößen besitzen die in der Phase der Konzeptplanung übliche Ungenauigkeit bei Chemieanlagen von  $\pm 30$  %. Damit unterliegt das Ergebnis als Absolutwert einer noch größeren Ungenauigkeit. Entscheidend für das Stadium der Planungsphase aber sind die Fragen: Wo liegen signifikante Risiken? Wo liegen Chancen zur Verbesserung des Ergebnisses? Was sind unbedeutende Faktoren, die erst in der Optimierungsphase oder gar im Betrieb zu behandeln sind? Zur Klärung dieser Fragestellung arbeitet die vorliegende Studie mit dem Werkzeug der Signifikanzanalyse, bei der aus der graphischen Auftragung Empfindlichkeiten und Absolutwerte unter definierten Randbedingungen ablesbar sind.

Das Projekt ist als ein Querschnittsprojekt der Kooperation Niedersachsen / Brandenburg / Hessen und der Volkswagen AG eingeordnet. Zeitlich gesehen liegt das Vorhaben in der Startphase der operativen Tätigkeit der Kooperation. Es soll eine orientierende Wirkung für die Partner einnehmen und es ist zu erwarten, daß die Ergebnisse mit wachsender Erkenntnislage in den nächsten Jahren einige Korrekturen, Ergänzungen und Detaillierungen erfahren werden.

## **4. Vorgehensweise**

In der Bundesrepublik Deutschland laufen z.Z. verschiedene Bestrebungen, aufbauend auf bestehenden Pflanzenarten Modifikationen und Anpassungen an die Erfordernis *Herstellung von Kraftstoff aus Biomasse* durchzuführen für eine kommerzielle Realisierung von Anlagen. Dabei stehen sich die beiden Blöcke *Landwirtschaft* und *Großanlagenbau* wegen mangelnder Anknüpfungspunkte in der Vergangenheit noch mit einer gewissen Verständnislosigkeit gegenüber. Um beide Parteien an ihren jeweiligen Standpunkten abzuholen, wurden zwei verschiedene Methoden angewandt:

1. Audits in Interview-Form am charakteristischen Ort des Gesprächspartners und
2. Erstellung von schriftlichen, kurzen Fragekatalogen mit einer genauen Spezifikation der offenen Punkte.

Die Audits ergaben etliche Informationen zu Fakten und Zusammenhängen. Die schriftlichen Antworten auf technische Fragestellungen schildern grundsätzliche Umstände der jeweiligen Anlagenbauer; die Kosten sind i.a. als Budgetpreise angegeben. Alle Unterlagen unterliegen, soweit nicht schon Veröffentlichungen an anderer Stelle stattgefunden haben, der Vertraulichkeit. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden aus den Originalen abgeleitet. Die Betrachtungen der Technik enden nach der FTS mit dem Rohprodukt. Das Upgrading hängt nicht mehr von der Biomasse, dem thermischen Zersetzungsverfahren oder der Gasreinigung ab.

Angegeben sind in den einzelnen Kapiteln quantitative und qualitative Ergebnisse. Um die Möglichkeiten und wirtschaftlichen sowie technischen Chancen, welche im Biomasseanbau und der Aufbereitung noch liegen darzustellen, enthalten die Kapitel zur Land- und Forstwirtschaft finanzielle Zusammenhänge, welche den Anlieferpreis zur BtL-Anlage beeinflussen können.

Das Gebiet der Nutzung von Biomassen zur BtL-Produktion entwickelt sich z.Z. sehr stark. Viele Meinungen, Ergebnisse, Prognosen u.ä. werden in der Öffentlichkeit vertreten. Zur Absicherung der Ergebnisse dieser Studie befindet sich abschließend ein umfangreiches Quellenverzeichnis.

## **5. Errechnung der Wirtschaftlichkeit**

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Anlagen mit dem Ziel der Energie- oder Stoffumwandlung existieren verschiedene Verfahren. Im einfachsten Falle sind dies Methoden, die Kostenarten des Investes und Betriebes grob zusammenfassen und mit Nutzungsdauern und Erlösbetrachtungen per Grundrechenarten einen Betrag für die spez. Herstellkosten ermitteln.

Für Kleinanlagen und Privatpersonen existieren Normen, um Investitionssicherheit zu unterstützen [z.B. 6].

Für die Planung chemietechnischer Großanlagen im dreistelligen Millionen-Euro-Bereich aber versagen die genannten Standardmethoden. Der eigentliche Apparateinvest macht jetzt häufig nur noch ca ein Drittel der gesamten Investkosten aus. Zusätzliche Kosten des Bauherren für die Planungsphase, die Anlage eines Ersatz- und Verschleißteilelagers, Grundstück und Grundstücksvorbereitung, Verkehrsanbindung, Gebäude, Stahlbau, Elektro- und Leittechnik, Inbetriebnahmephase oder die Bauleitung fallen an und sind zu berücksichtigen.

Aufgrund des hohen Investes lohnt sich eine Betrachtung über kurze Zeiträume unter mindestens 15 Jahren nicht. Die Abschreibungszeiträume gemäß der gesetzlichen AfA-Blätter müssen wesentlich länger als bei mechanischen Apparaten angesetzt werden.

Im Laufe einer langen Betriebszeit unterliegt jede Großanlage ähnlich einem Menschen einem Lebenszyklus, hier „Badewannenkurve“ genannt: Nach Beendigung der Inbetriebnahmephase und Aufnahme des kommerziellen Betriebes besteht i.a. ein hoher Reparatur-, Ergänzungs- und Ersatzinvestitionsbedarf. Zeitraum: ca 2 Jahre. Ein Betreiber versucht in dieser Zeit, möglichst viel der Kosten als Garantie- oder Gewährleistungsmängel zu definieren und auf den (wenn ein Generalunternehmer (Abk.: GU) engagiert wurde) oder die (im Falle der Vergabe als Einzellose) Anlagenbauer abzuschieben. Die Möglichkeiten dazu hängen stark vom jeweiligen Liefervertrag ab.

Nach Beseitigung der Startschwierigkeiten und Anpassung an die häufig in der Planungsphase nicht abzusehenden Gegebenheiten läuft die Anlage in eine Phase der technischen Blüte: Reparatur- und Instandhaltungskosten sind gering, der Stand der Technik wird eingehalten. Zeitraum: ca 10 Jahre (als sehr grober Richtwert).

Mit zunehmender Betriebszeit unterliegt die Anlage einem Alterungseffekt: Reparatur- und Instandhaltungskosten steigen, Reinvestitionen in Apparate oder Baugruppen fallen an (z.B. wegen Verschleiß oder Verschärfung gesetzlicher Rahmenbedingungen) und Änderungen gesellschaftlicher Rahmenbedingungen greifen (z.B. Änderungen der Art und Qualität des Inputes, erhöhte Anforderungen an die Reststoffentsorgung oder Sicherheitstechnik, Preise für die Produkte fallen).

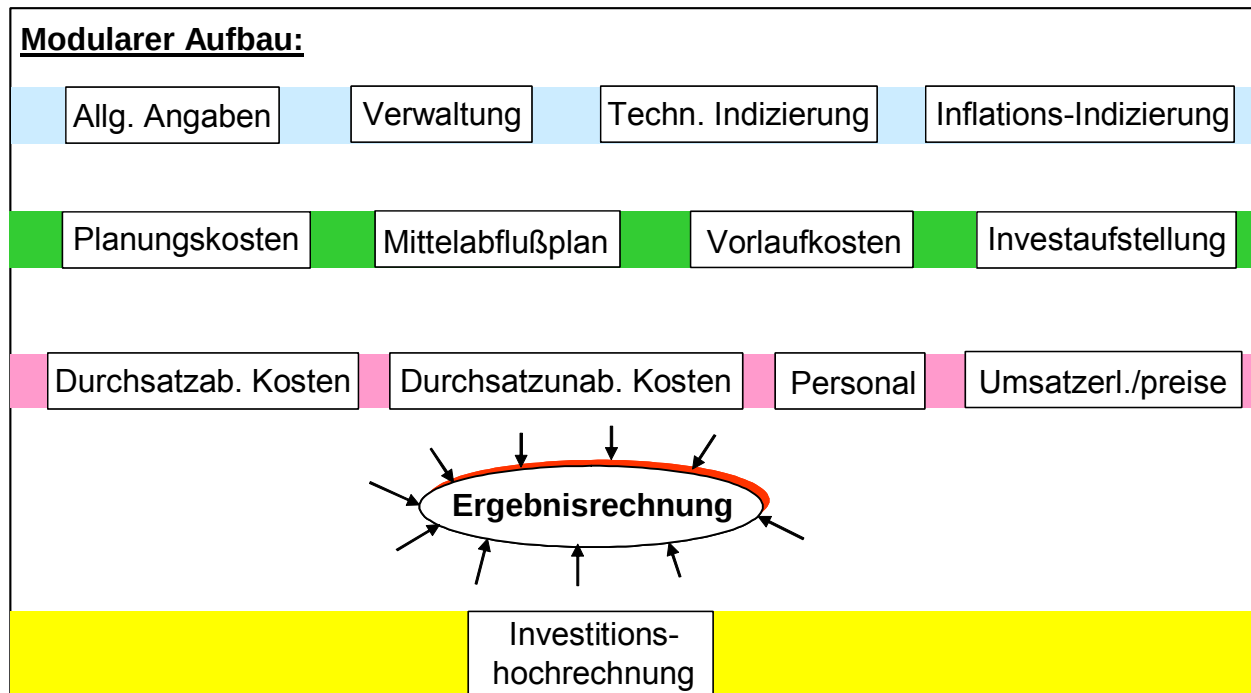
Betriebswirtschaftlich gegen den Alterungseffekt halten kann der Betreiber mit dem Umstand, daß die kalkulatorischen Nutzungsdauern i.d.R die steuerlich zulässigen Abschreibungszeiten überschreiten. D.h. es gibt Zeiträume, in denen mit hohem bilanztechnischem Gewinn gefahren wird (Anmerk.: Vorausgesetzt dies liegt im Interesse des Betreibers). Irgendwann aber wird die Instandhaltung so hoch und die Verfügbarkeit der Anlage so niedrig, daß eine Grundsanierung und Stilllegung durchgeführt werden muß.

Um alle genannten Veränderungen im Lebenszyklus einer Anlage abzubilden, ist eine dynamische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hilfreich.



Im bestehenden Vorhaben wird mit einer Betriebszeit der BtL-Anlagen von 20 Jahren gerechnet. Um die praktischen Gegebenheiten variabel abzubilden, beruht das Programm zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit auf den Prinzipien

- I. Modularer Aufbau, um mit minimalem Aufwand inhaltliche #220;nderungen durchf#252;hren zu k#246;nnen (s. **Abb. 5-1**) und
- II. Dynamischer Aufbau; d.h. j#228;hrliche Abrechnung aller Kosten und Erl#246;se.



**Abb. 5-1:** Modularer Aufbau des Programms zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

#### Erl#228;uterungen:

**Allg. Angaben:** Hier sind Angaben wie der zugrunde liegende Kapitalmarktzins oder der Eigenanteil angegeben.

**Verwaltung:** Enth#228;t eine Absch#228;tzung der von der Zahl der Besch#228;ftigten abh#228;ngigen Kosten f#252;r Arbeitskleidung, EDV, Wirtschaftspr#252;fer etc.

**Technische Indizierung:** Bildet die Alterung der Anlage ab als steigenden Aufwand in Reparatur/Wartung/Unterhaltung bzw. Personalbedarf.

**Inflations-Indizierung:** Alle aufgef#252;hrten Kostenarten werden jeweiligen Inflationsabsch#228;tzungen #252;ber die Betriebslaufzeit zugeordnet. So werden z.B. Personalkosten mit 3 %/a angesetzt und das Versicherungspaket mit 2 %/a. W#228;hrend der 20 Jahre k#246;nnen sich die S#228;tze #228;ndern.

**Planungskosten:** Vom Anlageninvest nur mittelbar abh#228;ngig, von der Art der Anlage dagegen stark abh#228;ngig. Zu nennen sind z.B. Umweltvertr#228;glichkeitsuntersuchung, #220;ffentlichkeitsarbeit, Projektsteuerung, Bauoberleitung, juristische Beratung usw.. Besonders zu erw#228;hnen ist, da#223; gem#228;#223; HOAI definierte Planungskosten f#252;r Entwurfsplanung, Basic und Detail Engineering hier nicht enthalten sind. Diese sind thematisch den



Auszahlungen an externe Generalplaner bzw. Anlagenbauern zugeordnet im Modul *Mittelabflußplan*.

**Mittelabflußplan:** Aufstellung aller Kostenarten des Investes. Da vom Start der konkreten Realisierung (hier: Beauftragung des Basic Engineering) bis zur Aufnahme des kommerziellen Betriebes mit mindestens vier Jahren Planungs- und Bauzeit zu rechnen ist, sind den Kostenarten ein (geschätzter) Mittelabflußplan zugeordnet, aus dem die Bauzeitzinsen errechenbar sind. Exemplarische Rechnungen zeigen, daß in einem Gesamtvolumen von ca 400 Mio € ca 30 Mio € an Zinsen enthalten sein können bei einem Kreditzins von 6,5 % und dem in dieser Studie angesetzten Bauzeitplan.

**Vorlaufkosten:** Zusammenstellung der Kosten auf Bauherrenseite für Personal, was schon vor Aufnahme des kommerziellen Betriebes eingestellt werden muß (z.B. Betriebsleiter, Betriebsingenieure, Schichtpersonal etc.) sowie für Betriebsmittel und Reststoffentsorgung während der Heißinbetriebnahme und Probefahrten.

**Investaufstellung:** Die im Mittelabflußplan definierte Aufstellung wird mit den jeweiligen Bauzeitzinsen belegt, um zu den Herstellkosten zu kommen. Für jede Baugruppe wird außerdem eine Belegung mit steuerlichen und kalkulatorischen Abschreibungszeiten getroffen sowie eine Abschätzung des grundsätzlichen Reparatur-/Wartung-/Unterhaltungs- (Abk.: RWU)Aufwandes.

**Durchsatzabhängige Kosten:** Reststoffentsorgung, Additive, Strom, Heizöl usw.

**Durchsatzunabhängige Kosten:** Versicherung, Verwaltung, Reservevorhaltung Strom/Gas/Wasser u.ä.

**Personal:** Aufbauend auf einen Stellenbesetzungsplan werden Gehälter und Lohnnebenkosten für die jeweiligen Mitarbeiter abgeschätzt.

**Umsatzerlöse und -preise:** Bei einer Großanlage können verschiedene Produkte anfallen. In diesem Falle wären es Naphta, Straight Run Diesel und Wachs. Die Produkte erzielen verschiedene spezifische Erlöse.

Der Input dürfte sich aus verschiedenen Biomassen mit unterschiedlichen Preisen zusammensetzen. Sowohl Preise als auch Erlöse sind über die Betriebslaufzeit variabel zu gestalten.

**Investitionshochrechnung:** Hier werden aus den kalkulatorischen Abschreibungszeiten, den ursprünglichen Investkosten und den Inflationsraten die Reinveste während der Betriebslaufzeit errechnet. Ebenso die Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraumes. Die Reinveste gehen als Auszahlungen in die Ergebnisrechnung ein.

**Ergebnisrechnung:** Stellt die Auszahlungen und Einnahmen in jedem Jahr gegenüber, errechnet die Steuerlast im Falle einer Gewinnsituation. Errechnet ebenso den Internen Zinsfuß nach einer Betriebslaufzeit von 20 Jahren sowie die Eigenkapitalverzinsung.

## 6. Ergebnisse zu land- und forstwirtschaftlichen Vorgaben

### 6.1 Forstwirtschaft

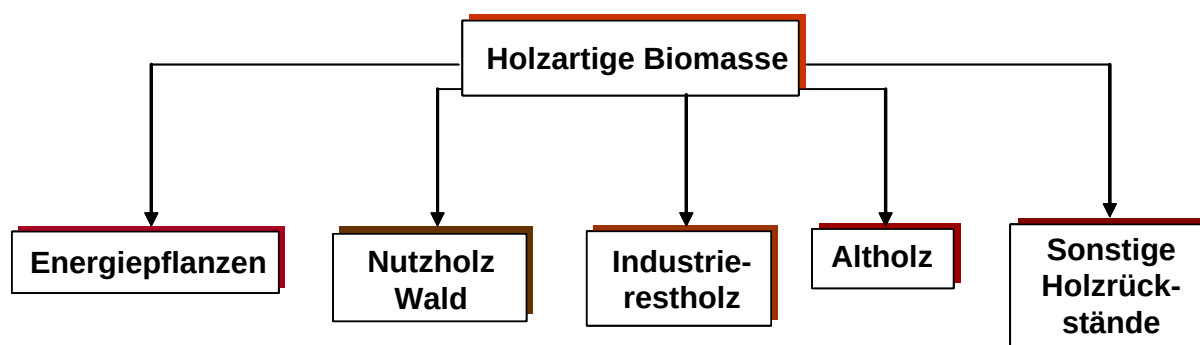
#### 6.1.1 Allgemeines

Die bisherigen Konzepte der in RENEW [7] vertretenen technischen Konzepte, zu nennen sind besonders Carbo-V<sup>®</sup>, Anlage Güssing, ArtFuel-Anlage, starteten ihre Arbeiten mit dem Brennstoff Holz. Die Ursachen liegen auf der Hand: Das Material ist in den Formen A I und A II asche- und schadstoffarm, sein Verbrennungsverhalten ist bekannt und verschiedenste Partikelformen sind auf dem Markt erhältlich. Nur die Kombination Forschungszentrum Karlsruhe / FUTURE ENERGY geht zielgerichtet das chemisch komplexe Stroh an.

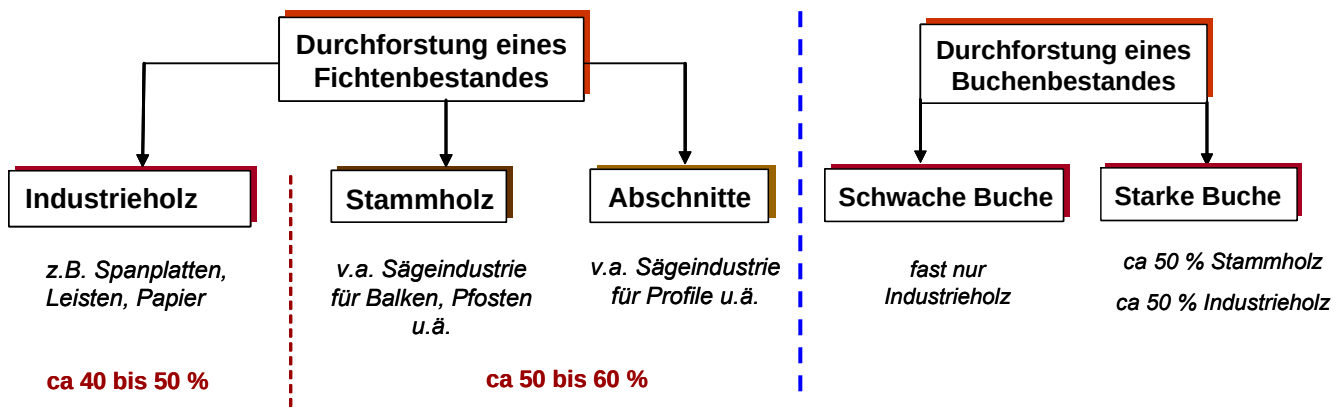
In der Literatur sowie in Gesprächen mit verschiedenen Branchen (besonders am Beispiel Energiewirtschaft ↔ Forstwirtschaft spürbar) stand die Untersuchung oft dem Umstand gegenüber, daß „Holz“ nicht gleich „Holz“ ist. Was besonders bei Diskussionen über heute und künftig verfügbare Mengen sowie deren spezifischen Preisen schnell zu Mißverständnissen führen kann.

Die beobachteten Kommunikationsschwierigkeiten zwischen den Branchen Biomasseproduzenten, -händlern und -anwendern sind kein Projektspezifikum, sondern allgemein bekannt. Daher erarbeitete das EU-weit etablierte *Technische Komitee CEN/TC 335 „Feste Biobrennstoffe“* eine Norm, welche die Materialien nach **a)** „Herkunft und Quelle“ und **b)** „Hauptsächliche Handelsformen und Eigenschaften“ klassifiziert und definiert. Das Ergebnis ist als DIN CEN/TS 14961 [1] seit Mai 2005 auch in deutscher Sprache erhältlich. Es besitzt z.Z. aufgrund von Vorbehalten gegenüber Inhalt und Form noch den Status einer Vornorm; stellt aber für Anwender schon ein hilfreiches Werkzeug dar. Ziel ist eigentlich die Nutzung von Biomasse als Brennstoff; es ist aber derart gestaltet, daß auch künftige BtL-Produzenten beim Abschluß von Lieferverträgen auf das Papier zurückgreifen können und sollten.

Die folgenden Zeilen geben kurz eine Definition der wichtigsten Begriffe, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, bevor die eigentlichen Ergebnisse vorzustellen sind. Es erfolgt eine Strukturierung aus der Sicht eines Käufers von Holz zur energetischen Nutzung (s. **Abb. 6.1.1-1**) sowie aus Sicht der Forstwirtschaft als Produzenten (s. **Abb. 6.1.1-2**).



**Abb. 6.1.1-1:** Strukturierung holzartiger Biomasse aus der Sicht von Anwendern der Energietechnik [abgeleitet aus z.B. 8,9,10]



**Abb. 6.1.1-2:** Strukturierung von Nadel- und Laubholz aus der Sicht der Forstwirtschaft [11]

Die Ausführungen in dieser Arbeit konzentrieren sich auf das Holz aus der Forstwirtschaft.

### Abschnitte

Hochwertiges Holz, welches bei der Ernte durch einen Harvester (Anmerk.: Maschine zur Vollernte) anfällt. Die Abmaße sind geringer als beim Stammholz. Abnehmer ist die Sägeindustrie.

### Stammholz

Hochwertiges Holz mit großem Volumen. Es wird für Balken, Träger u.ä. verwendet. Die Bearbeitung erfolgt durch Waldarbeiter. Abnehmer ist ebenfalls die Sägeindustrie.

### Industrieholz

Als Industrieholz wird das Holz bezeichnet, welches faule Anteile aufweist oder nicht zu Produkten gesägt werden kann, sondern in Industrieunternehmen zerkleinert werden muß. Beispielhafte Produkte: Spanplatten, Leisten, Papier.

### Läuterungs- und Waldrestholz

**X-Holz** ist das bei Durchforstungsmaßnahmen anfallende Holz von kranken oder qualitativ minderwertigen Bäumen, die etwa alle zehn Jahre aus dem Bestand entfernt werden, um das Wachstum hochwertiger Bäume zu verbessern.

**Abfallholz bei der Stammholzernte** setzt sich zusammen aus dem nicht aufgearbeitetem Kronenderbholz (Äste mit Durchmesser > 7 bis 8 cm) mit Rinde, sowie dem Reisholz oder Schlagabraum (Äste mit Durchmesser < 7 bis 8 cm) mit Rinde.

### Industrierestholz

Als Industrierestholz wird das Holz bezeichnet, welches in der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie als Nebenprodukt oder Abfall anfällt. Es handelt sich dabei um Hackschnitzel, Rinde, Schwarten, Abschnitte, Späne, Stäube usw. Der Anteil dieses Holzes kann bis zu 50% des verarbeiteten Stammholzes betragen. Eine stoffliche Nutzung (z.B. Spanplattenherstellung) dieses Holzes ist derzeit aus ökonomischen Gründen sinnvoll, so daß nur ein kleinerer Teil für die energetische Nutzung zur Verfügung steht. Er wird vorzugsweise in der herstellenden Industrie zur Deckung des Energie-Eigenbedarfes eingesetzt.

### Altholz

Bei Altholz handelt es sich um Holz, welches aus dem stofflichen Nutzungsprozeß ausscheidet. Eine genaue Unterteilung in die Klassen A I bis IV in Abhängigkeit von Entstehungs-

ort und Schadstoffgehalten nimmt die Altholzverordnung vor [12]. (Anmerk: Die Altholzverordnung definiert als Grundlage für ihre Ausführungsvorschriften alle Holzsorten; also mit der Klasse A I auch das naturbelassene Material.)

### **Sonstige Holzrückstände**

Hierunter fallen alle oben nicht erfaßten Hölzer, welche thermisch genutzt werden können. Das Aufkommen ist oft lokal begrenzt und/oder fällt nur in gewissen Abständen an. Zu nennen sind z.B. Landschaftspflegeholz oder Schwemmholz aus Gewässern.

## **6.1.2 Verfügbarkeiten**

Zu sogenanntem **Altholz** existieren seit Ende der 90er Jahre umfangreiche Untersuchungen zu Menge und Herkunft. Ursache: Das EEG [13] macht durch seinen subventionierten Strompreis den Bau von Biomassekraftwerken attraktiv. Für die Finanzierung durch die Banken sind i.a. Nachweise einer langfristigen Brennstoffversorgung zu gesicherten Preisen notwendig. Studien schätzten für Deutschland ein Aufkommen von ca 8 Mio t/a [14,15].

Große Hoffnungen bezüglich einer Steigerung der Holzverfügbarkeit werden in die Erhöhung des **Holzeinschlages** in den Wäldern gesetzt. Experten halten eine Steigerung von gegenwärtig 19,6 auf knapp 30 Mio Tonnen bis zum Jahr 2020 für möglich [15,16]. Die Nachfrage nach dem Material ist beträchtlich. So berichtet [17], daß die Forstwirtschaft im Harz aufgrund des in den letzten zwei Jahren stark gestiegenen Bedarfs kaum noch Chancen sieht, den Einschlag ohne eine nachhaltige Gefährdung des Bestandes zu erhöhen. Ungenutzte Potenziale der bisher mit traditionellen Erntemethoden bewirtschafteten Flächen seien nicht bekannt; eine kleine Möglichkeit wären vielleicht Bäume in Hanglagen. Menge: Maximal 5 % des z.Z. ausgebrachten Materials. Zu bemerken sei allerdings, daß Hanglagen sehr schwierig und nur in aufwändiger Handarbeit mit entsprechendem Preis zu bewirtschaften seien. An den Einsatz von Harvestern sei nicht zu denken, so daß der Preis um ein Mehrfaches über dem sonstigen Erlös liegen müsse [17].

Diese für eine Region gültige Aussage zum drastisch gestiegenen Holzabsatz läßt sich durch eine nationale Beobachtung manifestieren: So ging das Biomasse Info-Zentrum im März 2003 von 14 Unternehmen aus, welche in großem Maßstab Pellets erzeugten (Menge in 2003: ca 90.000 Tonnen) [15]. Die langfristig prognostizierte Menge von 260.000 Tonnen wird schon im Jahre 2006 deutlich übertroffen, da zu den in den letzten Jahren hinzugekommenen Unternehmen in der PCK-Raffinerie Schwedt ein großes Werk mit einer Kapazität von 100.000 t/a in Betrieb geht. Die Werke decken den Bedarf einer Vielzahl an Pellethändlern [18].

Die stürmische Entwicklung (über 300 % Produktionszuwachs in drei Jahren) wird vor allem durch den Einsatz der Holzpellets für den Hausgebrauch ausgelöst. Ein Ende des Booms ist bei weiter ansteigenden Öl- und Gaspreisen nicht absehbar.

Die Suche nach Definition und Hebung unbekannter bzw. ungenutzter Potenziale ist in vollem Gange. Ein Beispiel ist die *Energieholzpotenzial-Analyse* (Träger: Niedersächsische Landesforsten [11]), welche ermitteln soll, wie viel Holz nachhaltig in Zukunft im Bundesland Niedersachsen zu liefern ist. Eine bisher noch nicht genutzte Quelle sind z.B. die kleinen Privatwälder v.a. landwirtschaftlich tätiger Betriebe. Eine wirtschaftliche Ernte des vorhandenen Holzes scheitert bisher daran, daß a) der Einsatz von auf großen Durchsatz ausgelegten

Erntemaschinen (z.B. Harvester, Großhacker) aufgrund mangelhafter logistischer Gegebenheiten, speziell breite Wege in befahrbarem Zustand, schwierig ist und **b)** die Zuordnung der Ernteleistungen der genannten Erntemaschinen auf die einzelnen Landwirte aufgrund der engen und oft räumlich ineinander verzahnten Besitzstände sehr schwierig ist.

Eine weitere Möglichkeit zur erhöhten flächen- und zeitbezogenen Ausbeute wäre, Bestände von Holz zur energetischen Nutzung in einem geringeren Alter als Holz zur stofflichen Nutzung zur ernten. Auch hier soll die *Energieholzpotenzial-Analyse* Möglichkeiten und Grenzen aufzeigen.

Neben der Erschließung weiterer Flächen bzw. deren erhöhter Ausnutzung unterstützen neue Techniken die bessere Ausbeute des vorhandenen Holzbestandes. So sind zur hochmechanischen Durchforstung z.Z. sogenannte **Großhacker** im Einsatz, welche ganze Bäume ernten und sofort zu Hackschnitzeln verarbeiten. Das Material wird in Container gegeben und abtransportiert. Voraussetzung zum Einsatz der Maschinen sind breite, gut befahrbare Wege, welche nicht nur den Großhacker arbeiten lassen, sondern auch den raschen Abtransport der Container ermöglichen. Zielmaterial sind schwaches Laub- und Nadelholz ohne die Möglichkeit der Sägewerkverwendung.

### 6.1.3 Kosten und Preise

**Vorbemerkung:** Möchte man aus der Sicht eines BtL-Anlagenbetreibers Auskunft über Kosten und Preise bekommen, so ergibt sich wie in den beiden vorhergehenden Kapiteln eine Verständigungsschwierigkeit: Während der Nutzer des Holzes seine gesamten Stoffströme in Tonnen (bzw. sonstigen Masseinheiten) kalkuliert, alleine schon um seine Anlage aus genehmigungsrechtlicher Sicht geschlossen bilanzieren zu können, bevorzugen die Erzeuger und Händler von Holz die Rechnung in Volumeneinheiten. Energetisch wichtige Betrachtungen wie Wassergehalt und Heizwert besitzen keine Tradition; setzen sich aber langsam zumindest auf der Händlerseite durch.

Die Volumeneinheiten wiederum hängen von a) der Holzart und b) der Holz- und Lagerform ab. Einen kleinen Einblick in die Situation gibt **Tab. 6.1.3-1**. (**Anmerk.:** Weitere Definitionen sind möglich, z.B. [19]).

|                                                   | Festmeter<br>[Fm] | Rundlinge<br>geschichtet<br>[Rm] | gespalten, 1<br>m, gekreuzt<br>[Rm] | gespalten, 1 m,<br>geschichtet<br>[Rm] | Scheite, 33 cm,<br>geschichtet<br>[Rm] | Scheite, 33 cm,<br>lose geschüttet<br>[Rm] |
|---------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Umrechnungsfaktoren, bezogen auf einen Festmeter: |                   |                                  |                                     |                                        |                                        |                                            |
| Buche                                             | 1,00              | 1,70                             | 2,38                                | 1,98                                   | 1,61                                   | 2,38                                       |
| Fichte                                            | 1,00              | 1,55                             | 2,07                                | 1,80                                   | 1,55                                   | 2,52                                       |

**Tab. 6.1.3-1:** Umrechnungsfaktoren von Festmetern auf verschiedene Raummeter [20]

Die unterschiedlichen Inhalte an Holz bei verschiedenen Raummeter-Betrachtungen resultieren im wesentlichen aus den differierenden Lückenvolumina. Die Einheit [Fm] bezieht sich dagegen auf massives Holz.

Im Folgenden sind bei den Kostenangaben als Bezugsgrößen die Einheiten angesetzt, wie sie von den verschiedenen Quellen verwendet wurden:

Bis zur Bereitstellung von **Waldholz** sind einige Arbeitsgänge zu bewältigen. Dabei kann man für das Rücken mit Kosten von ca 8 bis 10 €/Fm rechnen; die sonstigen Kosten hängen von der Holzsorte und dem Produkt ab [17]. Die Lagerung des geschlagenen Holzes erfolgt bis heute auf Kulanz kostenfrei.

Als Preise ergeben sich (Stand: Juni / August 2005) für durch Harvester produzierte **Abschnitte** sowie **Stammholz von Nadelbäumen** ca 55 bis 60,- € pro FM [11].

Für **Stammholz von hochwertigen Laubbäumen** (z.B. „starke Buche“, dito z.B. Eiche, Ahorn, Birke) sind Preise von ca 150,- € pro Fm zu zahlen.

**Industrieholz** aus Fichten- oder Laubbaumbeständen ist für ca 30 € pro Fm frei Straße zu kaufen [11].

Für **Durchforstungs- und Waldrestholz** fallen ähnliche Kosten der Verarbeitung wie beim Stammholz an. Daher ist ebenfalls mit Preisen frei Straße von 25 €/Fm zu rechnen.

Für **Hackschnitzel aus Großhackern** ist mit einem Verkaufspreis von ca 30 € pro Fm ab Container zu rechnen.

Zu bemerken ist, daß alle genannten Kosten für forstwirtschaftlich gepflegten Wald gelten. Sollten spezielle Lagen erschlossen werden (z.B. Hanglagen, kleine Bauernforste) ist mit höheren Kosten zu rechnen. Beachtenswert ist, daß nicht nur Ortsfaktoren wie schwieriges Fällen oder für Maschinen unzugängliche Rückegassen eine Rolle spielen, sondern daß die Arbeitszeit zum Fällen und Aufarbeiten eines Baumes nahezu unabhängig vom Stammdurchmesser ist [17]. D.h. kleine Bäume verursachen einen ähnlichen Aufwand wie Große.

Ferner muß noch einmal explizit betont werden, daß die genannten Preise aus Sicht der Forstwirtschaft genannt sind mit Stand 2005. Für BtL-Anlagen wichtige Größen wie Trocknung, eventuelle Formgebung, Transporte einschließlich Umschlagsvorgängen, Lagerung und Energieinhalt sind nicht erfaßt.

Alle genannten Fakten beantworten noch nicht die Frage: Was bedeuten die Zahlen für einen Betreiber einer BtL-Anlage? Welche finanziellen Lasten ergeben sich bei einer Umrechnung auf € pro Tonne Trockenmasse?

Zur Beantwortung muß der Schritt vom Volumen- auf das Gewichtsmaß vollzogen werden. Anhaltspunkte auf den notwendigen Kennwert Dichte liefert **Tab. 6.1.3-2**.

|                                               | Birke | Buche | Eiche | Pappel | Fichte | Kiefer |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Gewicht je Rm Scheit-<br>oder Rollenholz [kg] | 450   | 500   | 550   | 380    | 350    | 450    |

**Tab. 6.1.3-2:** Spezifische Gewichte verschiedener Holzarten [21]



**1. Beispielrechnung Fichte:** Aus den Tab. 6.1.3-1 und -2 ergibt sich bei einem Umrechnungsfaktor von 1,55 eine Dichte von 543 kg/Fm. Mit einem Preis für Industrieholz von ca 30,- €/Fm errechnet sich ein spez. Wert von ca **55,- €/t<sub>Frischmasse</sub>**. Geht man von einem Wassergehalt von 60 % bei Frischmasse aus, so liegt der auf die Trockenmasse bezogene Preis (unaufbereitet, frei Waldstraße) bei **92,- €/t<sub>Trockenmasse</sub>**.

**2. Beispielrechnung schwache Buche:** Aus den Tab. 6.1.3-1 und -2 ergibt sich bei einem Umrechnungsfaktor von 1,70 eine Dichte von 850 kg/Fm. Mit einem Preis für Industrieholz von ca 30,- €/Fm errechnet sich ein spez. Wert von ca **35,- €/t<sub>Frischmasse</sub>**. Geht man von einem Wassergehalt von 60 % bei Frischmasse aus, so liegt der auf die Trockenmasse bezogene Preis (unaufbereitet, frei Waldstraße) bei **58,- €/t<sub>Trockenmasse</sub>**.

(Anmerk.: Die höhere Dichte der Buche zieht einen höheren Heizwert nach sich, sodaß für diese Baumart eigentlich ein höherer Preis als bei Fichte gerechtfertigt wäre. Der errechnete niedrigere Preis resultiert einzig daraus, daß für die Qualität *Industrieholz* bei Fichte und Buche z.Z. die gleichen, volumenbezogenen Preise gelten.)

**Industrierestholz** wird mit steigender Tendenz am Ort des Anfalls thermisch verwertet. Mit einer Verfügbarkeit für BtL-Anlagen ist nicht zu rechnen [22].

Den Grenzpreis der Wirtschaftlichkeit für Biomassekraftwerke der Maximalgröße 20 MW<sub>el</sub> und einer Zulassung bis A IV-Holz, gerechnet als Durchschnittspreis eines Brennstoffmix, setzte eine bekannte Untersuchung bei **17,- €/t Altholz** an [23]. Für kleinere Kraftwerke bzw. niedriger Zulassung ist mit noch geringeren Zuzahlungen zu rechnen.

Der Preis ist für BtL-Anlagen attraktiv. Ob eine Nutzung realisiert werden kann, erscheint sehr fraglich, da 1) die Biomassekraftwerke sich i.A. mit langfristigen Lieferverträgen absicherten und 2) die BtL-Anlagen durch die Annahme von Abfall in ein anderes Regime des Genehmigungsrechtes rutschen könnten, welches z.B. Abwasserfreiheit, spezielle Umweltverträglichkeitsprüfung usw. fordern könnte, 3. Altholz eine komplexere Aufbereitung erfordert, 4. Altholz zu einem nennenswerten Anteil aus der Sperrmüllaufarbeitung kommen wird und Entsorger ihre eigenen Kraftwerke damit betreiben.

**Sonstige Holzrückstände** sind stofflich kaum zu verwerten. Oft gehen sie als Abfall in Kompostwerke, so daß für sie ein Entsorgungserlös zu zahlen ist.

#### 6.1.4 Lagerung, Transport und Umschlag

Um frisches Waldholz auf einen Wassergehalt von ca 40 Gew.-% zu trocknen, ist eine Lagerzeit im Wald von ca zwei Jahren notwendig. Von den Forstämtern wird die Lagerung noch kostenfrei geduldet; ist aber nicht gern gesehen. Denn das geschlagene Holz stellt eine Nahrungsquelle für den gefürchteten Borkenkäfer dar; außerdem werden Waldwege teilweise eingengt und große Maschinen behindert.

Eine andere Möglichkeit der Lagerung bei gleichzeitiger Trocknung besteht bei Holzhändlern. Diese bieten manchmal an, durch Nutzung einfacher Gebäude eine Lufttrocknung im Sommer in wenigen Wochen auf Wassergehalte bis zu 30 % herbeizuführen.

Der Transport von Stammholz und Abschnitten ist Stand der Technik; die Nutzung von Waldrestholz aber erfordert Maßnahmen zur Gewährleistung einer hohen Transportdichte.



So offeriert die Fa. von Atzingen *Holzschnitzel* eine Bündelmaschine, mit welcher der Schlagabraum besser lager- und transportfähig sowie bearbeitbar wird (s. **Abb. 6.1.4-1**). Details sind [24] zu entnehmen. Ein für die Energiegewinnung wichtiger Aspekt liegt in dem Umstand, daß die Bündel wie Stammholz zu Hackschnitzel zu zerkleinern sind.



**Links:** Einsatz nach einem Holzeinschlag mit Gebirgsharvester, **Rechts:** Transport der Energieholzbündel erfolgt mit den für Rundholz üblichen Fahrzeugen

**Abb. 6.1.4-1:** Bündelmaschine für Schlagabraum und Transport der Bündel. [24]

Für die energetische Nutzung zu beachten ist, daß die Bündel i.d.R. keine Reinheitsanforderungen wie Rindenfreiheit erfüllen. Da in der Rinde der Großteil der besonders aus der Luft kommenden Stoffe gespeichert ist, liegt der Schadstoffgehalt höher als bei anderen Holzarten.

Nach Angaben der Firma liegen die Gesamtkosten für Bündeln, Aufladen/Transport/Lagern und Hacken bei 28 bis 40 Schweizer Franken für eine Menge von 500 bis 700 kg Hackschnitzel (*Anmerk.:* Bei einem Kurs von 1,56 € pro SFr ergibt dies umgerechnet 39 bis 62 €). Den exakten Preis bestimmen die Örtlichkeiten.

Die Transportpreise von Holz hängen sehr stark von den Entfernungen und Beladungen ab.

Pro Umschlag ist mit Kosten von ca 2 bis 2,5 €/t<sub>FS</sub> zu rechnen.

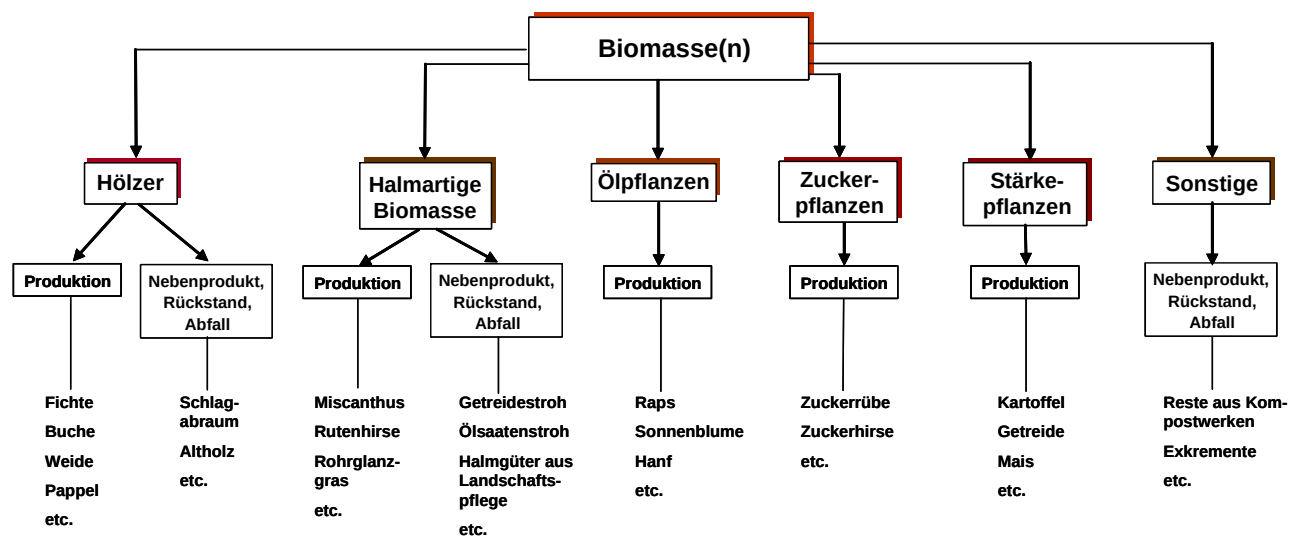
## 6.2 Landwirtschaft

**Vorbemerkung:** Die folgenden Darstellungen zum Themenbereich „Landwirtschaft“ stellen nur einen Auszug aus den komplexen Zusammenhängen dar. Ziel ist es, potenziellen BtL-Anlagenbetreibern einen Eindruck von der Vielzahl an Variablen zu geben, welche die Preisfindung des Landwirtes beeinflussen.

Für weitergehende Interessen findet sich eine detaillierte Aufstellung von Arbeitsgängen und damit verbundenen Kosten in [25].

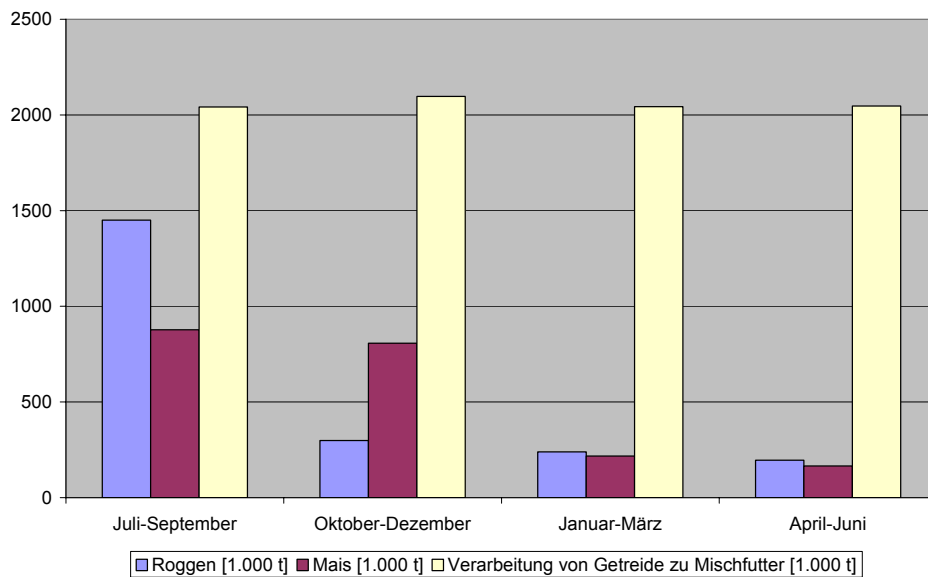
### 6.2.1 Allgemeines

Für die BtL-Produktion interessante Pflanzen können verschiedenen Gruppen entstammen (s. **Abb. 6.2.1-1**). Im Folgenden werden aus den vielen Möglichkeiten exemplarisch zwei kommerzielle Pflanzen, welche heute schon für Biogasanlagen und die Ethanolproduktion mit steigender Tendenz Verwendung finden, herausgesucht und näher untersucht: Mais und Roggen. Dabei konzentrieren sich die Beschreibungen auf finanzielle Aspekte, Verfügbarkeiten und stoffliche Eigenschaften. Im Kapitel *Energiepflanzen* sind Entwicklungen dargestellt, welche besonders die Eigenschaften des Inputs für BtL-Anlagen beeinflussen können.

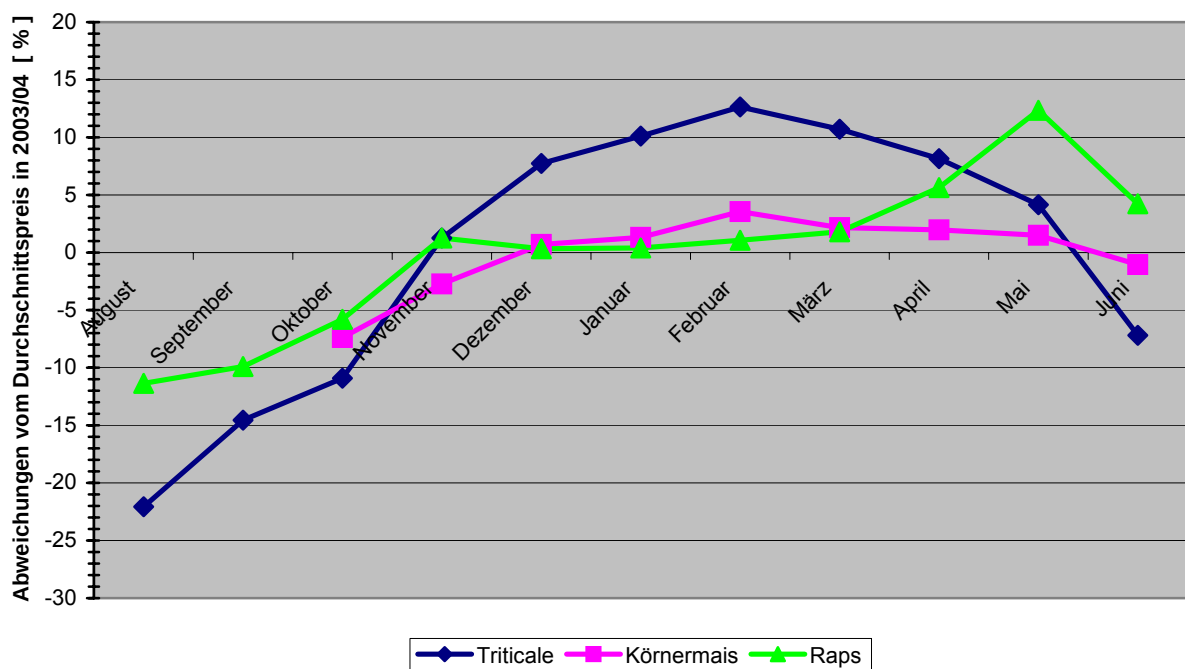


**Abb. 6.2.1-1:** Einteilung von Biomassen als mögliche BtL-Inpute [8]

Während konventionelle Kraftwerke und M lllkraftwerke über das Jahr gesehen von einigermaßen konstanten Brennstoffeigenschaften ausgehen können, so werden Betreiber von BtL-Anlagen vor der Erscheinung stehen, daß es zu monatlichen bzw. quartalsmäßig stark unterschiedlichen Angeboten verschiedener Biomassen kommt. Die Verarbeitung bei vielen traditionellen Abnehmern bleibt dagegen konstant (s. **Abb. 6.2.1-2**). Die Entscheidung, ob ein sofortiger Verkauf eine höhere Rendite bringt als die Einlagerung, besitzt einen gewissen spekulativen Charakter, da die Erlöse über das Jahr schwanken (s. **Abb. 6.2.1-3**). Das Ausmaß der Schwankung hängt vom Produkt sowie dessen Preisniveau ab; aber eine Größenordnung von ca 20 bis 30 % Differenz vom Minimum zum Maximum ist nicht zu vernachlässigen.



**Abb. 6.2.1-2:** Charakteristische vierteljährliche Verkäufe der Landwirtschaft bzw. Verarbeitung von Getreide auf der Abnehmerseite [27]



Durchschnittspreise in 2003/04: Triticale: 122,6 €/t, Körnermais: 149,2 €/t, Raps: 251,3 €/t

**Abb. 6.2.1-3:** Preisschwankungen für Getreide und Mais übers Jahr [abgeleitet aus 27]

Zur Beurteilung der chemischen Pflanzeigenschaften aus Sicht der thermischen Zersetzung und Synthesegasreinigung ist zu beachten, daß sich bei Pflanzen im Laufe der Reifung die Verteilung der chemischen Elemente ändert: Alle für die Fortpflanzung wichtigen Stoffe wandern in das Korn; die Ballaststoffe verbleiben im Stengel [26]. Dies führt dazu, daß eine deutlich vor der Vollreife geerntete Ganzpflanze homogenere thermische Zersetzungseigenschaften besitzt als eine Mischung aus Stroh und z.B. angelieferter schlechter Roggenqualität zur thermischen Verwertung.

## 6.2.2 Feuchtkonservierte Biomassen am Beispiel Mais

**Allgemeines:** Mais gehört zur Familie der Süßgräser und ist eine einjährige C<sub>4</sub>-Pflanze. Sein Stengel wird bis zu 4 m hoch. Die Blätter können 30 bis zu 150 cm lang werden. Die Pflanze hat aufgrund ihrer subtropischen Herkunft hohe Temperatursprüche und kann sowohl auf leichten als auch auf schweren Böden angebaut werden. Zur Produktion eines hohen Korn-ertrages ist ein entsprechend hoher Düngeraufwand erforderlich. Ein großer Teil der Nährstoffe kann bei Mais über Düngung tierischer Gülle zugeführt werden. Junge Maispflanzen sind sehr empfindlich gegen Unkrautkonkurrenz, so daß mechanische oder chemische Unkraut-bekämpfung nötig ist [8].

**Anbau:** Aus Sicht eines BtL-Anlagenbetreibers spielt besonders die Düngung eine große Rolle, da sich **a)** in der Ganzpflanze ein großer Teil der zugeführten Mineralstoffe wiederfindet und **b)** im Sinne geschlossener Stoffkreisläufe die Asche aus der thermischen Zersetzung in der Synthesegasreinigung gezielt abgeschieden werden sollte, und zwar möglichst in einer direkt für die düngemittelherstellende Industrie nutzbaren Form.

Die Menge an aufgebrauchten Düngemitteln hängt im wesentlichen vom gewünschten Ertrag und der Unterstützung durch Gülle ab ( s. **Tab. 6.2.2-1**).

| Bruttoertrag*       | 375 dt/ha  |                    | 450 dt/ha  |                    | 600 dt/ha  |                    |
|---------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|
| [ kg / ( ha * a ) ] |            |                    |            |                    |            |                    |
|                     | ohne Gülle | mit 26 m³<br>Gülle | ohne Gülle | mit 31 m³<br>Gülle | ohne Gülle | mit 40 m³<br>Gülle |
| Stickstoff          | 150        | 27,60              | 150        | 30                 | 170        | 30                 |
| Phosphor<br>(P₂O₅)  | 80         | 0,00               | 95         | 0                  | 125        | 1                  |
| Kali (K₂O)          | 158        | 20,75              | 195        | 103                | 270        | 150                |
| Magnesium<br>(MgO)  | 40         | 10,46              | 40         | 9                  | 40         | 0                  |
| Kalk (CaO)          | 300        | 7,54               | 300        | 300                | 300        | 300                |

\*: Bei Mais ist vom Bruttoertrag i.d.R. noch ein Verlust von ca 17 Gew.-% an Ernte- und Lagerverlusten abzuziehen

**Tab. 6.2.2-1:** Repräsentativer Nährstoffbedarf für Silomais mit einem TS-Gehalt von 32 % [28]

Auf die Auswirkungen der Elemente Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium im Brennstoff auf die Ascheeigenschaften nach der Vergasung wird im Kap. 7 näher eingegangen.

**Ernte und Lagerung:** Erntezeitraum für Mais ist Ende September bis Anfang November. Zur Lagerung in Form von Silage ist ein Trockensubstanzgehalt von mindestens 28 Gew.-% notwendig; ansonsten besteht die Gefahr der Sickersaftbildung und Nährstoffauswaschung. Maximal sind 36 bis 38 Gew.-% möglich. Bei höheren Werten ist das Material nicht mehr silier- und pressbar. Die Mais-Silage umfaßt die Ganzpflanze [26]. Die vorgeschaltete Häckselung

verläuft i.a. mit einem wesentlich geringeren Anteil an flachen Strohbestandteilen und Stengeln als bei Getreide [29], was den Transport (z.B. durch Zellenradschleusen) und die Formgebung erleichtert.

**Kosten und Preise:** Eine exakte, repräsentative Aufstellung der Kosten des Maisanbaus für das Jahr 2004 ist in [28] aufgeführt. Eine stark vereinfachte Darstellung für einen Hektarertrag zeigt **Tab. 6.2.2-2**.

| Bruttoertrag:            | 375 dt / ha   |             |                             |              |
|--------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--------------|
|                          | ohne Gülle    |             | mit 26 m <sup>3</sup> Gülle |              |
|                          | [ € / ha ]    | [ % ]       | [ € / ha ]                  | [ % ]        |
| Saatgut                  | 160,50        | 18,8        | 160,50                      | 20,6         |
| Dünger                   | 189,34        | 22,2        | 66,35                       | 8,5          |
| Pflanzenschutz           | 133,23        | 15,6        | 133,23                      | 17,1         |
| Bodenunt., Folie, Sonst. | 58,69         | 6,9         | 58,69                       | 7,5          |
| Maschinenkosten          | 156,98        | 18,4        | 209,88                      | 26,9         |
| Lohnmaschinen            | 140,17        | 16,5        | 140,17                      | 18,0         |
| Zinsanspruch             | 12,58         | 1,5         | 11,53                       | 1,5          |
| <b>Summe</b>             | <b>851,49</b> | <b>99,9</b> | <b>780,35</b>               | <b>100,1</b> |

**Tab. 6.2.2-2:** Aufschlüsselung der variablen Kosten beim Maisanbau für einen Hektarertrag [28]

Beim Begriff *Mais* ist in der Praxis deutlich zu unterscheiden zwischen der Ganzpflanze und dem gewonnenen Korn. Während der Erzeugerpreis für das Korn zwischen ca 100 und 150 € / t in den letzten Jahren schwankte (s. Kap. 6.2.3) [27], so lag die Ganzpflanze ab der Ernte 2004 bei ca 15 bis 20 € / t<sub>TS</sub>. Dabei hängt der Preis vom NEL-Wert (Netto-Energie-Laktation, d.h. der nutzbaren Energiedichte für Milchkühe), dem organischen Gehalt an der Trockensubstanz und dem Wassergehalt ab. Eine beispielhafte Preisstaffelung zeigt **Tab. 6.2.2-3** [30].

Bemerkenswert an der Aufstellung ist, daß für die BtL-Anlagen interessante Größen wie Trockensubstanzgehalt, Organikmenge und Energiegehalt schon in bisher vorhandenen Verträgen den Preis auf komplexe Weise bestimmen (Anmerk.: Wobei der Energieinhalt bezüglich eines Nahrungsmittels natürlich eine andere Bedeutung hat als bei einer chemischen Anlage). Ferner enthalten traditionelle Verträge auch Pönalen für den Fall der Nichteinhaltung von Lieferverpflichtungen, was für die Kraftstoffherzeugung aus Biomasse sehr wichtig werden dürfte, da die Betriebe ihre Wirtschaftlichkeit nur mit einer hohen Verfügbarkeit darstellen können (s. Kap. 12).

| TS<br>[%] | oTS<br>[%] | Preis <sub>netto</sub> = f (NEL) |                          |         |
|-----------|------------|----------------------------------|--------------------------|---------|
|           |            | 6,0 bis 6,1                      | 6,4 bis 6,5<br>[ € / t ] | ab 7,00 |
| 27        | 86         | 14,01                            | 14,61                    | 15,46   |
| 27        | 91         | 14,85                            | 15,45                    | 16,20   |
| 27        | 97         | 15,85                            | 16,45                    | 17,20   |
| 29        | 86         | 15,39                            | 15,99                    | 16,74   |
| 29        | 91         | 16,31                            | 16,95                    | 17,66   |
| 29        | 97         | 17,42                            | 18,02                    | 18,77   |
| 31        | 86         | 17,21                            | 17,81                    | 18,56   |
| 31        | 91         | 18,24                            | 18,84                    | 19,59   |
| 31        | 97         | 19,47                            | 20,07                    | 20,82   |
| 33        | 86         | 18,17                            | 18,77                    | 19,52   |
| 33        | 91         | 19,24                            | 19,84                    | 20,59   |
| 33        | 97         | 20,49                            | 21,09                    | 21,84   |
| 35        | 86         | 16,84                            | 17,64                    | 18,19   |
| 35        | 91         | 17,85                            | 18,45                    | 19,20   |
| 35        | 97         | 19,05                            | 19,65                    | 20,40   |

TS: Gehalt an Trockensubstanz, oTS: Gehalt in der Trockensubstanz an Organika, NEL: Netto-Energie-Laktation

**Tab. 6.2.2-3:** Beispielhafte Abhängigkeiten aus einem Musterliefervertrag für Mais als Ganzpflanze [30]

### 6.2.3 Trockene Biomassen am Beispiel Getreide (Roggen)

Seitdem günstige Förderbedingungen bei der energetischen Biomassenutzung bestehen, suchen Händler zumindest für die schlechte Erntequalität entsprechende Einsatzmöglichkeiten. Eine energetische Nutzung in großem Maßstab stößt in der Gesellschaft auf ethische Bedenken. Ferner bestehen bei der Getreidekorn- und Strohverbrennung noch technische und genehmigungsrechtliche Probleme. **Abb. 6.2.3-1** zeigt die Entwicklung von Erzeugerpreisen des nahrungsmittelherstellenden Gewerbes.

Deutlich zu erkennen ist, daß die Erzeugerpreise für Getreideprodukte sich in den letzten zehn Jahren kaum verändert haben. Ursache ist die trotz aller Regulierungsversuche der EU immer noch vorhandene Existenz von Überkapazitäten, welche durch landwirtschaftlich orientierte neue Beitrittsländer wie Polen und Rumänien nicht vermindert werden dürfte.

Einen Schritt in Richtung einer Nutzung von Roggen als Energieträger verwirklichte z.B. die Fa. SÜDZUCKER mit der Errichtung einer Ethanolfabrik im thüringischen Zeitz mit einer Inputkapazität von ca 700.000 jato.





1995 = 100

**Abb. 6.2.3-1:** Indizes für Erzeugerpreise für gewerbliche Produkte des herstellenden Nahrungsmittelgewerbes [27]

Bei der Preisfindung ist in Deutschland zu beachten, daß die Verschiffung oder Verarbeitung von Getreide v.a. in der Küstenregion der Nordsee erfolgt. Landwirte aus Südostniedersachsen erzielen wegen der hohen Transportkosten so die niedrigsten Erlöse [31].

Die erhaltenen Preise des Roggens schwanken für die Landwirte wie für andere Getreidesorten auch (s. Kap. 6.2.1). Im Unterschied zur Produktion von Maissilage wird beim Roggen das gedroschene Korn gehandelt. Sein TS-Gehalt liegt bei 85 bis 90 %. Wie beim Mais beinhalten die Verträge i.d.R. eine Bonus-/Mali-Regelung bei Unter- oder Überschreiten eines festgelegten Durchschnittswertes.

Interessant aus Sicht eines BtL-Anlagenbetreibers sind Regelungen, wonach dem Erzeuger im Falle einer Lagerung Vergütungen (z.B. in der Größenordnung 0,10 € pro Monat und Tonne) und Kosten für das Ein- und Auslagern (in der Größenordnung von 5 € pro Tonne) zufließen. Pönalen für die Nichteinhaltung von Lieferverpflichtungen sind wie beim Mais üblich [32].

## 6.2.4 Energiepflanzen

Die derzeit wichtigsten Energiepflanzen in Deutschland sind der Raps für die Produktion von Biodiesel (RME), verschiedene Getreidearten für die Ethanolherzeugung sowie der Mais als Substrat für Biogasanlagen. Einige der speziell in den neunziger Jahren untersuchten Rohstoffe für die Festbrennstoffnutzung, wie Miscanthus oder Pappeln/Weiden aus landwirtschaftlichen Kurzumtriebsplantagen, konnten sich bisher nicht durchsetzen.

Um den wachsenden Bedarf an Substraten für Biogasanlagen sowie die künftig erwartete Nachfrage nach Rohstoffen für die BtL-Produktion decken zu können, wurden in jüngster Zeit in Deutschland verschiedene größere Forschungsprojekte zum Anbau sowie zur Züchtung von Energiepflanzen gestartet. Untersucht werden dabei z.B. der Ertrag bei verschiedenen Bodenqualitäten, Dünger-, Insektizid- und Wasserbedarf, Ernte- und Aufbereitungstechniken und dergleichen mehr [z.B. 4,5].

Für die BtL-Produktion wird vor allem die Ganzpflanzennutzung diskutiert. Die Ganzpflanzennutzung verspricht gegenüber der derzeit am Markt befindlichen Generation biogener Kraftstoffe, bei der lediglich die ölhaltige Rapssaat oder das stärkehaltige Korn genutzt wird, erhebliche Vorteile hinsichtlich der Flächeneffizienz. Auf der anderen Seite sind bei der thermischen Nutzung von Ganzpflanzen nicht unerhebliche Probleme hinsichtlich verbrennungsrelevanter Störstoffe verbunden. In den resultierenden Aschen fallen Schwefel- und Chlorverbindungen sowie Erd-, Alkalimetalle und Schwermetalle an. Die für die Ganzpflanzenproduktion eingesetzten Nährstoffe gehen für die Landwirtschaft entweder vollständig verloren (gilt vor allem für Stickstoff), oder können nur über schadstoffarme Aschefractionen auf die Flächen zurückgeführt werden, wobei hierfür derzeit noch keine ausreichenden Rahmenbedingungen (Düngemittelverordnung usw.) existieren. Die daraus für den BtL-Anlagenbetreiber resultierenden technischen und finanziellen Auswirkungen sind in Kap. 7, 8 und 12 behandelt.

Erste Lösungsansätze, den aus Sicht des BtL-Produzenten problematischen „Schadstoffanteil“ zu reduzieren und Nährstoffkreisläufe in der Landwirtschaft zu schließen, bietet das Zweikultur-Nutzungskonzept [3]. Idee des Verfahrens ist es, auf der gleichen Ackerfläche nacheinander mindestens zwei Früchte pro Jahr anzubauen, zu ernten und aufzubereiten. Energetisch genutzt werden dabei primär Ganzpflanzen, die deutlich vor der Abreife geerntet werden, wodurch Vegetationszeit für eine Zweitkultur gewonnen wird. Dabei wird entsprechend der Nutzungsrichtung von vergleichsweise geringeren Qualitätsanforderungen ausgegangen. Praktisch bedeutet dies beispielsweise, daß gewisse Anteile an Ackerwildpflanzen (früher „Unkräuter“) nicht nur toleriert werden, sondern gar als erntewürdiger Wertstoff angesehen werden können.

Das feucht geerntete und im Regelfall als Silage zwischengelagerte Material wird anschließend mechanisch entwässert. Die Entwässerung mit einer speziellen Presse schafft zwei Fraktionen:

1. den Preßsaft mit Pflanzenbestandteilen wie Stärke, Zucker, Eiweiß, Öle sowie den löslichen mineralischen Bestandteile [33] und
2. den Brennstoff mit einem Wassergehalt von z.Z. 55 % (an einer weiteren technischen Verfahrensoptimierung wird derzeit gearbeitet), der über die Nutzung von z.B. Biogasabwärme weitergehend getrocknet wird.

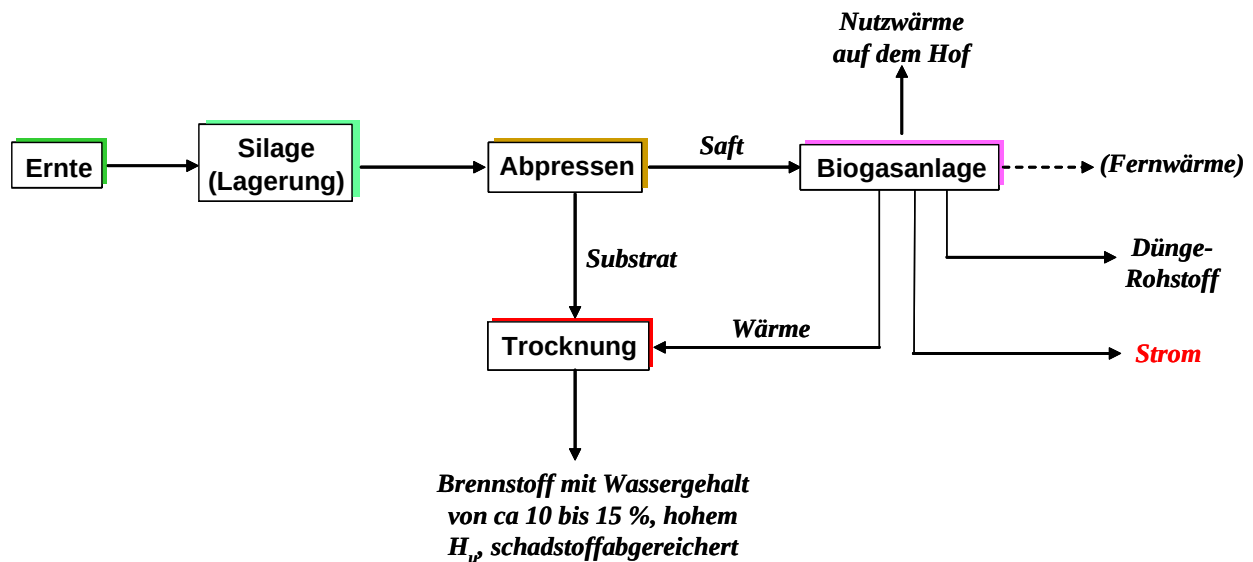
Da der Preßsaft keine die Bakterien störenden Holzbestandteile mehr enthält, besteht die Chance einer wesentlich schnelleren Vergärung → *Verminderung der Baugrößen des Fermenters*. Der Landwirt erzielt aus seinen Pflanzen auf zweifache Weise Erlös:

- I. Durch den Stromverkauf aus der Biogasanlage auf dem eigenen Hof und
- II. den Verkauf des Brennstoffes.

Durch die langjährig garantierten Stromerlöse sowie die zu erwartenden langfristigen Lieferverträge für den Brennstoff besteht somit doppelter Vorteil:

- a) Wertschöpfung aus Ernteprodukten auf dem eigenen Hof und
- b) langfristige Planungssicherheit.

Das Grundfließbild des Konzeptes zeigt **Abb. 6.2.4-1**.



**Abb. 6.2.4-1:** Idee und Grundfließbild des Zwei-Kultur-Nutzungskonzeptes [3,29]

Für die Nutzer des Brennstoffes von besonderem Interesse sind erste Ergebnisse zu der mit der Entwässerung verbundenen Schadstoffabreicherung: So zeigte sich bei Chlor und Kalium eine Reduktion um bis zu 72 % und bei Schwefel um bis zu 30 % gegenüber der ursprünglichen Trockensubstanz. Der Aschegehalt im Festbrennstoff sank um ca. 40 % [29,34]. Exakte Werte als Funktion der Pflanzenart sind in [34] aufgeführt.

Für BtL-Anlagen mit Wirbelschichttechnik ist bemerkenswert, daß Ergebnisse zum Ascheschmelzverhalten abgepreßter Silagen Erweichungstemperaturen von z.T. weit oberhalb 1000 °C ergaben. Bisherigen Arbeiten zu diesem Verfahren deuten interessante Möglichkeit an, mit der Wahl der Pflanzenarten und der Herstellung von Gemischen aus den entwässerten Silagen den Ascheschmelzpunkt auf das betreiberspezifisch gewünschte (Mindest-) Niveau verschieben zu können.

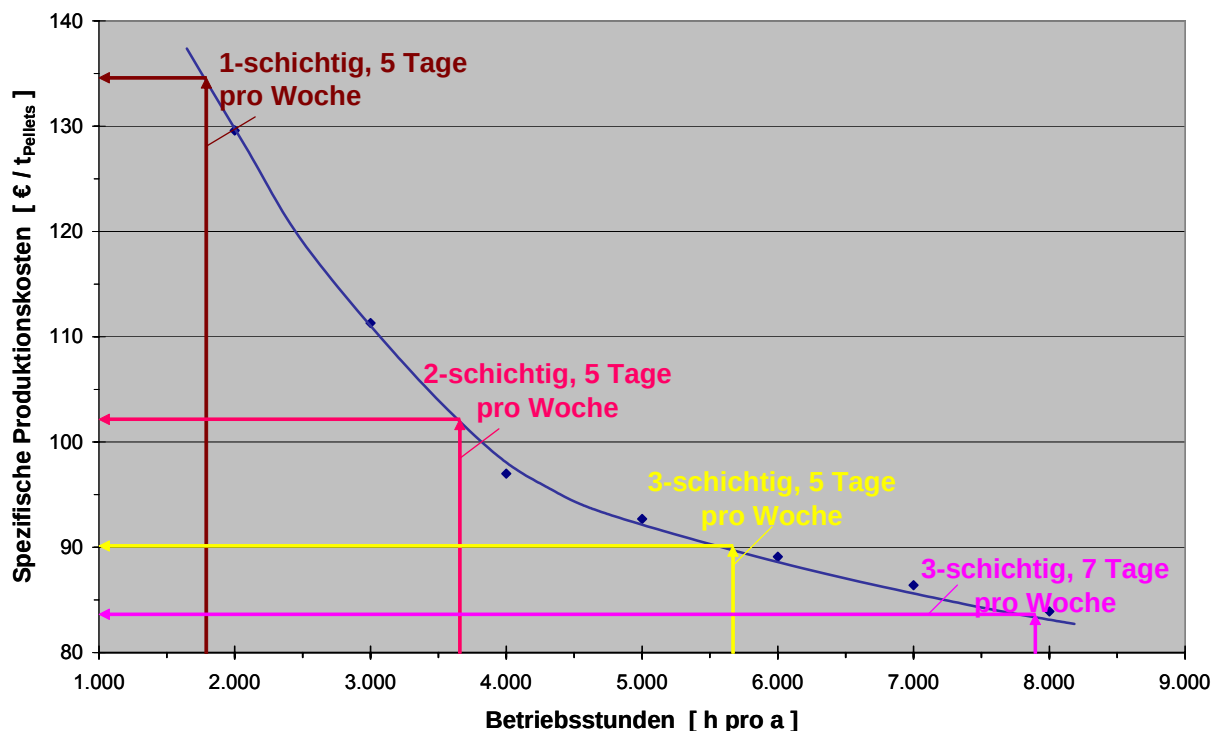
## 6.2.5 Kompostwerke

Als Input für BtL-Anlagen kommen auch Reste oder Fraktionen mit niedrigem Erlös aus Kompostwerken in Frage. Eine entsprechende Erhebung, welche Mengenpotenziale (generell und als Funktion der technischen Ausstattung der einzelnen Kompostwerke), Eigenschaften der Biomasse u.ä. darstellt, führte Prof. Doedens in seiner Studie *Dezentrale Biomassebereitstellung aus Bio- und Grünabfällen in Niedersachsen für die SunFuel-Produktion* durch. Die Arbeit bildete ein Querschnittsprojekt der Länderkooperation Niedersachsen/Brandenburg/Hessen/Volkswagen AG. (Anmerk.: Ein Download des Abschlußberichtes ist unter <http://www.sunfuel.de> möglich.)

## 6.2.6 Lagerung, Transport und Aufbereitung

Die traditionelle Lagerung von Biomasse aus der Landwirtschaft unterscheidet zwischen trockenen Materialien mit einem TS-Gehalt  $\geq 85$  Gew.-%, welche vorzugsweise in Silos untergebracht werden, und feuchten Stoffen mit einem TS-Gehalt von  $28 \leq X \leq 34$  Gew.-%, welche per Silage ganzjährig verfügbar gemacht werden. Eine neue Form der Aufbereitung feuchter Biomasse ist mit dem Zwei-Kulturen-Konzept in Kap. 6.2.4 beschrieben; weitere technische Entwicklungen sind von der *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe* beabsichtigt. Das Thema ist komplex, aber die Chancen für die Landwirtschaft zur besseren Wertschöpfung hoch. Eine ausführliche Behandlung in der vorliegenden Studie würde den Rahmen sprengen. Behandelt werden soll aber ein wichtiger betriebswirtschaftlicher Aspekt:

Für BtL-Produzenten stellt der Transport der Biomasse eine wichtige Frage dar. Besonders unter dem Gesichtspunkt der beiden physikalischen Größen *Wassergehalt* (Wasser ist kein Wertprodukt und muß kostentreibend transportiert werden) und *Dichte* (s. Kap. 9.1, Tab. 9.1-1). Die Transportform Pellet stellt wegen ihres geringen Wassergehaltes von ca 8 bis 14 % und ihrer hohen Schüttdichte die Idealform dar. Leider sind die Herstellungskosten bisher sehr hoch. In den Berechnungen in [35] ergaben sich Produktionskosten von 48,5 bis 62,4 €/t für Anlagen mit Trocknung und 24,5 bis 38,2 €/t für Anlagen ohne Trocknung (beides ohne Rohstoffkosten). Ein wichtiger Parameter ist der Durchsatz der Pelletieranlage. Mit hoher Auslastung können die Produktionskosten stark sinken (s. **Abb. 6.2.6-1**).



**Abb. 6.2.6-1:** Abhängigkeit der Produktionskosten von den jährlichen Betriebsstunden (einschl. Rohstoffkosten) [35]

Die exemplarische Berechnung zeigt eine deutliche Degression mit steigender Auslastung.

Für BtL-Anlagenbetreiber sind die Abhängigkeit der Pellet-Produktionskosten von den Personalkosten und der Auslastung von besonderem Interesse. Es bieten sich folgende Möglichkeiten:

- a) *Personalkosten:* Durch Betreiberschaft verschiedener eigener Pellet-Produktionsanlagen Synergien in Betrieb (z.B. durch maximale Automatisierung und Überwachung von einer Zentralstelle wie der BtL-Anlage, gemeinsame Verwaltung, gemeinsamer Einkauf, gemeinsame Lagerungskonzepte (s. auch Abb. 6.2.1-3 *Preisschwankungen...*)) und bei Reparatur und Instandhaltung (zentrale Service-Trupps) aufzubauen.
- b) *Hohe Betriebsstundenzahl:* Die BtL-Anlage stellt mit einer zu erwartenden Betriebsstundenzahl von 7.500 bis 8.300 Bh/a einen zuverlässigen Abnehmer dar.

Geringere Chancen zur Beeinflussung der Trocknungskosten durch Low-Price-Energy dürften wegen des aus der Fernwärmewirtschaft bekannten Umstands bestehen, daß der Transport von Wärme über mehr als ein paar Kilometer nach derzeitigen Rahmenbedingungen in Invest und Betrieb unvertretbar unwirtschaftlich wird.

In der Praxis sind später neben der Transportform Pellet auch andere Formen wie Briketts, Ballen oder Hackschnitzel zu prüfen. Bei geringen Entfernungen werden die Transportkosten für wasserhaltige Materialien mit geringen Schüttvolumina die Produktionskosten von Pellets oder Briketts unterschreiten.

## 7. Schmelzpunkte von Aschen aus Pflanzen

Für Auswahl und Konstruktion der zur Diskussion stehenden Apparate spielen die Schmelzpunkte der Aschen aus der thermischen Zersetzung der Pflanzen eine große Rolle. In einigen Verfahren sollte der Schmelzpunkt einen minimalen Wert nicht unterschreiten (z.B. Wirbelschichten); in anderen dagegen sollte ein Schmelzpunkt nicht überschritten werden (z.B. Flugstromvergaser mit Kühlturm). Auf die Aufgabenstellung bezogen herauszufinden ist, wo Restriktionen bestehen und als Anforderungen an die Biomasselieferanten weiterzugeben sind oder ob technische Lösungsmöglichkeiten bestehen, die mit einem gewissen Kostenaufwand zu berücksichtigen sind.

Aus der Praxis schon bekannt ist, daß die Schlackebildung in Stroh- und Energiekornverbrennungen durch geringe Mengen an Branntkalk in der Größenordnung von 1 bis 2 % stark verringert werden kann [35]. Nicht genau bekannt ist, wie die zulässigen Betriebstemperaturen durch verschiedene und besonders zukünftige Energiepflanzen beeinflusst werden bzw. beeinflusst werden sollten. Zu fragen ist, ob hinsichtlich der Düngermenge oder -zusammensetzung besondere Anforderungen bestehen.

Hauptbestandteil der meisten Aschen von Biomassen ist Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ . Der Schmelzpunkt kristallinen  $\text{SiO}_2$  liegt (abhängig von der messenden Quelle) zwischen 1.713 und 1.727 °C.

Mischungen mit anderen Stoffen beeinflussen den Schwerpunkt signifikant. Bei Pflanzen sind die Gruppen • Alkalimetalle

- Erdalkalimetalle
- Phosphor

zu nennen. Chlor, Schwefel und Stickstoff gehen in Form verschiedener Verbindungen in die Gasphase über. Kohlenstoff geht erst bei Temperaturen und Drücken oberhalb der zur Diskussion stehenden Verfahren Reaktionen mit Silizium ein.

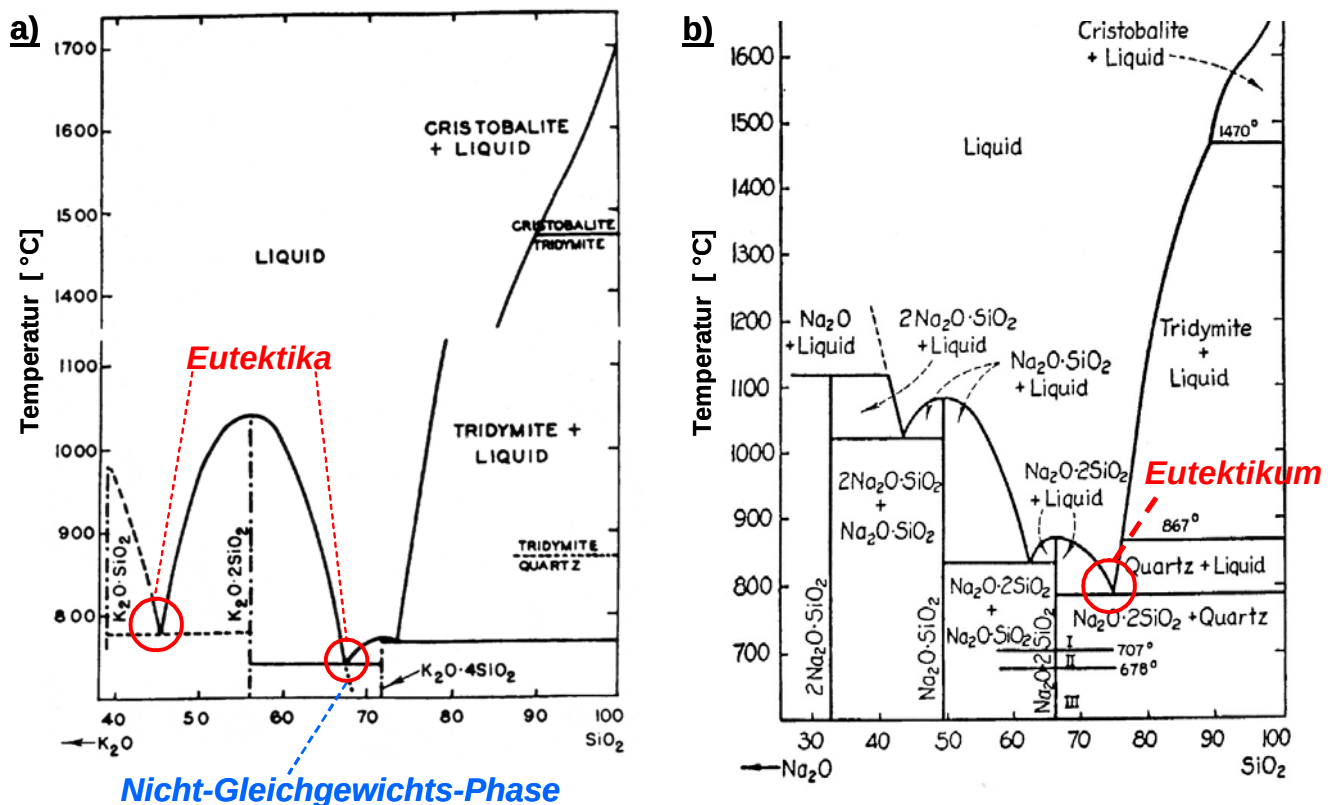
Neben den chemischen Gesichtspunkten aufgrund von Gleichgewichtsbetrachtungen sind ferner Überlegungen zu dem Umstand anzustellen, daß unterschiedliche Berichte über die Verhaltensweisen von Strohaschen existieren, wenn die Autoren verschiedene Apparate verwenden [36,37]. In Kap. 7.2 soll ein Blick auf die Entstehungsgeschichte von Aschebrocken geworfen werden.



## 7.1 Chemische Betrachtungen

### Alkalimetalle

In der Mischung mit Alkalimetallen sinkt der Schmelzpunkt des reinen  $\text{SiO}_2$  ab. Besonders niedrige Werte werden an den sog. eutektischen Punkten erreicht. In Gleichgewichtsdiagrammen liegen diese ausgezeichneten Minima bei definierten Zusammensetzungen (s. **Abb. 7.1-1**).



**Abb. 7.1-1:** Gleichgewichtsdiagramme der Zweistoffsysteme a)  $\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$  und b)  $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ .  
[38,39]

Wie zu sehen ist, kann der Schmelzpunkt im Natrium-System am eutektischen Punkt bei ca 800 °C liegen; im Kalium-System minimal bei ca 730 °C. Abb. 7.1-1a) zeigt auch einen Umstand, welcher in Prozessen der thermischen Zersetzung von Biomassen besonders zu beachten ist: Im Ungleichgewichtszustand kann der Schmelzpunkt weiter sinken. Im Falle von kalium-basierten Systemen sind, bei entsprechender Zusammensetzung, Schmelzpunkte im Bereich von 600 °C möglich.

### Erdalkalimetalle

In dieser Gruppe sind die Elemente Kalzium und Magnesium in der Praxis bedeutend. In binären Mischungen mit  $\text{SiO}_2$  und als Oxide betrachtet liegen die Eutektika bei Temperaturen von oberhalb 1.400 °C (s. **Abb. 7.1-2**).

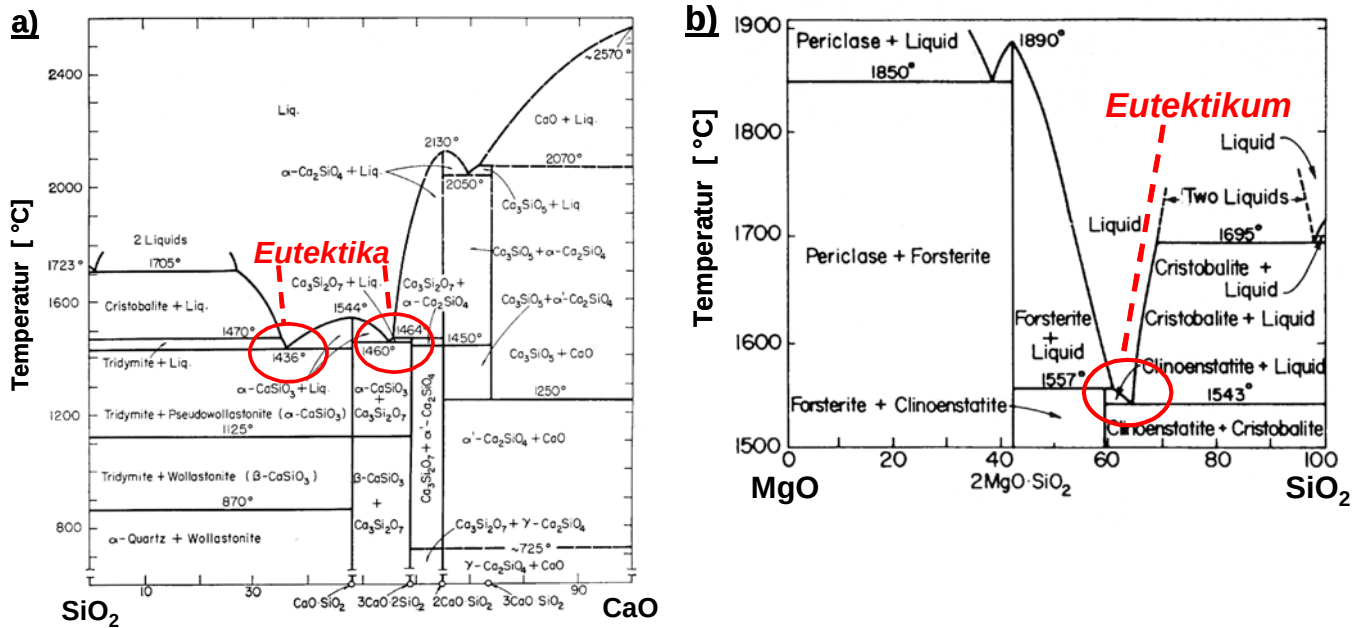


Abb. 7.1-2: Gleichgewichtsdiagramme der Zweistoffsysteme a) CaO / SiO<sub>2</sub> und b) MgO / SiO<sub>2</sub> [40,41].

Die Schmelzpunkterhebung lässt sich nutzen, um in ternären Systemen die Einstellung der Flüssigkeitspunkte zu beeinflussen (s. Abb. 7.1-3).

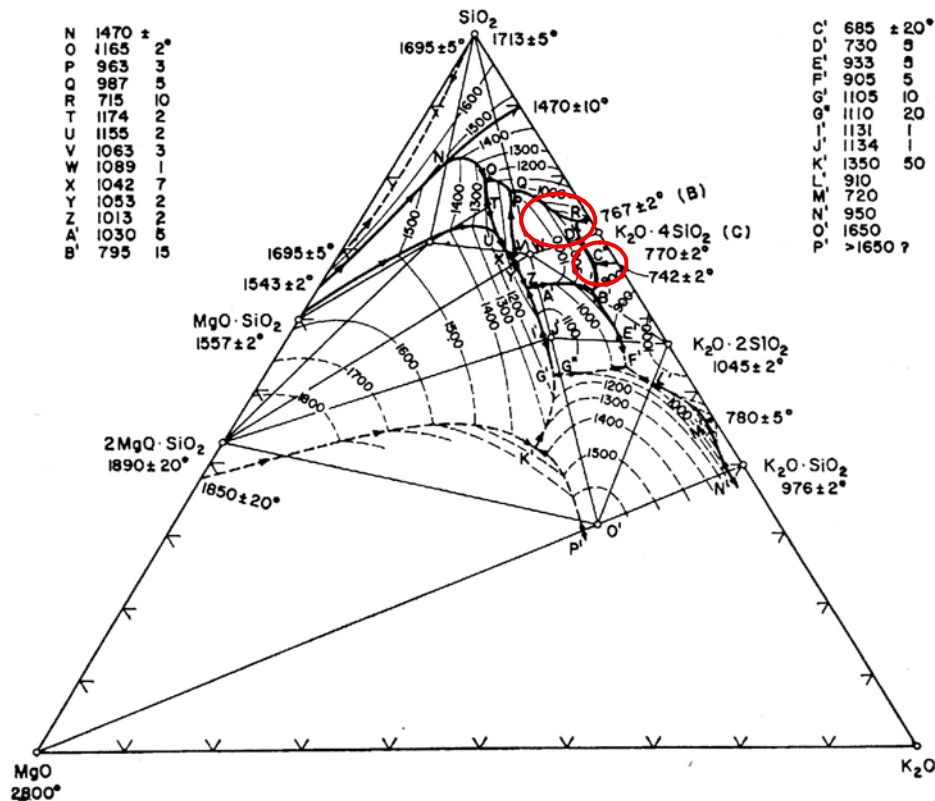
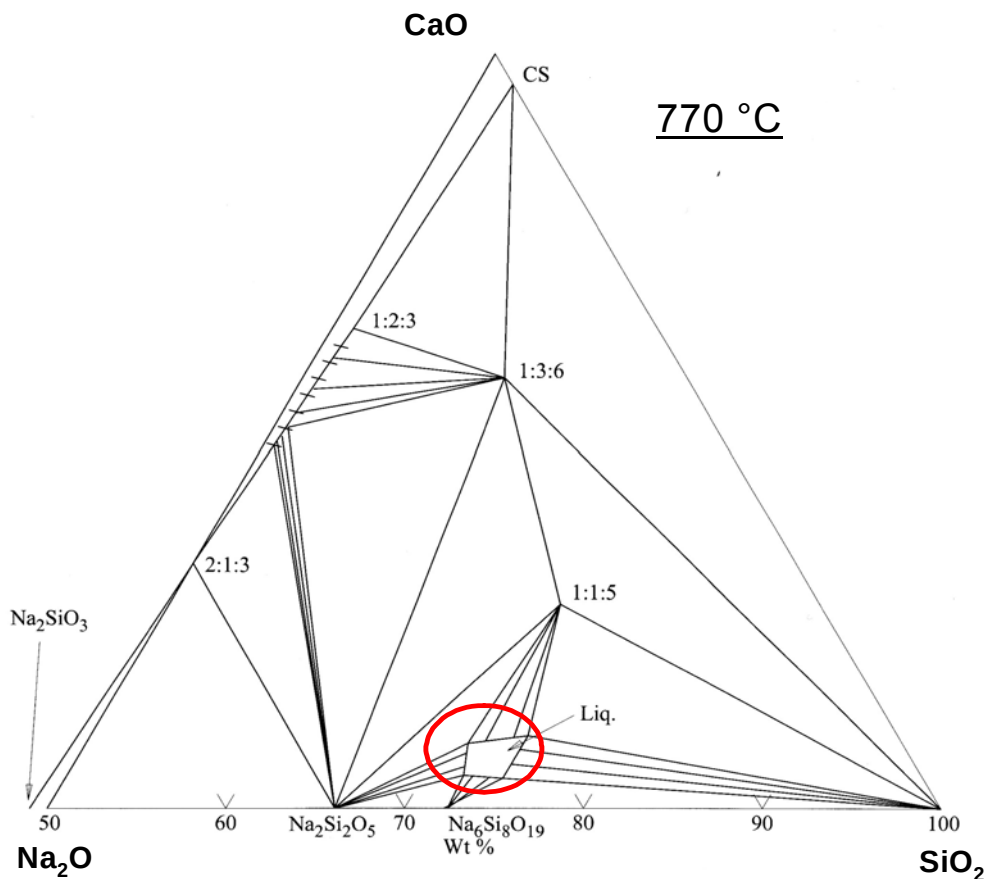


Abb. 7.1-3: Ternäres System MgO / K<sub>2</sub>O / SiO<sub>2</sub> [42]

Wie an den rot eingekreisten Punkten bei den Phasenpunkten  $767 \pm 2$  und  $742 \pm 2^\circ\text{C}$  des binären Systems  $\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$  zu erkennen ist, beeinflussen geringe Zugaben von  $\text{MgO}$  im einstelligen Prozentbereich die Phasenausbildung als Funktion der Temperatur sehr stark. Diese Chance für kommerzielle Anlagen zur Beeinflussung der Schmelzpunkte birgt immer noch die Gefahr, daß bei bestimmten Zusammensetzungen im Bereich niedriger Erdalkaligehalte unter ca 10 Gew.-% sich Bereiche mit flüssigen Phasen ausbilden (s. **Abb. 7.1-4**).



**Abb. 7.1-4:** Ternäres System  $\text{Na}_2\text{O} / \text{CaO} / \text{SiO}_2$  bei  $770^\circ\text{C}$  [43]

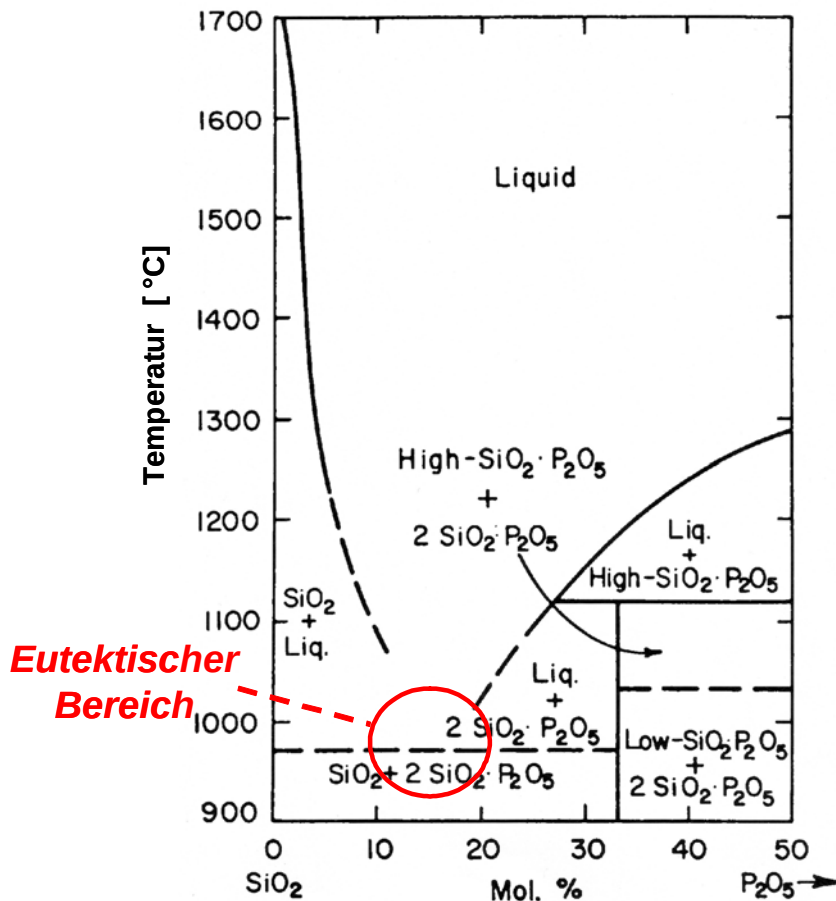
Technisch gesehen bedeutet dies, daß

- unerwünschte Aschezusammensetzungen über das Brennstoffmenü vermieden werden sollten und
- auf eine gute Durchmischung zu achten ist, um nicht zufällige oder temporär ungünstige Zustände zu erreichen.

## Phosphor

Im Pflanzenwachstum wird Phosphor benötigt. Die Vorkommen des Elementes auf der Erde sind begrenzt und es ist anzustreben, den Stoff im Nährstoffkreislauf zu halten.

Vom Schmelzpunkt-Verhalten liegt es zwischen den Gruppen Erd- und Alkalimetallen ( s. **Abb. 7.1-5**).



**Abb. 7.1-5:** Binäres System  $\text{P}_2\text{O}_5$  /  $\text{SiO}_2$  bei 770  $^{\circ}\text{C}$  [44]

Aus Betriebsberichten der Verbrennung von Tiermehl, welches einen hohen Phosphorgehalt besitzt, in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen ist bekannt, daß die Asche auf den Gewebefiltern ein klebriges Verhalten besitzt und spezielle Abreinigungsparameter erfordert. Von Problemen im Feuerraum selber ist nichts bekannt.

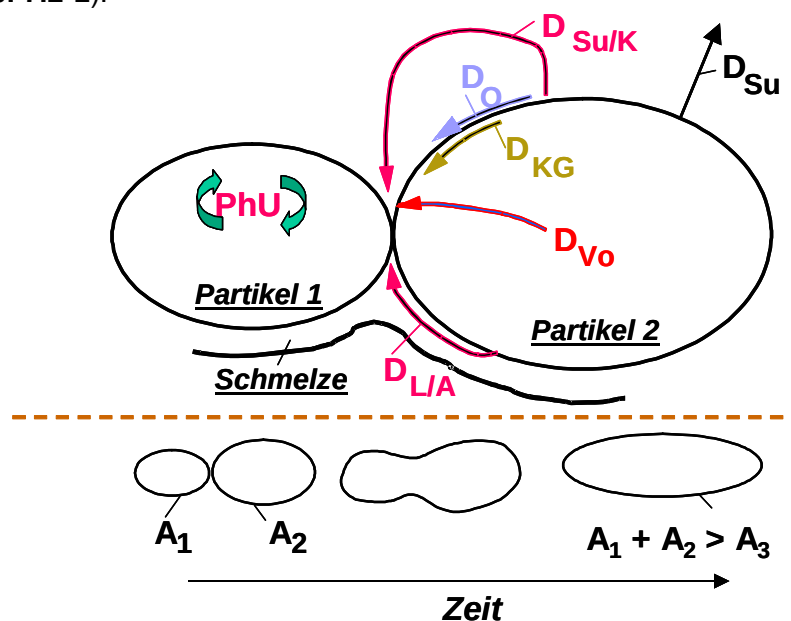
*Abschlußbemerkung:* Die gezeigten Diagramme wurden unter Prüfbedingungen mit Normalatmosphäre aufgenommen. Bei der Vergasung ist zwar auch Sauerstoff im Input bzw. als Vergasungsmittel vorhanden; die Kurven und Zahlenwerte aber können im Anlagenbetrieb anders aussehen. Grundsätzliche Veränderungen der Zusammenhänge sind nicht zu erwarten.

## 7.2 Entstehung von Ascheclumpen

Autoren mit Strohverbrennungen in Festbetten berichten über Verklumpungen der Aschen bei Strohverbrennung trotz Zusatz von Branntkalk [35]; in Wirbelschichten dagegen kann ein feinkörniges Bett erhalten bleiben [36]. Somit gibt es Anhaltspunkte, daß nicht nur das

chemische Verhalten, sondern auch die Apparatechnik eine wichtige Rolle spielen. Speziell die Relativbewegung der Partikel zueinander. Kann diese Beobachtung wissenschaftlich zuverlässig erklärt werden, um daraus Verhaltensweisen für die Praxis abzuleiten?

In der keramischen und in der Stahlindustrie ist ein gängiger und viel untersuchter Prozess zur Partikelvergrößerung die sog. *Sinterung*. Unter Sinterung versteht man eine Wärmebehandlung, bei der aus losen, nur durch physikalische Anziehungskräfte gebundener Einzelteilchen ein zusammenhängender Festkörper wird. Im ersten Stadium koppeln die Partikel über Schmelzphasen oder Feststoffbrücken (z.B. bei keramischen Grünlingen ohne Schmelzphase) an (s. **Abb. 7.2-1**).



PhU: Phasenumwandlung,  $D_{L/A}$ : Diffusion über Lösung + Ausfällung,  $D_{Su/K}$ : Diffusion über Sublimation + Kondensation;  $D_{Vo}$ : Volumendiffusion,  $D_O$ : Oberflächendiffusion

**Abb. 7.2-1:** Transportwege zur Partikelvergrößerung [45]

Da an den Korngrenzen die Kristallgitter i.d.R. gestört sind und andere chemische Zusammensetzungen als das Kornvolumen aufweisen (Anmerk.: z.B. weil große Atome sich besser ausdehnen können), kann es zu Schmelzen an der Korngrenzenoberfläche kommen, obwohl die Gleichgewichtsdiagramme den Zustand nicht voraussagen. Fühlbar wird diese Erscheinung besonders bei feinkörnigen Partikeln im Mikrometer-Bereich, in denen das Oberflächen- zu Volumen-Verhältnis hoch ist.

Treibende Kraft beim Sintern ist die Verminderung der Freien Enthalpie des Systems. Sie hängt von den spezifischen Oberflächenenergien sowie den Partikeldurchmessern ab:

$$\delta G_{\text{Sys}} = \delta \int_{A_{FG}} \gamma_{FG} dA_{FG} + \delta \int_{A_{FF}} \gamma_{FF} dA_{FF} \quad (1)$$

$G_{\text{sys}}$ : Freie Enthalpie des Systems,  $\gamma_{FG}$ : spez. Oberflächenenergie an der Phasengrenze fest/gas,  $\gamma_{FF}$ : spez. Korngrenzenkontaktenergie,  $A_{FG}$ : Phasengrenzfläche fest/gas,  $A_{FF}$ : Korngrenzenfläche.

Auch in dieser Betrachtungsweise ist die treibende Kraft zur Vergr#246;berung umgekehrt proportional dem Korndurchmesser.

Messungen von Aschezusammensetzungen zeigen, da#223; bei einigen Biomassen (z.B. Hackgutsp#228;nen) die Erdalkaligehalte so hoch sind, da#223; lokale oder an den Korngrenzen vorhandene Abweichungen kaum die Gefahr der Verklumpung beinhalten (s. **Tab. 7.2-1**). Bei Stroh und Getreide-Ganzpflanzen liegt die Summe von Ca- und Mg-Oxiden nur bei ca 11 Gew.% des Aschegehaltes. Damit besteht die Gefahr lokaler Eutektika, wie in Kap. 7.1 gezeigt.

| Erdalkali- u. Alkalimetalle | N#228;hrstoffe                | Rinden- /Hackgut- /<br>Sp#228;ne<br>[ Gew.- % TS ] | Stroh<br>[ Gew.- % TS ] | Getreide- Ganzpflanzen<br>[ Gew.- % TS ] |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
|                             | CaO                           | 41,7                                               | 7,8                     | 7,0                                      |
|                             | MgO                           | 6,0                                                | 4,3                     | 4,2                                      |
|                             | K <sub>2</sub> O              | 6,4                                                | 14,3                    | 14,0                                     |
|                             | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 2,6                                                | 2,2                     | 9,6                                      |
|                             | Na <sub>2</sub> O             | 0,7                                                | 0,4                     | 0,5                                      |

**Tab. 7.2-1:** Erdalkali- u. Alkaligehalte in Aschen verbrannter Biomassen [46]

Einen zuverl#228;ssigen Schutz k#246;nnen bei den kritischen Biomassen Zugaben externer Erdalkali nicht bieten, wenn nicht f#252;r eine gute Durchmischung und ein permanentes Zerschlagen der Fl#252;ssigkeitsbr#252;cken gesorgt wird.

### 7.3 Zusammenfassung

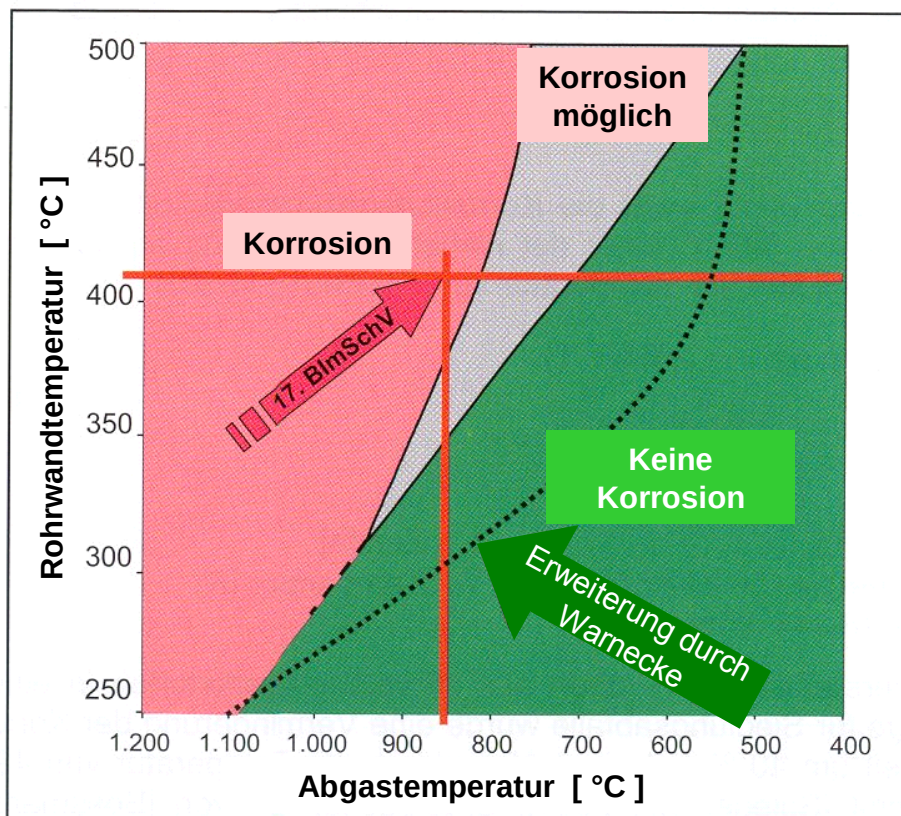
Verbrennungs- und Vergasungsversuche mit Stroh, Getreide oder anderen Nichth#246;lzern f#252;hren oft zu Schmelzen aufgrund niedriger Schmelzpunkte der alkalihaltigen Aschen. Bekannt ist, da#223; durch geringe Mengen an Branntkalk die Chance auf praktikable Zust#228;nde steigt. Gleichgewichtsdiagramme aus der Werkstoffkunde zeigen, da#223; die gef#252;rchteten Eutektika nur bei wenigen Zusammensetzungen existent sind und durch Erdalkali bis zu bestimmten Grenzen umgangen werden k#246;nnen. Ein Gehalt von #252;ber 10 Gew.% an Erdalkalioxid in den Aschen ist empfehlenswert, wenn die Bedingungen der Verbrennung auch f#252;r die Vergasung zugrunde gelegt werden. Falls m#246;glich, sollte bei der D#252;ngung auf die Bevorzugung von Magnesium und Calcium gegen#252;ber Kalium und Natrium geachtet werden, soweit Wahlfreiheit besteht. In der Apparateauslegung zur thermischen Zersetzung der Biomassen mittels Wirbelschichten ist ein geringer Zusatz von Kalzium- oder Magnesiumoxid empfehlenswert. In allen thermischen Aggregaten ist auf eine gute Durchmischung von Biomasse und Asche zu achten, um lokal oder tempor#228;r ung#252;nstige Zust#228;nde zu vermeiden.



## 8. Überlegungen zur Korrosionsgefahr

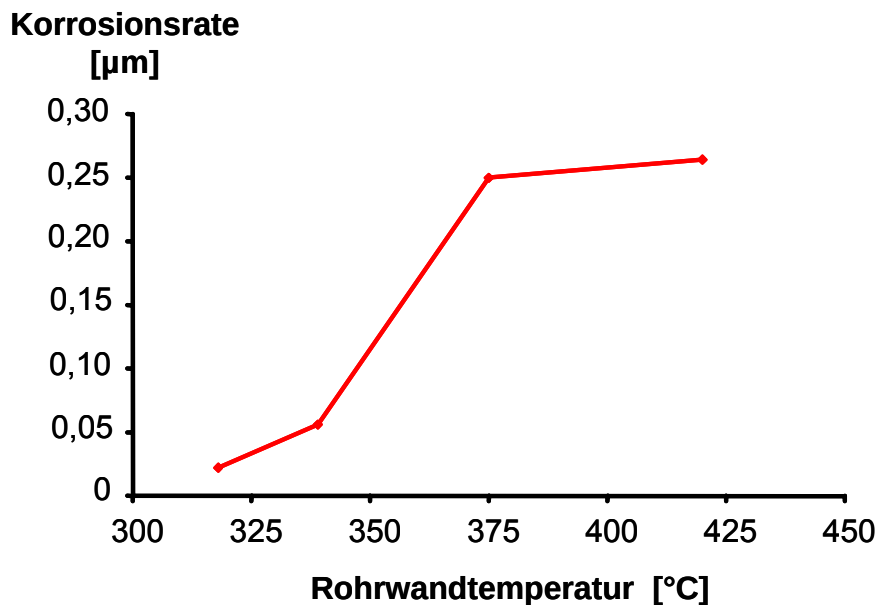
### 8.1 Der Einfluß von Rohrwand- und Gastemperatur

Von kommerziellen Großanlagen zur Verbrennung wie Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen ist bekannt, daß unter bestimmten Verfahrensbedingungen und Brennstoffen eine hohe Korrosionsgefahr an den Wärmetauscherflächen besteht. Besonders chlorhaltige Einsatzmaterialien erfordern besondere Aufmerksamkeit. Die Auswertung von Erfahrungen an Müllverbrennungsanlagen sowie theoretische Betrachtungen führten zum sogenannten *Flingerschen Korrosionsdiagramm* (s. **Abb. 8.1-1**).



**Abb. 8.1-1:** Flingersches Korrosionsdiagramm unter Verbrennungsbedingungen [71]

Auf der Ordinate aufgetragen ist die Rohrwandtemperatur wasser- bzw. dampfführender Rohre; auf der Abszisse die Abgastemperatur. Eingetragen ist die Vorgabe der 17. BImSchV, wonach 2 sec nach der letzten Verbrennungsluftzuführung die oft üblichen Dampfparameter 400 °C/40 bar noch an der Grenze zu hoher Korrosionsgefahr liegen können. Durch Auswertungen und Überlegungen von Warnecke wurde das Gefahrengebiet erweitert. Untersuchungen von Born et al. [71] zeigten, daß die Mechanismen zur Korrosionsauslösung innerhalb eines engen Temperaturstartfensters aktiv werden können (s. **Abb. 8.1-2**). Born zeigte in langjährigen Untersuchungen den Einfluß der Gasatmosphäre auf. Er wies auf die korrosionshemmende Wirkung eines hohen  $\text{SO}_2$ - zu  $\text{HCl}$ -Verhältnisses hin, aber auch auf den Umstand, daß durch die Bindung des Schwefels in  $\text{H}_2\text{S}$  unter Vergasungsbedingungen die Materialschädigung sogar beschleunigt wird [71].



**Abb. 8.1-2:** Empfindlichkeit der Korrosionsrate gegenüber der Rohrwandtemperatur [71]

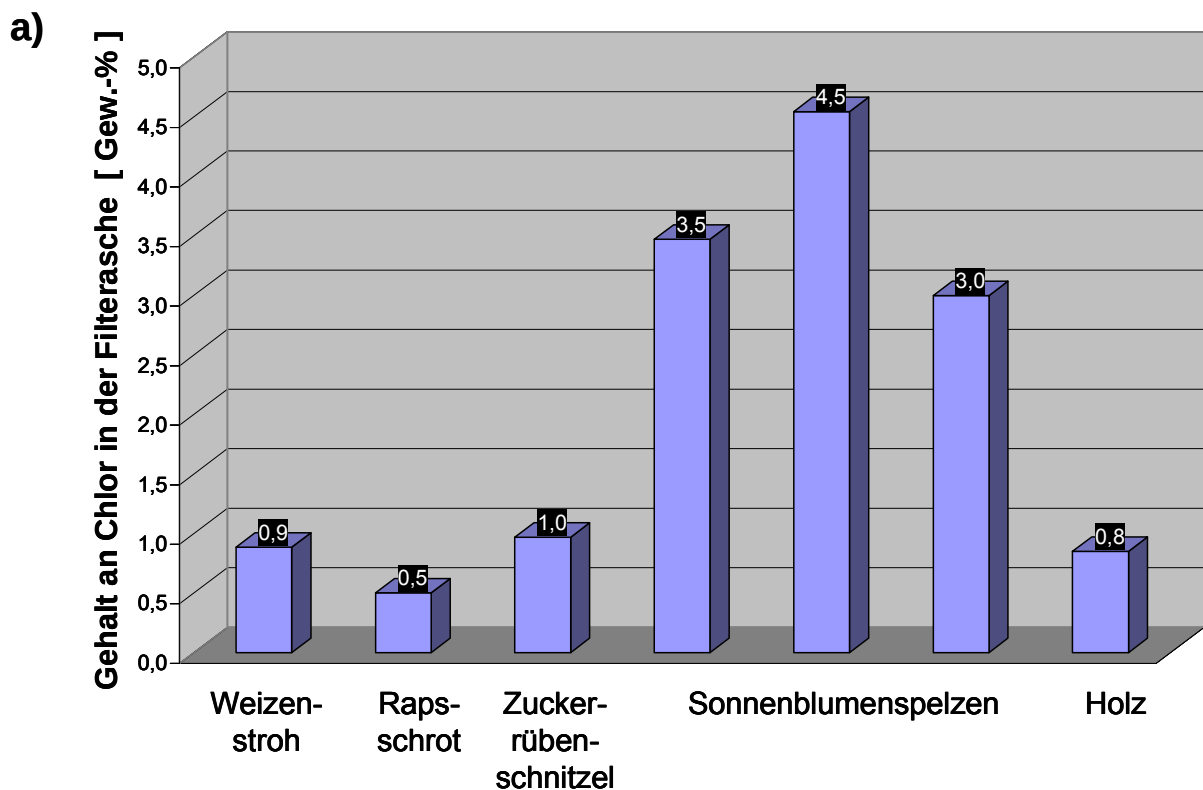
Die Erfahrungen aus den Verbrennungsanlagen sind von den Werten der Verfahrensparameter nicht 1:1 auf den Vergasungsbetrieb anzuwenden (z.B. wegen der anderen Bindungsform des Schwefels). Es besteht aber die große Chance, die grundsätzlichen Zusammenhänge bei der Verfahrensauslegung zu berücksichtigen. Dabei sind zu nennen

1. Wahl von Dampfparametern mit niedrigem Temperatur- und Druckniveau oder
2. angemessene Schaltung von Wärmetauscherflächen (z.B. Verdampfer im Hochtemperaturbereich des Synthesegases, Überhitzer später im Synthesegasweg oder Überhitzung durch Verbrennung anderer Energieträger aus dem Gesamtprozess) oder
3. Auslösung von korrosionshemmenden Sulfatisierungsreaktionen durch Prekursoren oder Additive.

## 8.2 Abfangen von Chlor im Vergasungsraum

In Großanlagen mit zirkulierender Wirbelschicht, Verbrennungsmodus und dem Einsatz chlorhaltiger Stoffe werden verschiedentlich kalziumhaltige Materialien am Ende des Verbrennungsraumes eingesetzt, um den Chlorgehalt im Abgas vor den Wärmetauscherflächen zu reduzieren.

Versuche an der ArtFuel-Anlage im Vergasungsmodus zeigten, daß zumindest im betrachteten Temperaturfenster von 800 bis 900 °C mit Zusatz von Branntkalk das gasförmige Chlor in die Filterasche eingebunden wird. Im Gasstrom liegt der Gehalt nach dem Vergaser unterhalb der Nachweisgrenzen (s. **Abb. 8.2-1**).



b)

| Exp. No.:          | Spurenkomponenten [g/m <sup>3</sup> <sub>N, trocken</sub> ] |      |                  |        |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|------|------------------|--------|
|                    | NH <sub>3</sub>                                             | HCN  | H <sub>2</sub> S | HCl    |
| 0622-1-Weizenstroh | 7.44                                                        | n.m. | 0.27             | <0.005 |
| 0622-2-Rapsschrot  | 61.0                                                        | 6.10 | 0.47             | <0.005 |
| 0622-7-Holz        | 0.27                                                        | n.m. | 0.02             | <0.005 |

**Abb. 8.2-1:** a) Chlorgehalt in der Filterasche bei verschiedenen Biomassen und Experimenten

b) Spurenkomponenten im Abgas nach dem ArtFuel-Vergaser bei verschiedenen Biomassen

### 8.3 Fazit

Aus Befragungen und Veröffentlichungen der vier in dieser Studie betrachteten BtL-Verfahrensentwickler ergab sich, daß Chlor als wesentlicher Förderer der Korrosion keine Gefahr darstellen sollte. Grundlegende Überlegungen zur Wärmeverschlackung (wesentlich bei der Flugstromvergasung) und Ergebnisse zum Einsatz von Branntkalk im Temperaturfenster 800 bis 900 °C (wesentlich bei den Wirbelschichtvarianten) lassen Anlaß zu der Hoffnung, daß auch bei kommerziellen Anlagen die Korrosionsgefahr zumindest durch Chlor beherrschbar ist. Berücksichtigt werden sollte bei der Planung von Großanlagen, daß die Auswirkungen von Materialien wie CO und H<sub>2</sub>S im Langzeitverhalten noch nicht vorhersagbar sind. Hierfür ist die

Sammlung von Erfahrung notwendig. Auf jeden Fall sollten Wärmetauscherflächen von Überhitzern und Verdampfern und der Wasserdampf-Kreislauf so gestaltet werden, daß die Erfahrungen aus der Verbrennungstechnik berücksichtigt und mit einem Sicherheitszuschlag versehen werden.

Eine Anforderung an die Biomasse wäre, daß die Schwefel- oder Chlorgehalte nahe Null sein sollten. Damit ließen sich konstruktive Überlegungen einfach gestalten. Da Betreiber einer BtL-Anlage aber auf einen langen Zeitraum von mindestens 20 Jahren zu schauen haben, muß im Planungsstadium berücksichtigt werden, daß irgendwann im Betrieb schadstoffhaltiger Input (Pflanzen oder Reststoffe) kommen wird. Eine Umgestaltung von Wärmetauscherschaltungen und Wasserdampfkreislauf stellt einen wesentlichen und sehr kostenintensiven Eingriff in die Anlagentechnik dar. Daher ist es einfacher, Chlor und Schwefel im Input bei der Planung von vornherein zu berücksichtigen. Mit dem erhöhten Invest entfällt auch die Notwendigkeit, dem Biomasse-Lieferanten einen Bonus für bestimmte Grenzen für Chlor und Schwefel zu zahlen.

## 9. Verfahren zur BtL-Herstellung

### 9.1 FZK / FUTURE ENERGY

#### Verbundkonzept

Fossile Einsatzmaterialien für Kraftwerke oder Raffinerien werden über große Entfernungen im drei- bis vierstelligen Kilometerbereich transportiert. Biomasse dagegen besitzt aus zwei Gründen einen ökonomischen Transportnachteil:

1. Wassergehalt kann nach der Ernte und evtl. kurzer Lagerung bei 40 bis 60 Gew.-% liegen (Anmerk.: Gilt z.B. nicht für Stroh)
2. Geringe Schüttvolumina (s. **Tab. 9.1-1**).

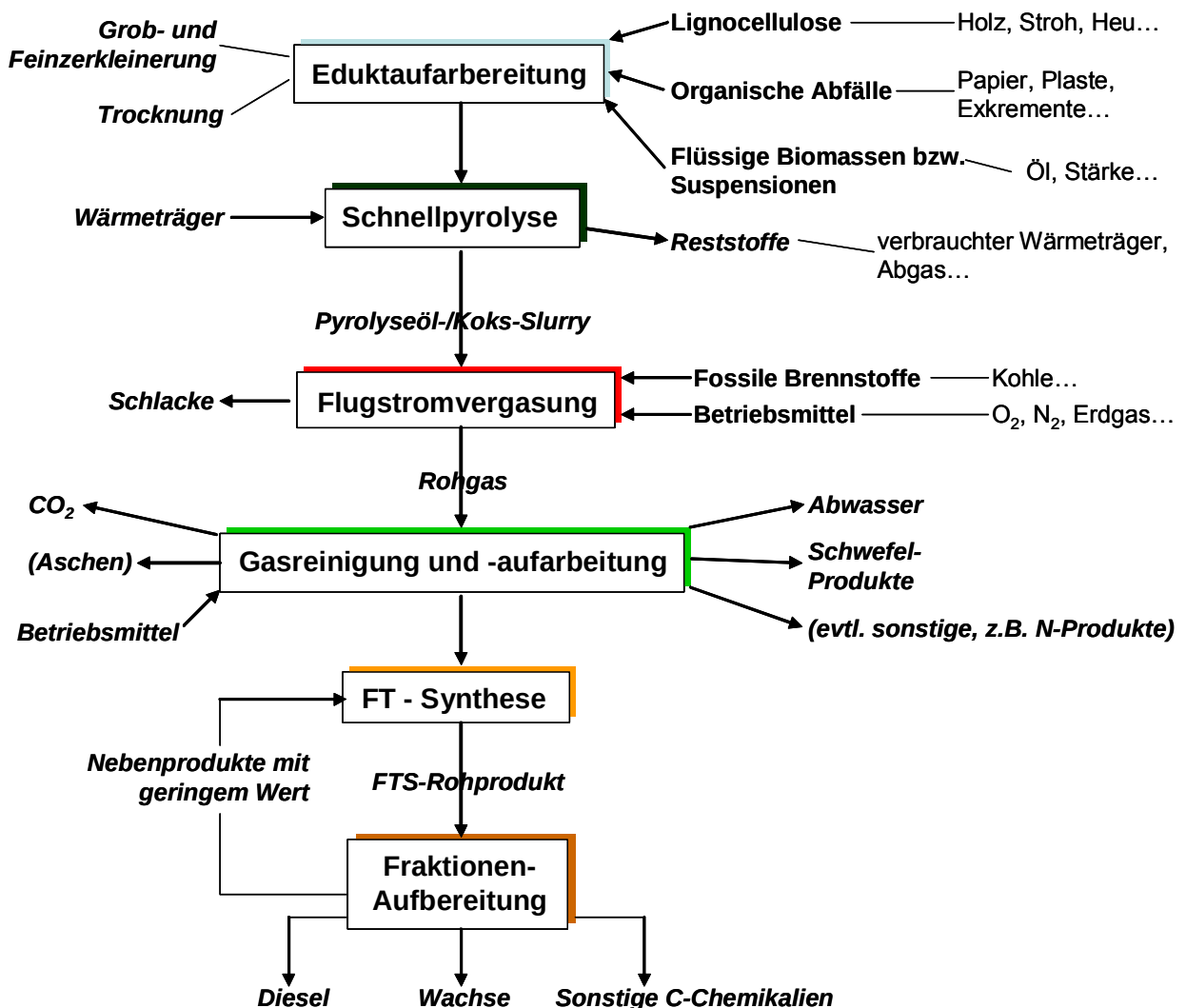
|               |                          | Schüttdichte [ kg / m <sup>3</sup> ] |
|---------------|--------------------------|--------------------------------------|
|               | Braunkohle               | 720-890                              |
|               | Heizöl                   | 860                                  |
| <b>Holz:</b>  | Hackschnitzel            | ≈150                                 |
|               | Pellets                  | ≈ 600                                |
|               | Scheitholz               | 350-450                              |
| <b>Stroh:</b> | HD-Ballen und Rundballen | 80-100                               |
|               | kub. Großballen          | 120-150                              |
|               | Kompaktrollen            | 300-400                              |

**Tab.: 9.1-1:** Beispielhafte Schüttdichten fossiler Brennstoffe und Biomassen [47]

Zu erkennen ist, daß selbst die Schüttdichte von Pellets ca 25 % unterhalb des Wertes von Braunkohle liegt. Andere Formen besitzen noch weit größere Distanzen. Die Kosten liegen entsprechend der geringen Schüttdichte für viele Biomassen in den traditionellen Formen um ein Mehrfaches über dem Preis fossiler Brennstoffe.

An diesem kritischen Punkt setzt das FZK/FUTURE-ENERGY-Konzept an: Durch thermische Zersetzung der Biomasse und Umwandlung in eine heizwertreiche Suspension („Slurry“) läßt sich die Dichte auf bis zu 1.200 kg/m<sup>3</sup> erhöhen. Der Wasseranteil liegt gemäß erster Ergebnisse bei 15 bis 30 Gew.-% [48].

Der Slurry wird in zentrale Großanlagen transportiert, welche die Arbeitsschritte Synthesegas-erzeugung, Gasreinigung und -aufbereitung, FT-Synthese und Produktaufbereitung übernehmen (s. **Abb. 9.1-1**). Empfohlen wird eine Anordnung auf einem Raffineriestandort, welcher den Schritt der Produktaufbereitung im bisherigen Apparatestamm leisten könnte und Möglichkeiten einer optimalen Wärmeverschlusung und Betriebsstoffversorgung bietet.



**Abb. 9.1-1:** Stoffstrom-Grundfließbild des FZK / FUTURE ENERGY-Konzeptes [abgeleitet aus 48,49]

## Schnellpyrolyse

Die Schnellpyrolyse arbeitet mit dem *Lurgi-Ruhrgas* (Abk.: LR)-Reaktor, welcher mit Hilfe einer Doppelschnecke und heißem Wärmeträger die aufbereitete Biomasse in einem sehr kurzen Zeitraum auf ca. 500 °C unter Sauerstoffausschluß aufheizt. Als Wärmeträger war ursprünglich Sand konzipiert; mittlerweile starteten Untersuchungen zu alternativen Materialien. In einer Reaktor-Verweilzeit von ca. 10 sec zersetzt sich die Biomasse in ein Gas (Flüchtige, Wasser, Pyrolysegase) und Koks.

Das Gas wird durch Einspritzung von bereits gekühltem Pyrolyseöl abgekühlt und kondensiert. Das Kondensat läßt sich in einem anschließenden indirekt arbeitenden Wärmetauscher weiter abkühlen. Ein Teil wird zur Einspritzung zurückgeführt; die überwiegende Menge mit dem abgekühlten Koks zum gewünschten Slurry gemischt. Als Voraussetzung muß der Koks nach seinem Austrag aus dem Reaktor in einer Trennstufe vom Wärmeträger separiert und gekühlt werden. Der Wärmeträger, welcher pro Durchgang nur um ca. 50 bis max. 100 °C abkühlt, wird durch Teilverbrennung des nicht kondensierten Pyrolysegases aufgeheizt (**Abb. 9.1-2**).





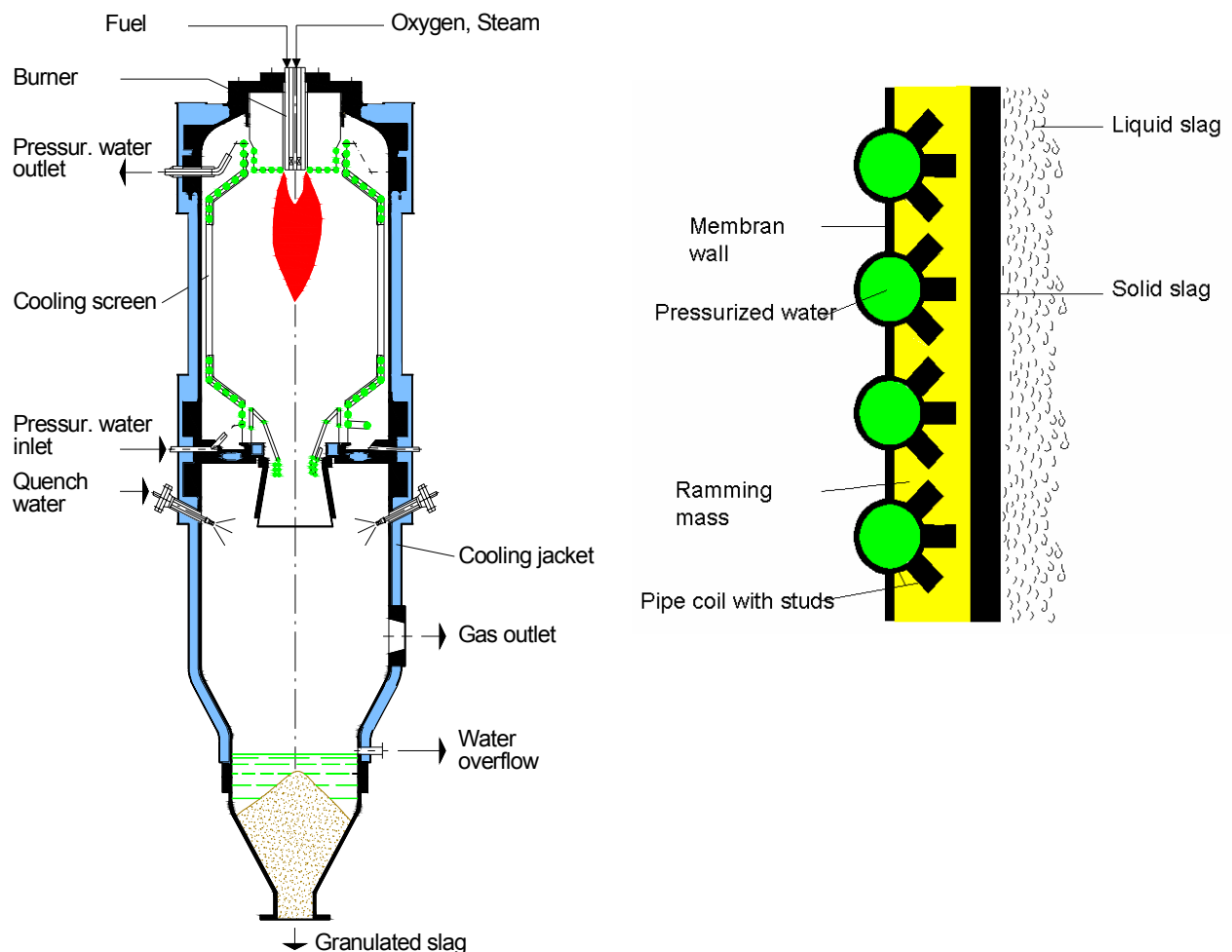
können auf dem Gelände des Anlagenbetreibers erfolgen. Der Input der dezentralen Anlagen l ge bei der genannten thermischen Leistung bei ca **100.000 jato FS** (Annahme:  $\leq 15\%$  Wassergehalt, 7.500 Volllaststunden pro Jahr, Heizwert  $\approx 14,1$  MJ/kg).

### Flugstromvergasung

Die Flugstromvergasung der Fa. FUTURE ENERGY (Abk.: FE) blickt auf eine lange Tradition zurück: Seit dem Jahre 1975, damals noch unter der Schirmherrschaft des *Deutschen Brennstoffinstitutes Freiberg*, sammelte man Erfahrungen mit der Verarbeitung verschiedener Stoffe. Ursprünglich konzipiert für die Nutzung von ballastreicher Braunkohle sind in den letzten 30 Jahren insgesamt 42 verschiedene Braunkohlen, 15 Steinkohlen, Petrolkoks, Flugaschen, kommunale und industrielle Klärschlämme, Hausmüll, Abfall l, Holz, Stroh und anderes mehr untersucht worden. Das entwickelte Verfahren wird unter dem Namen GSP-Verfahren weltweit vermarktet [50].

Für die Vergasung stehen grundsätzlich zwei Typen zur Verfügung [51]:

1. Einsatzstoffe mit einem Aschegehalt kleiner 1 Gew.-%: Flugstromvergaser mit Kühlwand
2. Einsatzstoffe mit einem Mindestaschegehalt von 1 Gew.-%: Flugstromvergaser mit Kühlschirm (s. **Abb. 9.1-3**).



**Abb. 9.1-3:** links: Apparateflie bild des Flugstromvergasers mit Kühlschirm; rechts: Funktionsweise des K hlschirmes [49]

Reiner Sauerstoff vergast den Brennstoff bei einer einstellbaren Temperatur von 1200 bis 1500 °C und einem Druck bis zu 40 bar. Für die Slurries aus den Pyrolyseanlagen wird nach jetzigem Erkenntnisstand ein Bereich von 1400 bis 1500 °C bei einer Verweilzeit von 3 bis 5 sec empfohlen. Bei späteren großtechnischen Anlagen mit evtl. im Laufe der Jahre wechselnden Brennstoffeigenschaften wird die Vergasungstemperatur von der Neigung zur Rußbildung und den Ascheeigenschaften abhängen.

Der Aschegehalt des Inputs bildet auf der gekühlten Membranwand eine zweistufige Schlackeschicht: Auf der Kühlfläche eine erstarrte Schicht; darüber läuft kontinuierlich eine Schmelzphase ab. Vorteile dieser Arbeitsweise sind:

1. Selbstschutz der Wände durch Schlackepelz aus dem Brennstoff und
2. Rasch wechselnden Brennstoffeigenschaften (Aschegehalt, Ascheschmelzpunkt, Heizwert) setzt der Schlackepelz eine gewisse thermische Trägheit entgegen, welche zur Regelbarkeit des Apparates (z.B. durch Veränderung der Kühlleistung der Rohre) beiträgt.

Nach Durchlaufen der Brennkammer kühlen Roh-Synthesegas und Schlacke durch die Eindüsung von Quenchwasser schlagartig auf eine Temperatur von ca 210 °C ab. Die Schlacke fällt in ein Wasserbad und kann als kalter, inerter Stoff ausgetragen und z.B. als Baustoff verwertet werden.

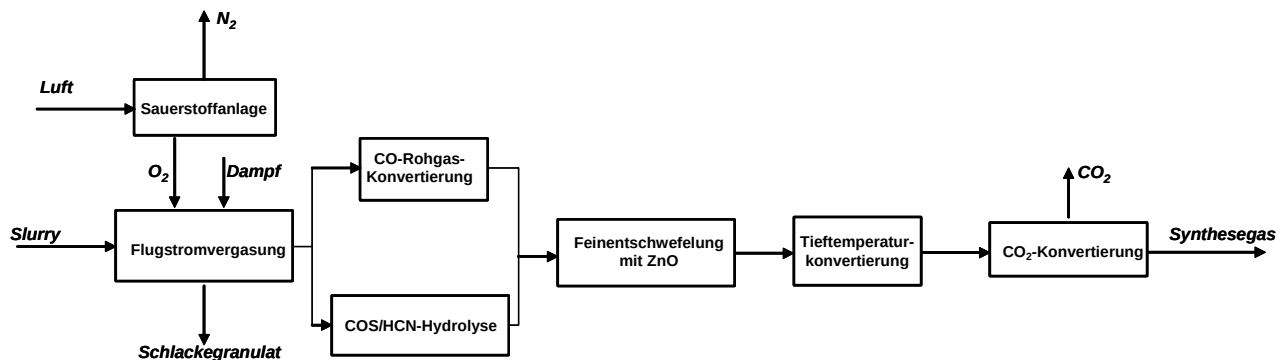
In zwei aufeinanderfolgenden Gaswäschern werden aus dem Rohgas feine Asche- und Rußpartikel entfernt.

Zur Nutzung von Wärme stellt ein Kondensatsystem Niederdruckdampf her. Eine Abwasserreinigung (Erste Stufe: Mechanische Reinigung mittels Hydrozyklonen und Filter; zweite Stufe: System von Entspannung, Niederschlag, Flockung, Filtern) versorgt interne Verbraucher. Zur Begrenzung der Salzkonzentration verläßt ein Teil des Prozeßwassers als Abwasser das System.

Das System von Kühlern und Reinigungsapparaten sorgt für eine optimale Ressourcennutzung. Zur eigentlichen Aufarbeitung des Synthesegases sind noch chemische und physikalisch wirkende Stufen vorzusehen. Ursache ist, daß bei der Flugstromvergasung ein für die FT-Synthese ungenügendes Verhältnis von  $H_2:CO$  herauskommt und Katalysatorgifte entfernt werden müssen. In Freiberg ist eine gute Ausstattung an COS/HCN-Hydrolyse, Sulferox-Wäsche u.ä. vorhanden; allerdings geht das im Rahmen der Kooperation FZK/FE abzuarbeitende experimentelle Programm nur bis zur Schnittstelle *Vergaserausgang* [7]. Gedanken für eine großtechnische Gestaltung aber existieren (s. **Abb. 9.1.-4**).

Ziele des Gasreinigungs- und Aufarbeitungskonzeptes sind:

1. Einstellung eines molaren  $H_2:CO$ -Verhältnisses von 2:1
2. Entfernung von Katalysatorgiften
3. Reduzierung des  $CO_2$ -Gehaltes zur Erhöhung der Effektivität der nachfolgenden Synthese.



**Abb. 9.1-4:** Mögliche großtechnische Erzeugung von Synthesegas aus Biomasse mittels Flugstromvergasung [52]

Die Anforderungen an das Inputmaterial für den Vergaser mit Kühlschirm resultieren v.a. aus der Zerstäubungsfähigkeit und der Notwendigkeit des Aufbaus des Schlackepelzes:

**Anforderungen an das Edukt:**

1. Einsatzstoff muß fluidisierbar sein. Dazu bestehen zwei Möglichkeiten:
  - I) Fein aufgemahlen als Pulver mit der Fähigkeit zur Dichtstromförderung oder
  - II) Mischung des Feststoffes mit einer Suspension oder einem Öl.
2. minimaler Aschegehalt  $\geq 1^*$  Gew.-%, max. Gehalt ca  $40^{**}$  Gew.-%.
3. Heizwert  $\geq 11.000$  kJ/kg
- (4. Asche sollte im Bereich 1200 bis 1500 °C gut fließfähig sein. *Anmerk.:* Dies ist ein Wunsch aus ökonomischer Sicht. Technisch ist es möglich, mittels eines Additivs eine Schmelzpunkt- oder Viskositätserniedrigung herbeizuführen.)

**Potenziale an Einsatzstoffen** bestehen hinsichtlich:

- I. Keine Limits für Schwefel, Chlor, Erd- und Alkaligehalte bekannt.
- II. Mischungen mit anderen kohlenstoffhaltigen Stoffen möglich.

*\*: Der Minimalwert gilt für den im bisherigen Konzept vorgesehenen Vergaser mit Kühlschirm und ist für die Betriebsplanung von Relevanz. Sollte eine kommerzielle Anlage vor der Situation stehen, daß die Brennstoffverträge nur nahezu aschefreie Stoffe (z.B. Al-Holz) beinhalten, bietet Fa. FE den Flugstromvergasers mit Kühlwand als Alternative an.*

*\*\* : Der Oberwert ist als grober Richtwert zu verstehen. Seine Wurzeln liegen in dem ökonomischen Umstand, daß mit steigendem Aschegehalt der Sauerstoffverbrauch zur Aufheizung des inerten Materials anwächst. Eine Überprüfung im Einzelfall ist zu empfehlen.*

Damit sind im Rückschluß keine nennenswerten Einschränkungen auf die Biomasse der Pyrolyseanlagen erkennbar. Es ist im Betrieb der kommerziellen Anlage darauf zu achten, daß keine Monochargen an Slurry aus naturbelassenem Holz eingesetzt werden, sondern eine

Vermischung mit aschehaltigen Lieferungen erfolgt. Die Slurries dürfen keine grobkörnigen Bestandteile wie z.B. Wärmeträgermaterial oder Halmknoten enthalten.

**Ausdrücklich zu bemerken ist, daß Stoffe, welche aus Müllverbrennungsanlagen oder Kraftwerken als problematisch bekannt sind (z.B. HCl, SO<sub>2</sub>, Alkali- und Erdalkalimetalle, Phosphor), nicht als kritisch angesehen werden.** *Ursache:* Ziel der Anlage ist nicht die Erzeugung von Hochdruckdampf mit entsprechend thermisch, mechanisch und chemisch belasteten Wärmetauscherflächen, sondern die Erzeugung von Synthesedampf. Das Gas wird schnell abgekühlt und die meisten Schadstoffe im Wäschersystem herausgeholt. Die Wärmenutzung erfolgt in Form von Niederdruckdampf bis 16 bar mit entsprechend niedrig belasteten Flächen [49].

### **Betriebsmittel, Reststoffanfall, Investitionskosten**

Die dezentralen Pyrolyseanlagen befinden sich in Karlsruhe noch im Entwicklungsstadium. Aussagen zum Wärmeträger (Art, Abrieb, Ersatzbedarf) sowie zur Abgasmenge sind z.Z. nur abzuschätzen.

Für den Flugstromvergaser liegt für eine Größe von 400 MW<sub>therm</sub> eine Konzeptplanung der Fa. FE vor [49]. Sie enthält eine Abschätzung der Investitionskosten, Betriebsmittelbedarf, Reststoffanfall und abgeschätzter Verfügbarkeit. Die Daten gingen in Kap. 12 in die Berechnung der Wirtschaftlichkeit ein. Aus Gründen der Vertraulichkeit werden die Werte an dieser Stelle nicht offen gelegt.

### **Fischer-Tropsch-Synthese und Fraktionenaufbereitung**

In der Fischer-Tropsch-Anlage erhält man eine breite Palette an Kohlenwasserstoffen in flüssiger und gasförmiger Form. Die Ausbeute an der gewünschten Dieselfraktion hängt stark vom Katalysator und den Betriebsbedingungen ab. Es ist absehbar, daß das Produktspektrum als hochreines Rohöl angesehen werden kann, welches einer Aufarbeitung bedarf.

Die Aufarbeitung traditionellen Rohöls ist in **Abb. 9.1-5** dargestellt [53]. Im ersten Schritt, der Fraktionierten Destillation, erfolgt eine Auftrennung des Edukts nach Siedebereichen in die Fraktionen Benzin-, Gasöl-, evtl. Schwerölfractionen und einen Destillationsrückstand. In der Platin-Reformer-Anlage erfolgt die Erhöhung der Klopffestigkeit und Nutzbarmachung des Benzins. Durch weitere Aufarbeitungsschritte erfolgt die Herstellung von Dieselmotorkraftstoff und weiterer Kraftstoffe. Eine Claus-Anlage wandelt den giftigen Schwefelwasserstoff in verkaufbaren Schwefel.

Die Komplexität und die Möglichkeiten des Raffinerieaufbaus und -betriebes verdeutlichen den Wunsch vieler Entwickler der BtL-Technologie, aus wirtschaftlichen Gründen kommerzielle Anlagen im Idealfall in der Nähe einer Raffinerie errichten zu lassen.

Beim FTS-Rohprodukt ist aufgrund der Herkunft aus hochreinem Synthesegas die Einstellung von Eigenschaften gezielter möglich als beim Naturprodukt Rohöl. Daher ist absehbar, daß die Komplexität einer modernen Raffinerie zwar wünschenswert, aber nicht notwendig sein wird. Hilfreich wäre aber die Nähe eines Industriestandortes um Synergien wie z.B. Wärmeverschalung, Claus-Anlage, H<sub>2</sub>-, O<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>-Bezug, gemeinsame Reparatur- und Instandhaltung, Lagerhaltung, Verkehrsanbindung usw. nutzen zu können.



Die Idee des Konzeptes FZK/FE bezüglich

- a) Anordnung der Synthesegasherstellung in der Nähe von zentralen Industriestandorten oder
- b) der Verarbeitung von Zwischenprodukten wie Methanol aus dem Synthesegas in zentralen Anlagen zum Kraftstoff

gilt daher aus ökonomischer Sicht auch für andere BtL-Konzepte.

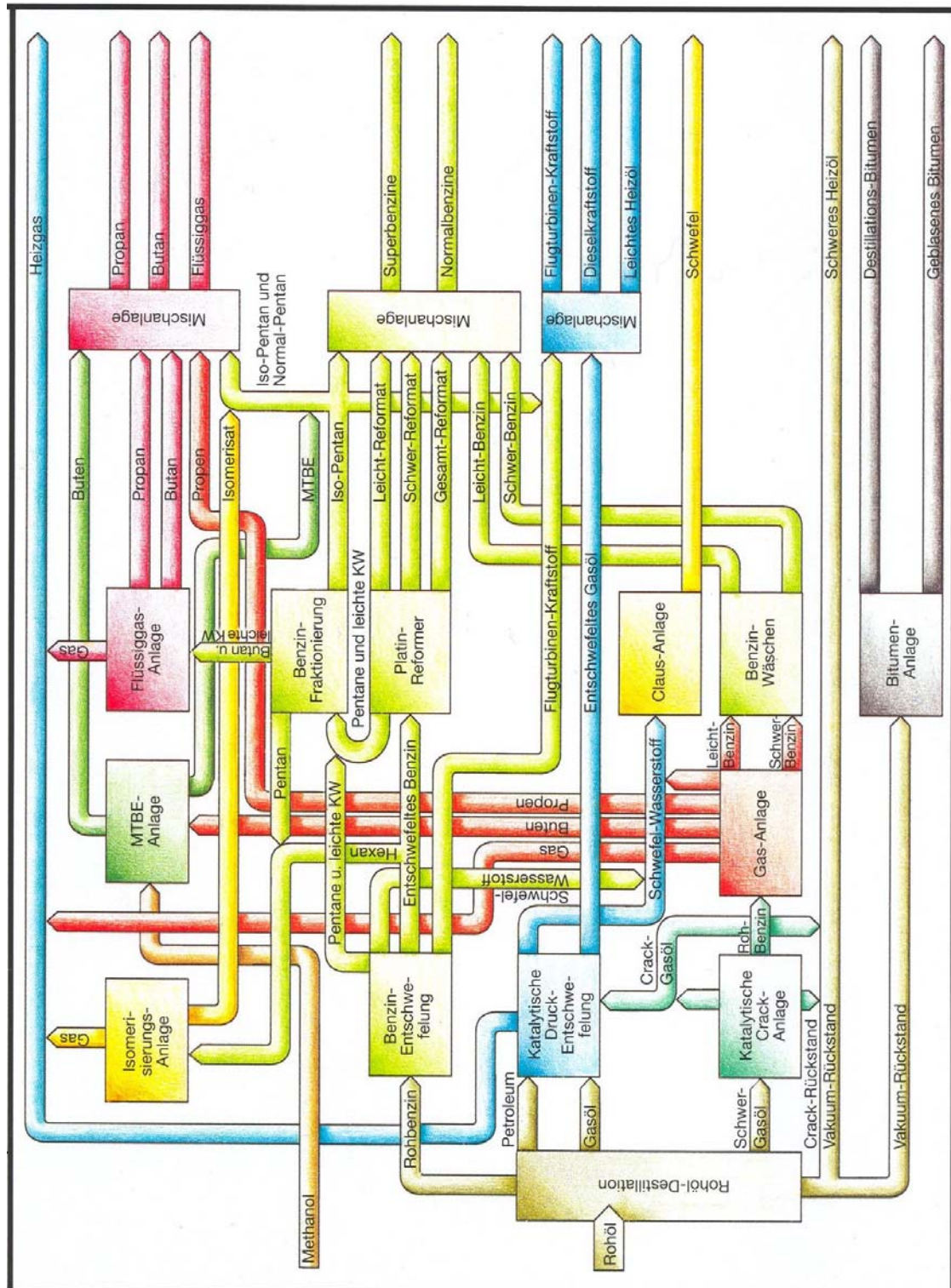


Abb. 9.1-5: Grundfließbild einer Raffinerie [53]



## 9.2 Güssing-Konzept der Fa. REPOTEC und TU Wien

Der Rat der Stadt Güssing (Österreich) beschloß im Jahre 1990, Maßnahmen zur Energieautarkie einzuleiten. Neben Tätigkeiten zur Energieeinsparung, Bau eines Fernwärmenetzes und Erzeugung von Biodiesel zur Deckung des Kraftstoffbedarfs sollte ein Biomassekraftwerk die Elektrizität des Ortes (ca 4.000 Einwohner) sicherstellen [54].

Zur Errichtung einer als Demonstrationsanlage geplanten Ausführung schlossen sich die Institutionen AE Energietechnik (später REPOTEC), Jenbacher AG, TU Wien, EVN und Güssinger Fernwärme zum Kompetenznetzwerk RENET-Austria zusammen.

Realisiert wurde eine allotherme Wirbelschichtvergasung mit einfacher Abgasreinigung und Energiewandlung im Gasmotor (s. Abb. 9.2-1 und Tab. 9.2-1)

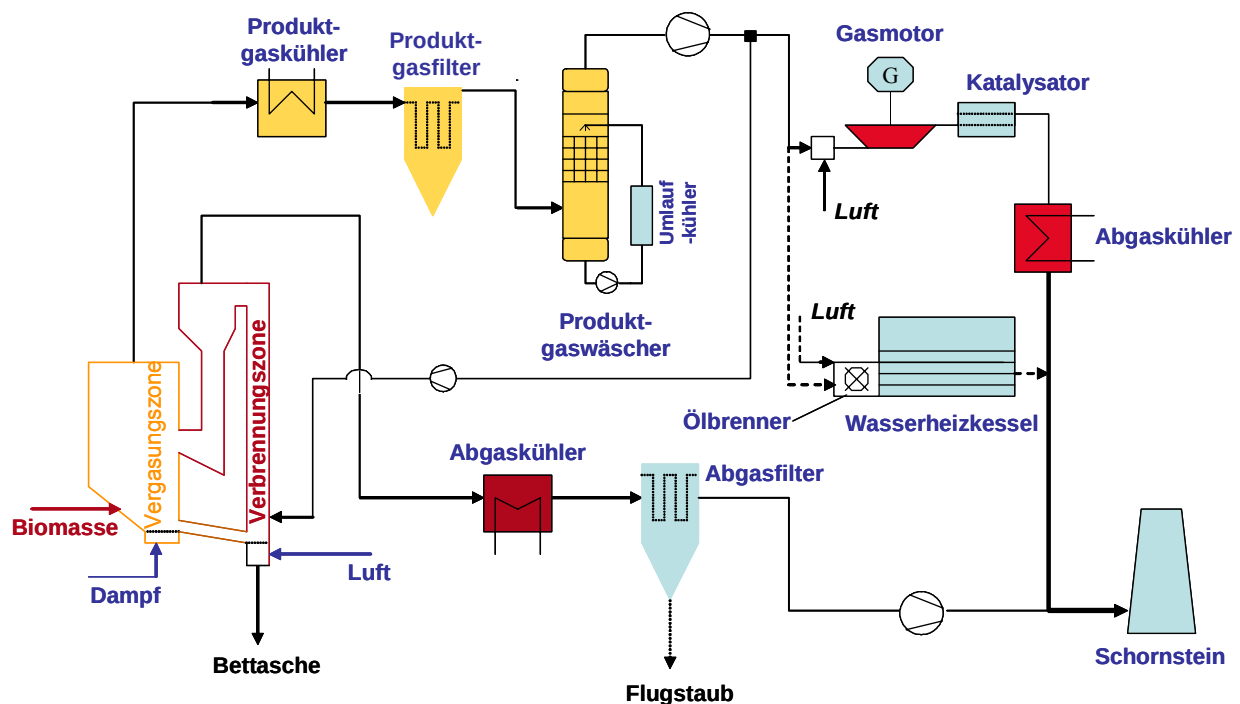


Abb. 9.2-1: Fließbild der Demonstrationsanlage Güssing [54]

|                           |      |    |
|---------------------------|------|----|
| Brennstoffwärmeleistung   | 8,0  | MW |
| Elektrische Leistung      | 2,0  | MW |
| Thermische Leistung       | 4,5  | MW |
| Elektrischer Wirkungsgrad | 25   | %  |
| Kaltgaswirkungsgrad       | 72   | %  |
| Gesamtwirkungsgrad        | 81,3 | %  |

Tab. 9.2-1: Wichtige Auslegungsdaten der Anlage Güssing [54]

**Vergaser:** Gegenüber einer autothermen Vergasung zeichnet sich die Einheit in Güssing durch die Unabhängigkeit von einer Sauerstofferzeugungsanlage aus. Die für die Zersetzung der Biomasse notwendige Energie wird durch den Wärmeträger Sand (ergänzt um einen Kata-

lysator zur Teercrackung) in die Vergasungskammer eingebracht. Der um ca 100 °C abgekühlte Wärmeträger läuft in die Brennkammer zurück. Durch Verbrennung eines Teils des Synthesegases, eines ausgeschleusten Teil des beladenen Lösungsmittels aus dem Gaswäscher und fossile oder alternative Brennstoffe erfolgt die Wiederaufheizung.

**Abgasreinigung:** Das bei ca 850 bis 900 °C erzeugte Produktgas wird in einem Wärmetauscher (Ausgangspunkt zur Dampferzeugung) abgekühlt und anschließend entstaubt. Ein mit einem organischen Lösungsmittel betriebener Wäscher sorgt für die nahezu vollständige Entfernung von Teeren. Das gereinigte Gas geht anschließend in einen Gasmotor zur Strom- und Wärmeerzeugung (v.a. Fernwärmenutzung).

Der Wassergehalt von Biomassen findet sich im Wäscher wieder. Zur Nutzung existiert ein Kondensatverdampfer, welcher Wasser und organische Phase trennt. Das Wasser wird zur Dampferzeugung genutzt.

Da die Anlage in Güssing mit A I-Holz betrieben wird, existieren keine Senken für Chlor, Schwefel und Stickstoff. In einer kommerziellen Anlage zur BtL-Herstellung sind diese zu berücksichtigen.

Ergebnisse mit der vorhandenen Abgasreinigung zeigt **Tab. 9.2-2**.

|                  | Rohgas                      | Reingas                 |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Teer             | 0,5 - 2,0 g/Nm <sup>3</sup> | < 50 mg/Nm <sup>3</sup> |
| Staub            | 10-20 g/Nm <sup>3</sup>     | < 5 mg/Nm <sup>3</sup>  |
| Ammoniak         | 1.000 - 2.000 ppm           | < 800 ppm               |
| H <sub>2</sub> S | 50-150 ppm                  | k. A.                   |

**Tab. 9.2-2:** Typische Bereiche der Verunreinigungen im Produktgas [54]

Für die BtL-Produktion wird ein Teilstrom aus der Anlage entnommen, gereinigt, aufbereitet und einer FT-Synthese zugeführt. Die Entwicklungsarbeiten laufen.

*Idee einer BtL-Anlage nach dem Güssing-Prinzip ist, durch eine Kombination von Stromerzeugung, Wärmeabgabe und BtL-Produktion einen hohen Nutzungsgrad des Brennstoffs mit einer hohen Wertschöpfung in dezentralen Anlagen zu erzielen.*

Das für die kleine Güssing-Anlage mit dem Strom- und Wärmeverkauf schon ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist, zeigte das Jahr 2005: Aufgrund der hohen Verfügbarkeit konnte mit der Demonstrationsanlage ein positives Ergebnis erzielt werden [55].

## Anforderungen an die Biomasse

Bei der Fragestellung der Biomasseeigenschaften liegt das begrenzende Element nicht im Schritt der thermischen Zersetzung: Gemäß des ursprünglichen Konzeptes wurde mit der Wirbelschicht ein robuster Apparat mit einer hohen Genügsamkeit ausgewählt [54]. Einschränkungen liegen in der Abgasreinigung (s.o.) sowie im Eintragssystem, welches auf Hackschnitzel aus Holz ausgelegt ist. Somit unterscheiden sich die Anforderungen des Betrei-

bers in Güssing an die Biomasse signifikant von den Möglichkeiten einer kommerziellen Anlage mit anderen Randbedingungen.

Zu beachten bei der Vorplanung ist eine eventuelle Wechselwirkung von Siliziumbestandteilen der Biomasse mit dem katalytisch wirkenden Bettmaterial: Erfahrungen mit Mischungen von Quarzsand und dem Katalysator lassen die Gefahr von Verklebungen möglich erscheinen [55]. Hier sind Untersuchungen notwendig, welche das Verklebungspotenzial untersuchen bzw. die Teerbildungsrate und Reinigungskraft des Wäschers beim Verzicht auf den Katalysator.

Nach Auskunft der Fa. REPOTEC ergeben sich folgende Chancen und Einschränkungen für zukünftige Realisierungen [56]:

**Anforderungen an die Biomasse:**

1. Stückigkeit: 2 bis 150 mm
2. Wassergehalt: 10 bis 60 Gew.-%
3. Ascheschmelzpunkt > 950 °C.
- (4. Siliziumgehalt evtl. zu beschränken. Zu untersuchen).

**Potenziele an Einsatzstoffen** bestehen hinsichtlich:

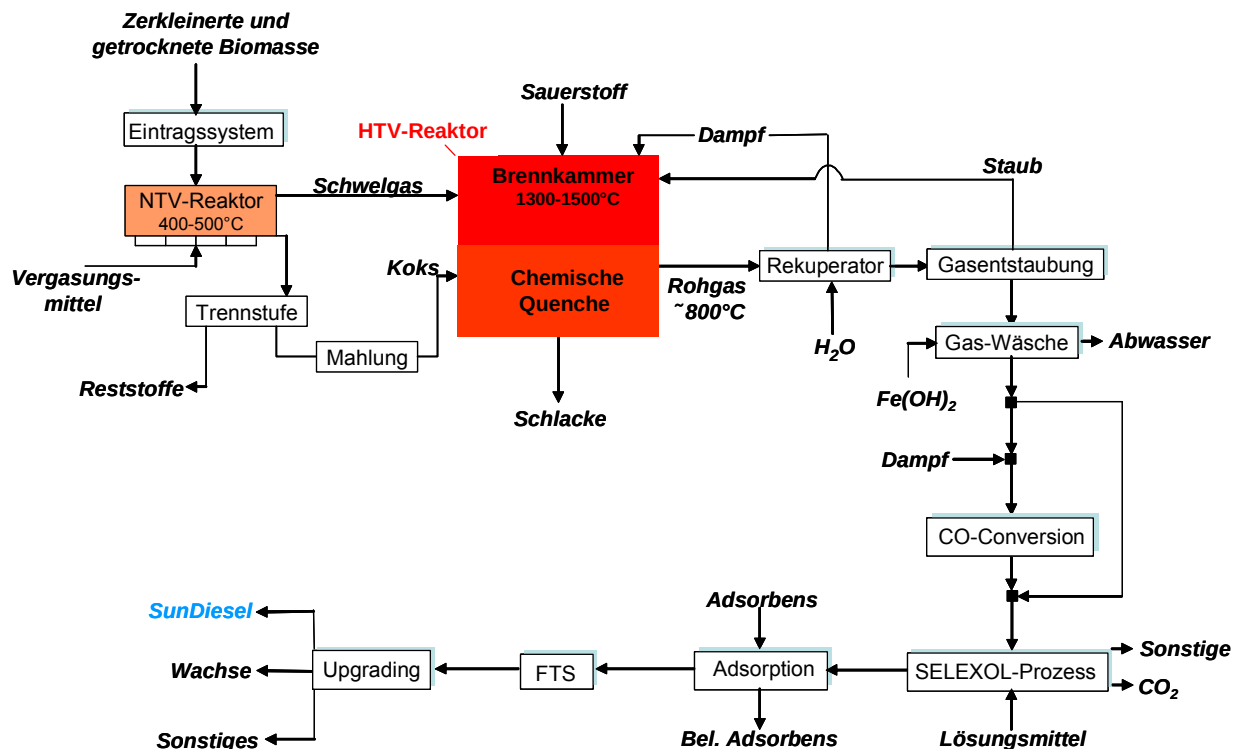
- I. Keine Limits für Schwefel, Chlor, Erd- und Alkaligehalte bekannt (Anmerk.: Soweit sie nicht den Ascheschmelzpunkt betreffen → s. Kap. 7).
- II. Keine Einschränkungen beim Aschegehalt.
- III. Kohlenstoffhaltige Suspensionen oder Flüssigkeiten möglich.

**Mögliche Größenordnung kommerzieller Anlagen**

Eine gewisse Einschränkung der Anlagengröße besteht aufgrund des allothermen Wirkungsprinzips im Vergaser: Eine gleichmäßige Aufheizung und Transport des Wärmeträgers mit einem homogenen Profil über alle Querschnitte wird mit zunehmender Anlagengröße erschwert. Zur Zeit wird eine maximale Anlagengröße von 100 MW<sub>therm</sub> favorisiert, aber 200 bis 300 MW<sub>therm</sub> für machbar gehalten; beim Übergang zur in der Entwicklung befindlichen Druckvergasung auch das Zehnfache [56].

### 9.3 Carbo-V<sup>®</sup>-Verfahren

Die Inbetriebnahme der 1-MW<sub>therm</sub>-Carbo-V<sup>®</sup>-Pilotanlage (*Alpha-Anlage*) der Fa. UET - Umwelt- und Energietechnik GmbH in Freiberg im Jahre 1998 bildete den Startschuß für die bisher erfolgreichste Entwicklung zur Herstellung von BtL aus Biomasse. Herzstück der Verfahrenslinie sind die drei Apparateschritte 1. *Niedertemperaturvergaser*, 2. *Brennkammer*, 3. *endotherme Flugstromvergasung*, wobei 2. und 3. in einem Apparat, dem Hochtemperaturvergaser, untergebracht sind (s. **Abb. 9.3-1**)



**Abb. 9.3-1:** Flugstromvergaser einschließlich Niedertemperaturtrommel [abgeleitet 57,58]

#### Niedertemperaturvergaser (Abk.: NTV)

Über ein mehrstufiges Schleusensystem erfolgt der Eintrag des aufbereiteten Inputs in die Trommel. Eine Welle mit Paddel durchmischt das Gut. Bei einer Temperatur im Bereich von 400 bis 500 °C oxidiert ein Teil des Brennstoffs in einer exothermen Verbrennungsreaktion. Der notwendige Sauerstoff entstammt an mehreren Stellen mit einer Temperatur von ca 500 °C zugeführtem Vergasungsmittel, z.B. Luft. Es entstehen ein teerhaltiges Gas und Koks. Insgesamt kann der Prozess als eine Mischung von Pyrolyse (in Abwesenheit von O<sub>2</sub>, Zersetzung des Materials nur durch thermische Antriebskraft) und Vergasung (an Stellen mit Anwesenheit von O<sub>2</sub>) beschrieben werden.

Der Koks wird abgekühlt, von Überkorn befreit, gemahlen und in einem Behälter zwischengelagert, aus dem eine kontinuierliche Beschickung des HTV-Reaktors gewährleistet ist.

### **Hochtemperaturvergaser (Abk.: HTV)**

Das aggressive und teerhaltige Gas des NTV läuft über eine kurze Leitung in den Kopf des HTV. Mit Hilfe von Luft bzw. bei der BtL-Herstellung reinem Sauerstoff erfolgt die Vergasung. Die Kühlung der Wände erfolgt über unter Druck stehenden wassergeführten Rohren. Die Reaktionstemperatur kann im Bereich von 1300 bis 1500 °C variiert werden. Das Gas strömt anschließend in die Mischzone, wo die Eindüsung von Koks erfolgt. Die im Gas enthaltene Energie und instabile Stoffe reagieren mit dem Koks zum eigentlichen Roh-Synthesegas. Es verläßt den Reaktor mit einer Temperatur von ca 800 °C.

Flüssige Schlacke fällt aus dem HTV in ein Wasserbad und erstarrt.

Wesentliche Unterschiede zum Flugstromvergaser der Fa. FE aus Kap. 9.1 sind:

- a) Kein vollständig ausgebildeter Kühlschirm aus geschmolzener Asche im heißen Teil und
- b) Kein Druckbetrieb in der Alpha-Anlage.

### **Rekuperator**

Der Wärmetauscher kühlt das Rohgas auf einen Bereich um die 150 °C ab. Die Wärmeenergie wandert in die Dampferzeugung; denkbar wäre auch die Aufheizung des im NTV benötigten Vergasungsmittels.

### **Gasreinigung**

Über einen Gewebefilter erfolgt die Gasentstaubung; anschließend über eine Quenche die Abkühlung auf Kühlgrenztemperatur und in der angeschlossenen mehrstufigen Füllkörperkolonne die Abscheidung von HCl, HF, Schwermetallsulfide (Stufe 1) und von H<sub>2</sub>S (Stufe 2) mit Hilfe von Fe(OH)<sub>2</sub>, welches den Schwefel als FeS niederschlägt. In einer abschließenden Stufe wird durch Zugabe von reinem Waschwasser die Waschlösung und verbliebene Feinstäube ausgewaschen. Die Filterasche geht zurück in den Kopf der Brennkammer zur Unterstützung der Bildung eines Schlackepelzes.

### **Gasaufbereitung**

Die Gasaufbereitung beinhaltet die Stufen CO-Konversion, CO<sub>2</sub>-Abtrennung und adsorptive Feinreinigung. Die CO-Konversion erfolgt für einen Teilstrom des gereinigten Synthesegases über einem Katalysator mittels Wassergas-Shift-Reaktion zu H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>. Das CO<sub>2</sub> trennt man mittels einer SELEXOL-Wäsche ab. Eine abschließende Adsorption sorgt für ein FTS-Katalysator-geeignetes Gas.

### **FTS**

Das aufgearbeitete Synthesegas geht in die FT-Synthese zwecks Herstellung eines Rohöls mit hohem Dieselanteil. Seit August 2005 besteht eine Partnerschaft der Firmen *CHOREN Industries* mit der Fa. *Shell*. Zweck der Gemeinschaft ist die Weiterentwicklung des von Shell aus der ursprünglichen FTS entwickelten *Shell Middle Distillate Synthesis* für die Anwendung in der BtL-Produktion (*Anmerk.*: Shell entwickelte das Verfahren für die Umwandlung von Erdgas in synthetische Kohlenwasserstoffe). Als Katalysator dient ein auf Kobalt basierendes Material.

### **Upgrading**

In einem mehrstufigen Verfahren wird aus dem FTS-Rohprodukt der fertige SunDiesel erzeugt. Das Wachs kann mittels Hydrocracking ebenfalls zu Diesel aufgearbeitet werden.

Aus der in Kurzform beschriebenen Verfahrens- und Apparatechnik lassen sich die Folgen zusammenfassen zu:

***Idee des Carbo-V<sup>®</sup>-Verfahrens ist die teerfreie Herstellung eines heizwertreichen Gases mittels Flugstromvergasung.***

**Vorteile** des Verfahrens bei der BtL-Produktion sind:

- V1:** Durchmischung des Brennstoffes in der Trommel → Homogenisierung der Eigenschaften.
- V2:** Kohlenwasserstoffe werden in der Brennkammer bei 1200 bis 1500 °C vergast → Vernichtung aller Teere und keine Wasserstoffbindung im Methan.
- V3:** Langjährige Erfahrung mit der Alpha-Anlage vorhanden.

**Nachteile** des Verfahrens bei der BtL-Produktion sind:

- N1:** In der NTV-Trommel laufen Pyrolyse, Vergasung und örtliche Verbrennung nebeneinander ab → Bildung von Hot Spots und Entstehung einer sehr großen Bandbreite z.T. aggressiver Gase. Die Vorgänge legen den Schluß nahe, daß die Scale-Up-Fähigkeit auf hohe thermische Leistungen begrenzt ist.
- N2:** Kokseindüsung im HTV erfordert gute Durchmischung mit dem Rohgas aus der Brennkammer.

Die Erfahrung muß ferner noch zeigen, wie sich die Asche alkalihaltiger Biomassen bei der Eindüsung mit dem Koks in den HTV verhält. Ein Abfluß als flüssige Schlacke wie beim Vergaser mit Kühlschirm ist aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus von 800 °C nicht zu erwarten.

Die oben geschilderten technischen Gegebenheiten schlagen sich in den Anforderungen an den Input nieder, wie sie von der Fa. CHOREN genannt werden [z.B. 59]:

**Anforderungen an den Input:**

1. Stückigkeit: 120\*50\*30 mm<sub>max</sub>, keine Späne.
2. Wassergehalt: 10 bis 20 %, max. 25 Gew.-%.
3. Gehalt an Störstoffen ≤ 5 Gew.-%.
4. Keine aschereichen Stoffe wie Klärschlamm oder Torf.
5. Keine faserigen Materialien wie Altpapier oder Textilien.

**Potenziale an Biomasse** bestehen hinsichtlich:

- I. Altholz der Klassen A I bis IV.
- II. Sonstige, wenn o.g. Eigenschaften eingehalten werden.

Der Nachweis der Eignung für andere Biomassen als für Holz steht; zumindest als Veröffentlichung, noch aus. Durch die Herstellung nennenswerter Mengen BtL und die Kooperation mit der Fa. Shell besitzt die Fa. CHOREN auf jeden Fall einen Vorsprung gegenüber alternativen Entwicklern, der in den nächsten Jahren in die erste kommerzielle BtL-Anlage führen kann.



## 9.4 ArtFuel-Konzept

Die Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (Abk. CUTec) bekam im Dezember 2002 den Auftrag zur Konzipierung einer BtL-Verfahrenslinie von der Vergasung bis zur FT-Synthese. Als Anforderungen wurden gestellt:

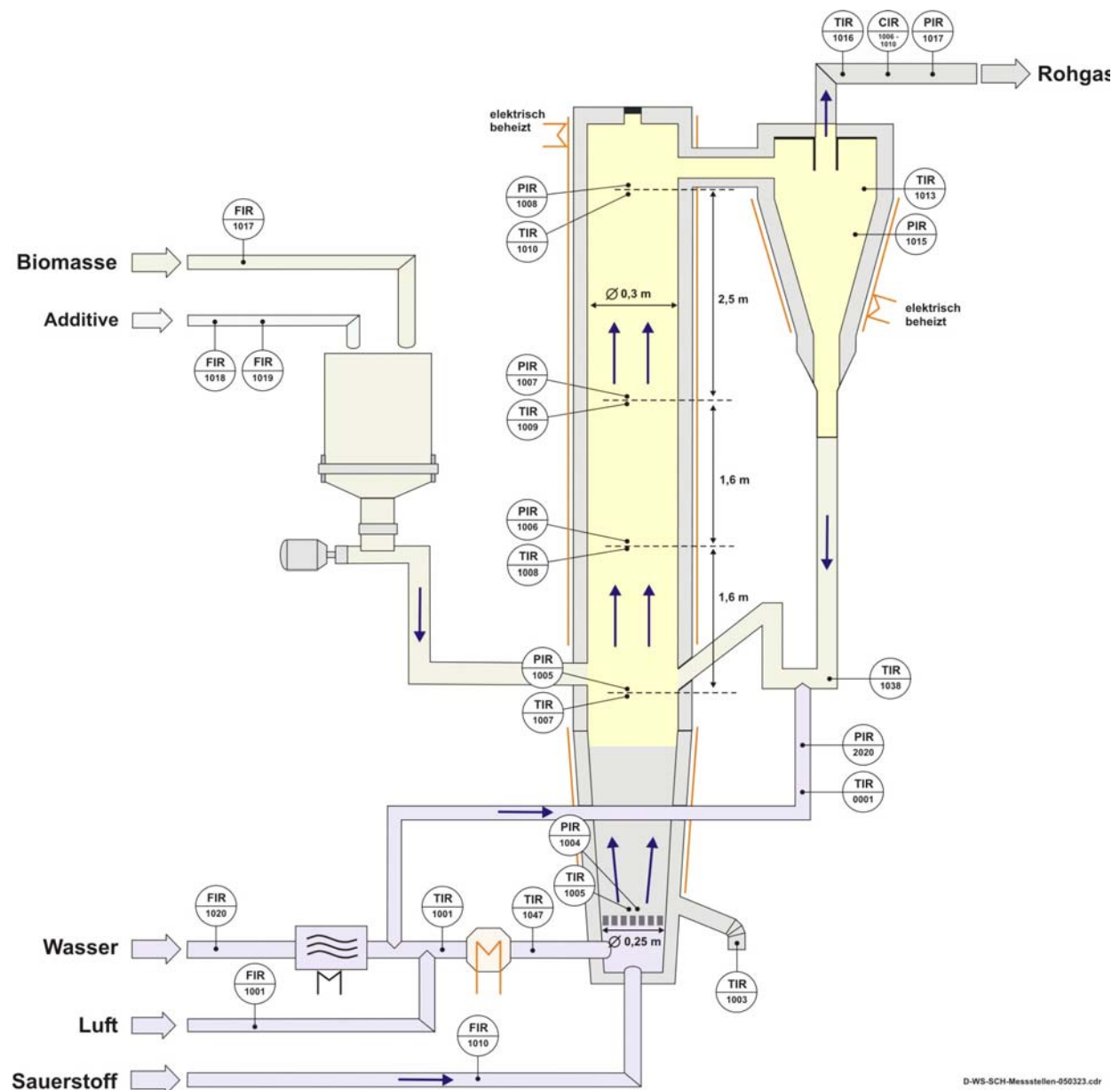
1. Der Vergaser müsse eine breite Palette an Input verarbeiten können. Dabei stand nicht nur Biomasse zur Diskussion; auch Entsorgungsaufgaben wie die Klärschlammnutzung sollte der Apparat lösen können.
2. Die im Technikumsmaßstab errichteten Aggregate hatten einfach und schnell Scale-Up-fähig zu sein.
3. Die Anlagentechnik sollte für darauf aufbauende kommerzielle Anlagen eine Wirtschaftlichkeit für die Betreiber bei möglichst geringer Input-Kapazität sicherstellen.
4. Maximale Berücksichtigung der Interessen der Landwirtschaft im Sinne des Agrar- und Automobillandes Niedersachsen.

Als bekannter „Allesfresser“ für die Vergasung realisiert wurde eine Zirkulierende Wirbelschicht einer thermischen Leistung von 400 kW (s. **Abb. 9.4-1**). Die Anlage ist ausgestattet mit einer Dampfversorgung (Trägermaterial für die Wirbelschicht) und einer Sauerstoffversorgungsanlage (zur autothermen Betriebsweise). Um trotz des ungünstigen Oberflächen- zu Volumenverhältnisses einer Technikumsanlage zu Großanlagen vergleichbaren Ergebnissen zu kommen, ist die Anlage mit einer stufenlos regelbaren elektrischen Begleitheizung ausgestattet, welche die Wärmeverluste über die Wandung vermindern kann.

Die Abgasreinigung startet als innovative Idee mit einem Heißgasfilter, welcher bei hoher Temperatur die Entstaubung durchführt. Ziele des Apparates an dieser Stelle sind: **I) Abtrennung der Asche ohne Verglasung mit der Möglichkeit der Rückgewinnung der (Pflanzen-) Nährstoffe** und **II) Frühzeitige Abtrennung des Staubes zur Vermeidung von Belagsproblemen (im Falle von Wärmetauschern bei kommerziellen Anlagen) oder Abwassereintrag (bei Abscheidung in einer Quenche)**. In der Technikumsanlage folgen eine Quenche zur Synthesegasabkühlung (und Staubabscheidung im Falle des Filterausfalles), ein Wäscher zur Abtrennung saurer Komponenten, ein RME-Wäscher zur Teerabtrennung und ein Aktivkohlefilter zur Chemiesorption verbliebener Schadstoffe.

Nach der Synthesegasreinigung folgt die Verdichtung und FT-Synthese. Endprodukt in der Technikumsanlage ist das FT-Rohprodukt.

Wie in anderen beschriebenen Konzepten ist die Synthesegasreinigung auf den sicheren Betrieb der Katalyse ausgerichtet (s. **Abb. 9.4-2**). Fragen wie die Schaffung möglichst reiner Reststoffströme oder sogar von Wertprodukten, Minimierung oder Vermeidung von Abwasser, optimale Wärmeverschlusung rangieren in der Wertigkeit hinter den Anforderungen zur Vergasungs- und FT-Optimierung. Um eine großtechnische Anlage mit Zirkulierender Wirbelschicht theoretisch betrachten zu können, wurde eine auf Biomasse zur BtL-Produktion zugrunde liegende Abgasreinigung zugrunde gelegt (s. Kap. 10, spez. Abb. 10.4). Daten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen lieferten Massen- und Energiebilanzen einer 500 MW<sub>therm</sub>-Anlage, wie sie im Projekt [7] zu erstellen waren, Richtpreisangebote von Anlagenbauern für die Komponenten des in Kap. 10 beschriebenen Konzeptes sowie die Literatur.

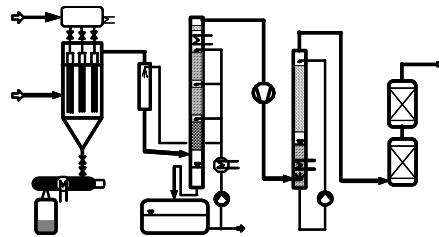


**Abb. 9.4-1:** ArtFuel-Vergaser am CUTEC [60]

Die Technikumsanlage ist seit dem Dezember 2004 in Betrieb und fuhr in 2005+2006 umfangreiche Versuchsfahrten mit den Zielen

1. Nachweis der Funktionstüchtigkeit von verschiedenen Partikelmorphologien bei einem Brennstoff (Holz mit den Formen Späne, Hackschnitzel, Pellets und zerkleinerte Spanplatten); Ermittlung der Synthesegaseigenschaften als Funktion verfahrenstechnischer Parameter [60]
2. Nachweis der Funktionstüchtigkeit bei verschiedenen Brennstoffen (bisher: Holz, Weizenstroh, Sonnenblumenspelzen, Rapsschrot und Zuckerrübenschnitzel); Ermittlung der Synthesegaseigenschaften als Funktion verfahrenstechnischer Parameter [36].

Dampf-O<sub>2</sub> Vergasung von Holz-Pellets bei ca 950°C



| <i>mg/Nm<sup>3</sup><sub>trocken</sub></i> | Teer   | Organi-<br>scher<br>Schwefel | H <sub>2</sub> S | HCl   | NH <sub>3</sub> |
|--------------------------------------------|--------|------------------------------|------------------|-------|-----------------|
| Vergaserausgang – Roh-Synthesegas          | 12.800 | 63                           | 18               | < 1,0 | 432             |
| nach Wasserwäscher                         | 7.000  | 39                           | 11               | < 0,5 | 1,97            |
| nach Dieselwäscher                         | <1.000 | -                            | -                | -     | -               |
| nach Aktivkohlsfilter                      | -      | < 0.2                        | <0,1             | < 0,4 | < 0,4           |

Abb. 9.4-2: Effektivität der Synthesegas-Reinigungsstrecke in der Technikumsanlage

Die ersten Ergebnisse zeigten [36,60]:

- eine deutliche Abhängigkeit vom verwendeten Brennstoff. Dabei ließen sich aus den halmgutartigen Stoffen gute Wasserstoffausbeuten erzielen (Abb. 9.4-3) und
- die Möglichkeit der Einstellung eines für die FT-Synthese idealen H<sub>2</sub>:CO-Molverhältnisses von ≈2:1 am Vergaserende durch optimierte verfahrenstechnische Parameter (Abb. 9.4-3)
- das die Teerbildung durch Wahl eines geeigneten Additivs nahezu unterdrückt werden kann (Abb. 9.4-4).

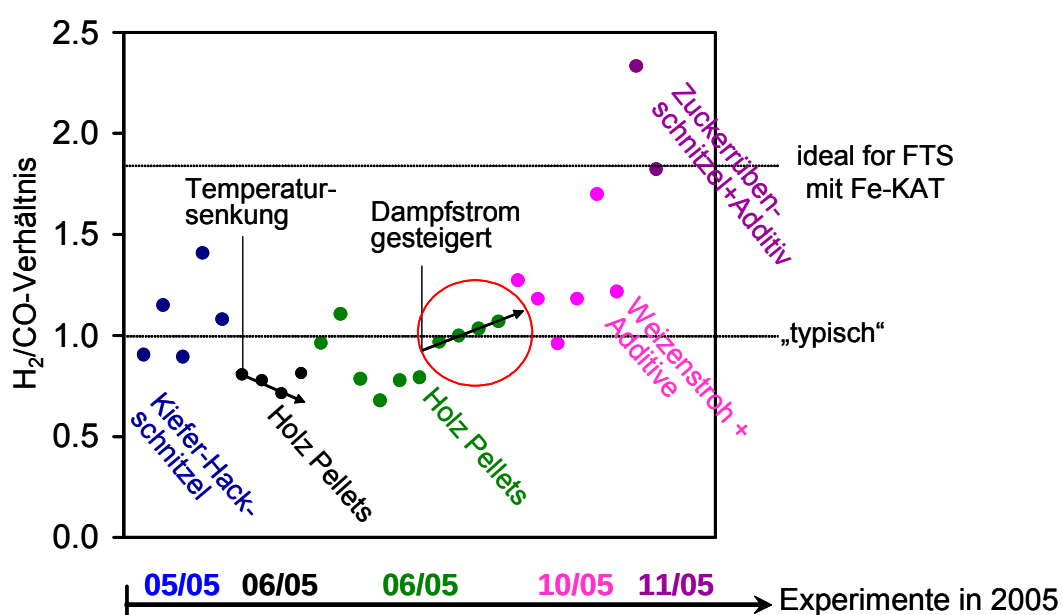
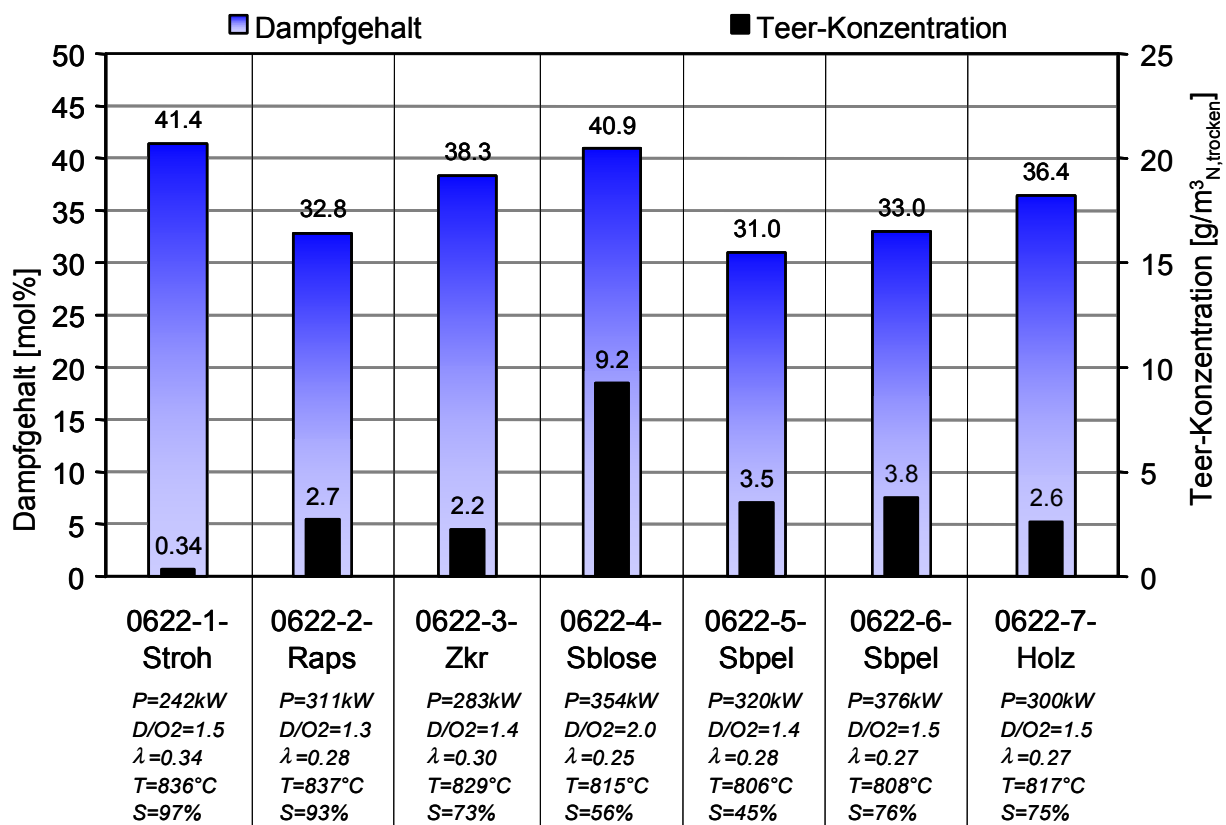


Abb. 9.4-3: Zusammensetzung des Synthesegases bei verschiedenen Brennstoffen und bei Änderungen wesentlicher Verfahrensparameter [60]



**Bem.:** 1. Zkr: Zuckerrübenschnitzpellets

2. Sblose: Sonnenblumenspelzen lose, Sbpel: Sonnenblumenspelzen in Pelletform

3. P=Thermische Leistung, D/O<sub>2</sub>=Dampf-Sauerstoffverhältnis am Eintrag, λ: Sauerstoffangebot, T=Vergasermitteltemperatur, S=Umlaufindikator

**Abb. 9.4-4:** Teerbildung und Dampfgehalt bei verschiedenen Brennstoffen und Verfahrensparametern [60]

Für kommerzielle Anlagen haben die Ergebnisse signifikante Auswirkungen. So sind besonders zu nennen:

1. Die Wirbelschicht zersetzt eingehende Partikel bis in den Zentimeter-Bereich ohne Probleme. Beschränkungen hinsichtlich physikalischer Eigenschaften wie Kornform/-größe, Zähigkeit und spezifischer Dichte bestehen durch das Eintragungssystem der Technikumsanlage. Das Eintragungssystem kommerzieller Anlagen ist auf die breite Palette von Pflanzen anzupassen, z.B. durch entsprechend gestaltete Zellenradschleusen, Extruder- oder Schneckenkonstruktionen. Realisiert werden sollten mehrere Eintragungssysteme in einen Reaktor für verschiedene Inputmaterialien, wie es bei Zirkulierenden Wirbelschichten zur Verbrennung Stand der Technik ist.
2. Beschränkungen durch hohe oder niedrige Aschegehalte sind nicht zu erkennen und nicht zu erwarten.
3. Beschränkungen durch Biomasse-Inhaltsstoffe wie Alkali- oder Erdalkalimetalle sind bisher nicht zu erkennen. Evaluierungen dieses Ergebnisses durch neue Energiepflanzen stehen noch aus.

*4. Die Teerbildung hängt bei gegebener Temperatur vom Inhaltsstoff und vom Additiv ab. Ein Betrieb mit einem Teergehalt unterhalb der Nachweisgrenze ist möglich. Technische und betriebswirtschaftliche Optimierungen (Abhängigkeiten von der Pflanze, Menge, Art und Aufbereitung an Additiv) stehen noch aus.*

Der Heißgasfilter für den Vergasungsbetrieb beim Biomassebetrieb ist kein Stand der Technik. Erste Ergebnisse zeigen das Potenzial auf, Nährstoffe und Energie in Form von Kohlenstoff aus der Filterasche verwerten zu können. Betriebswirtschaftlich ergäbe sich daraus der Vorteil, einen Reststoffstrom nicht als Abfall entsorgen zu müssen (mit entsprechenden Kosten), sondern als Wertprodukt(e) in den eigenen Prozeß (Kohlenstoff) oder in die düngerherstellende Industrie (Phosphor, Alkali, Erdalkali) abgeben zu können.

Für die Anforderungen und Chancen an die Biomasse lassen sich abschließend definieren :

**Anforderungen an den Input:**

1. Stückigkeit: Kantenlänge 0 bis 200 mm, Ø 50 mm als Idealgröße.
2. Wassergehalt: bis max. 35\* Gew.-%.

**Potenziele an Biomasse** bestehen hinsichtlich:

- I. Keine Limits für Schwefel, Chlor, Erd- und Alkaligehalte bisher bekannt\*\*.
- II. Keine Einschränkungen beim Aschegehalt.
- III. Kohlenstoffhaltige Suspensionen oder Flüssigkeiten möglich.

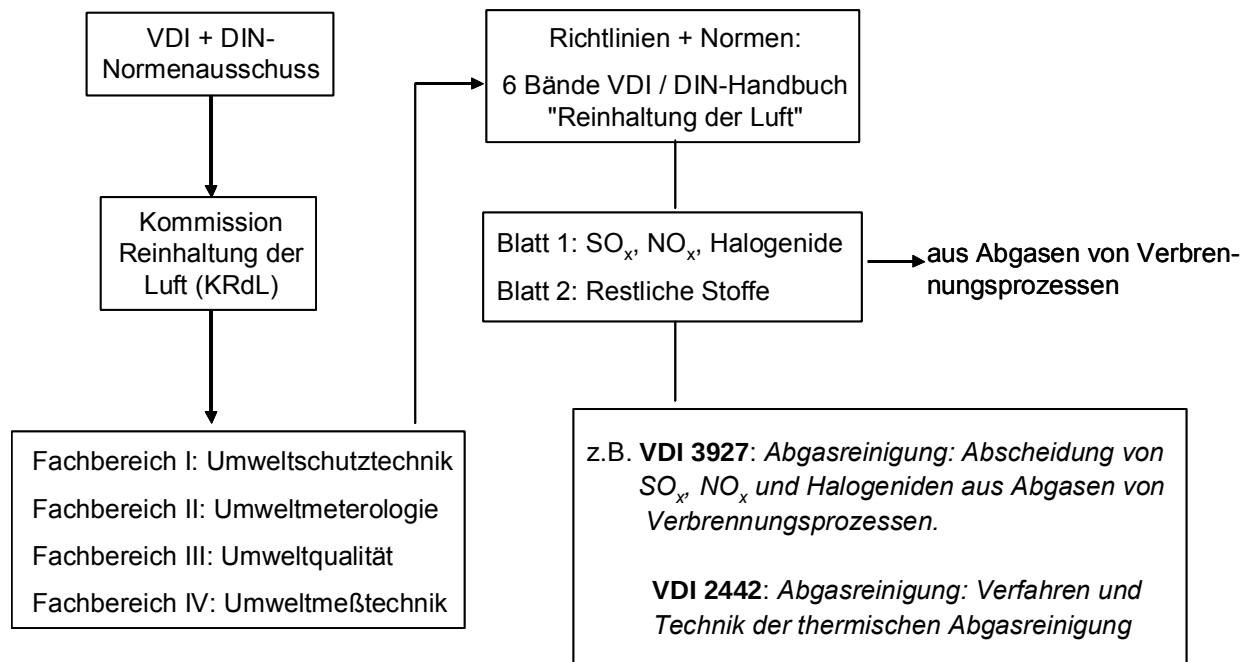
*\*: Wert ist als grober Richtwert zu verstehen. Seine Wurzeln liegen in dem ökonomischen Umstand, daß mit steigendem Wassergehalt der Sauerstoffverbrauch zur Aufheizung des inerten Materials anwächst. Eine Überprüfung im Einzelfall ist zu empfehlen. Der Wert „35“ entstammt der Möglichkeit der einfachen Lufttrocknung von Holz.*

*\*\*:* Evaluierungen bei Anwendung neuer Energiepflanzen stehen noch aus.

Bei der großtechnischen Konzeptionierung sind Anlagengrößen der Wirbelschicht bis zu 500 MW<sub>therm</sub> in einem Apparat Stand der Technik [61].

## 10. Potenzielle kommerzielle Gasreinigungsverfahren

Für die Reinigung von Gasen als Funktion des Inhaltsstoffes, der Menge, den gewünschten Wertstoffen, der Ausrichtung auf gezielte Schadstoffsenken usw. existieren in der Verbrennungstechnik vielfältige Möglichkeiten. Zur Unterstützung von Anwendern schufen verschiedene Institutionen umfangreiche Richtlinien, Normen und Nachschlagewerke. Einen kleinen orientierenden Überblick zeigt **Abb. 10-1**.



**Abb. 10-1:** Standards der Gasreinigung in Verbrennungsprozessen

Als begrifflich nicht unmittelbar zur o.g. Reinigung zählend sind Verfahren zur Geruchsstoffentfernung und zum Arbeitsschutz. Für beide Anwendungsfälle existieren eigene Apparatetechniken.

Neben den Gasreinigungsprozessen aus der Verbrennung entwickelte besonders die chemische Industrie etliche Verfahren zur Gasreinigung, -trennung und Lösungsmittelrückgewinnung (s. **Tab. 10-1**). Übersichtliche Beschreibungen befinden sich in [62, 63].

Die Verfahren unterscheiden sich durch die Zusammensetzungen der Rohgase und die Anforderungen an die Reingase.

Für die Reinigung von Synthesegasen vor Katalyseprozessen herrschen i.a. hohe Anforderungen an die Reingase, um den jeweiligen Katalysator zu schützen. Die Spezifikationen richten sich im Detail nach dem verwendeten Katalysator.

Hohe Effektivitäten besitzen Waschverfahren. Zu unterscheiden sind a) Physikalische und b) Chemische Wäschen.



| Verfahren                             | Methode    | Anwendung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Druckwasserwäsche                     | Absorption | Entfernung von Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff aus Druckvergasungsgasen, Erdgas, Raffineriegasen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Druckölwäsche                         | Absorption | Gewinnung niedrigsiedender Kohlenwasserstoffe wie Benzin und Benzol aus Kokereigas, Druckvergasungsgas, Raffineriegas und Erdgas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Purisol- Verfahren                    | Absorption | Selektive Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Gasen mit hohem Schwefelgehalt, vollständige Entfernung von Schwefelwasserstoff und Harzbildnern, vollständige Entfernung von Kohlendioxid aus Druckgasen, Erdgas und Spaltgasen bei gleichzeitiger Trocknung dieser Gase.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Totalreinigung von Druckgasen         | Absorption | Entfernung von Schwefelwasserstoff, organischen Schwefelverbindungen, Kohlendioxid, Ammoniak, Blausäure, Harzbindnern, höheren Kohlenwasserstoffen sowie von Wasser ; aus Druckgasen jeder Art mit hohem Gehalt an Verunreinigungen, insbesondere aus der Druckvergasung von Kohle oder aus der partiellen Oxidation von Schweröl mit Sauerstoff.                                                                                                                                                                                                                                        |
| Alkazid- Wäsche                       | Absorption | Entfernung von Schwefelwasserstoff und/oder Kohlendioxid aus Synthesegas, Druckvergasungsgas, Wassergas, Ölgas, Raffineriegas, Flüssiggas, Erdgas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Heißpottasche- Wäsche                 | Absorption | Entfernung von Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff aus Druckgasen, z.B. aus der Entgasung fester Brennstoffe, Vergasung fester und flüssiger Brennstoffe, Gasen aus der Konvertierung und Methanspaltung.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Äthanolaminwäschen                    | Absorption | Entfernung von Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid aus Spaltgasen, Raffineriegas, Naturgas mit niedrigem bis mittlerem $H_2S$ - bzw. $CO_2$ -Gehalt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Giammarco-Vetrocoke-Verfahren         | Absorption | Vollständige Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Vergasungs- und Spaltgasen, Raffineriegasen und Naturgas mit niedrigem und mittlerem Schwefelwasserstoffgehalt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Sulfinol- Wäsche                      | Absorption | Entfernung saurer Gasbestandteile, wie Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid, COS, Mercaptane usw., aus Naturgas, wasserstoffhaltigen Gasen, Synthesegasen, teilweise auch aus Raffineriegasen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Sulfacid- Verfahren                   | Absorption | Beseitigung von Schwefeldioxid aus industriellen Abgasen, z.B. Abgase aus Feuerungen, Abgase aus metallurgischen und chemischen Prozessen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Trocknung von Gasen und Flüssigkeiten | Adsorption | Entfernung des suspendierten und gelösten Wassers aus Flüssiggasen und anderen nichtwässrigen Flüssigkeiten bis auf Restgehalte von wenigen Gramm je Tonne.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Lösemittel-Rückgewinnung              | Adsorption | Rückgewinnung von Lösemitteln in praktisch der gesamten lösemittelverarbeitenden Industrie, ferner in Entfettungsbetrieben, chemischen Wäschereien usw.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Benzorbon-Verfahren                   | Adsorption | Reinigung von Koksofengas, besonders zur Entfernung von Benzol, Naphthalin und Harzbildnern durch Adsorption an Aktivkohlen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Oxorbon-Verfahren                     | Adsorption | Die Abscheidung von $H_2S$ , vorzugsweise bei geringen Konzentrationen, wird durch Oxidation an Katalysator-Aktivkohle (Oxorbon) bei Normaltemperatur zu Elementarschwefel bis zu Gasreinheiten unter $1 \text{ mg/Nm}^3$ vorgenommen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Desorex- und Katasorbon-Verfahren     | Adsorption | Mit beiden Verfahren werden organische Schwefelverbindungen (COS, $CS_2$ , Mercaptane, Thiophen) aus technischen Gasen bis auf Restgehalte unter $1 \text{ mg/Nm}^3$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Sulfosorbon- Verfahren                | Adsorption | Entfernung von Schwefelwasserstoff und Schwefelkohlenstoff aus der Abluft von Viskosebetrieben in einem Arbeitsgang.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Katalytische Nachverbrennung          | Katalyse   | Das Verfahren entfernt Lacklösemittel und Lackzersetzungsprodukte aus der Abluft von Lacktrockenöfen; Weichmachernebel und Lösemitteldämpfe aus der Abluft kunststoffverarbeitender Betriebe; Ruß, Teernebel und gasförmige Teerzersetzungsprodukte aus Feuerungsabgasen und aus den Abgasen kohle- und teerverarbeitender Betriebe; Schwefelverbindungen, Kohlenwasserstoffe und Lösemittel aus der Abluft und den Abgasen petrochemischer und chemischer Produktionsanlagen; Geruchsstoffe aus der Abluft von Industrieanlagen, Spurenstoffe aus Schlamm- und Müllverbrennungsanlagen. |

**Tab. 10-1:** Beispiele für Gasreinigungsverfahren in der chemischen Industrie und Raffinerien [62]

**zu a)** Bei den physikalischen Wäschen wird der Absorptions- und Regenerationsverlauf nur von der Druck- und Temperaturfunktion der Lösungsgleichgewichte Gas/Flüssigkeit bestimmt. Beispiele sind die Druckwasserwäsche, das Purisol-, das Rectisol- oder das Selexolverfahren.

**zu b)** Je nach Art der Regeneration unterscheidet man chemische Wäschen mit thermischer, chemischer oder ohne Regeneration. Beispiele sind die Alkazid-, die Heißpottasche-, die Äthanolamin- oder die Sulfinol-Wäsche.

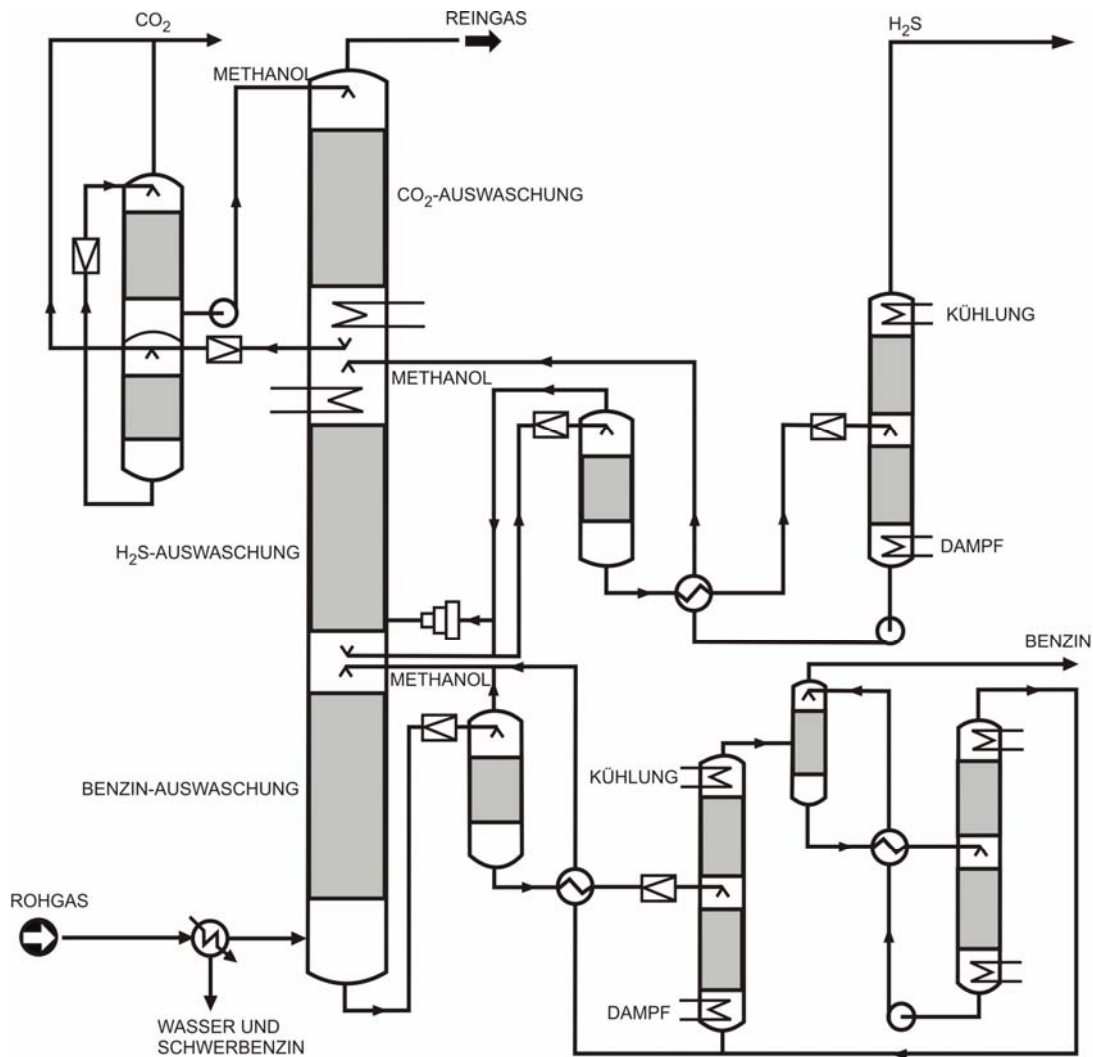
Vor Fischer-Tropsch-Anlagen zur BtL-Herstellung sind die Anforderungen an die Reinheit des Synthesegases sehr hoch. Dabei spielt es keine Rolle, ob ein kobaltbasierter oder eisen-

basierter Katalysator verwendet wird. Unter dem Gesichtspunkt einer maximalen Lebensdauer des Materials wird häufig das **Rectisol-Verfahren** genannt [64].

Das Rectisol- Verfahren ermöglicht eine Totalreinigung von Druckgasen in einer Verfahrensstufe. Als Waschflüssigkeit wird kaltes Methanol eingesetzt, welches alle Gasverunreinigungen absorbieren kann. Methanol zeichnet sich besonders durch seine zunehmende Absorptionsfähigkeit mit sinkender Temperatur aus. Beispielsweise löst Methanol bei – 60°C 75-mal soviel CO<sub>2</sub> wie es die gleiche Menge Wasser bei + 25°C vermag. Demzufolge ist dieses Verfahren besonders wirtschaftlich, wenn

- große Mengen von Gasverunreinigungen zu entfernen sind
- eine besonders hohe Gasreinheit gefordert wird
- der Einbau des Verfahrens in den Kälteteil einer Tieftemperatur-Gaszerlegung möglich ist.

Durch die Rectisol- Wäsche können H<sub>2</sub>S, organische Schwefelverbindungen, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, Blausäure, Kohlensäure, Harzbildner, höhere Kohlenwasserstoffe, H<sub>2</sub>O, Eisen- und andere Metallkomplexe aus Druckgasen jeder Art mit hohen Gehalten an Verunreinigungen entfernt werden [65]. Das Verfahren besteht aus etlichen Apparaten mit verschiedenen Druckstufen (s. **Abb. 10-2**). Betriebswirtschaftlich bedeutend ist die Kälteanlage zum Ausgleich der Kälteverluste beim Waschmittel. Die niedrigste Temperatur des Methanols liegt in der Stufe der CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus dem Rohgas bei einem Niveau von ca -60 °C.



**Abb. 10-2:** Grundfließbild einer Rectisol-Anlage [65]

Ein apparatetechnisch einfacheres Verfahren arbeitet mit dem Lösungsmittel, welches sich als Gemisch aus Dimethylethern des Polyethylenglycols ergibt: Die sogenannte Selexol-Wäsche (s. **Abb. 10-3** [63]). Sie entfernt die für Synthesegase schwierigen Stoffe  $H_2S$ , andere Schwefelkomponenten und  $CO_2$  mit einer gewissen Selektivität.

Die Wäsche arbeitet bei einem Druck von ca 25 bar. Der Gefrierpunkt des Lösungsmittels liegt im Bereich  $-22$  bis  $-29$  °C, so daß eine minimale Arbeitstemperatur von  $-10$  °C (unter Annahme eines Sicherheitsabstandes von ca 10 °C) in Frage kommt. Trotzdem muß der Bedarf an elektrischer Energie beachtet werden. Nachteil des Verfahrens ist der Umstand, daß nicht alle Verunreinigungen vollständig entfernt werden. Ob eine ausreichende Wirkung bei Anlagen zur BtL-Produktion erreicht werden kann, ist noch unbekannt. Verunreinigungen wie Staub,  $HCl$ ,  $NH_3$  und Teere sind auf jeden Fall vorher zu entfernen [66].

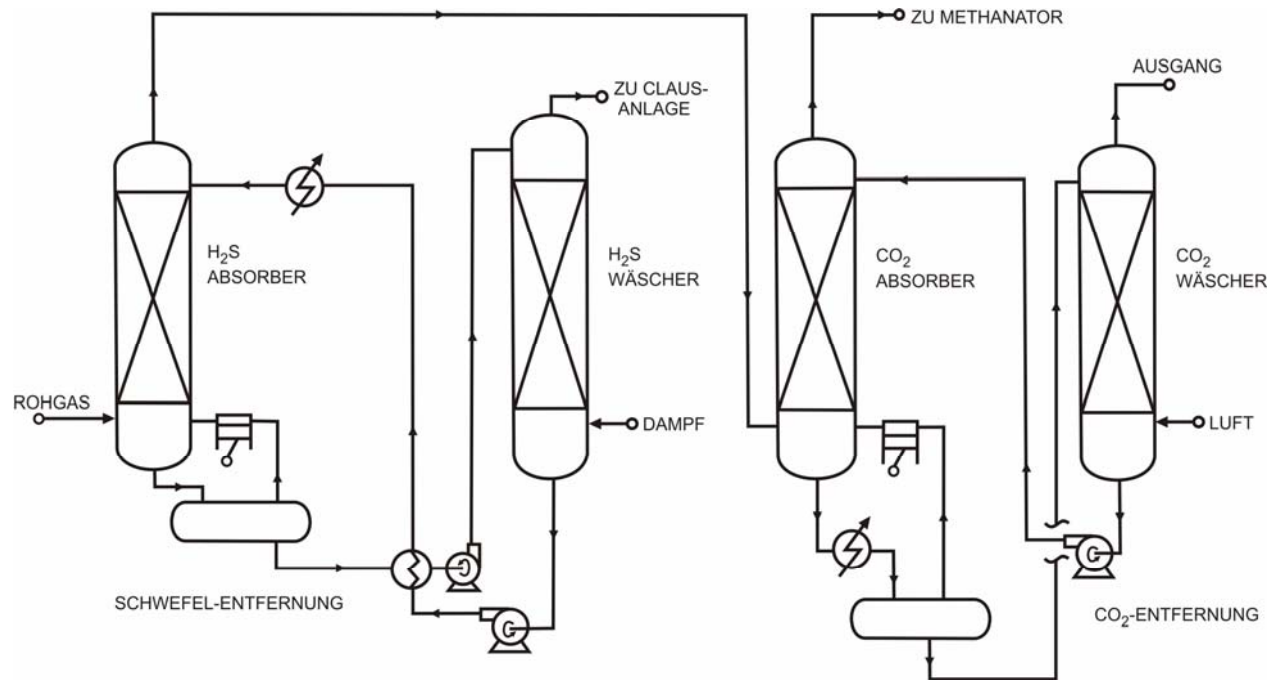


Abb. 10-3: Grundfließbild einer Selexol-Anlage [63]

Variationsmöglichkeiten hinsichtlich erhöhter Endreinheiten ergeben sich, wenn die Vorgänge im Selexol-Prozess apparatetechnisch in Stufen aufgeteilt werden [67]. Ziele sind:

1. Abscheidung der Mineralien aus der thermischen Zersetzung der Biomasse in trockener Form.
2. COS-Hydrierung zu  $H_2S$  in einer ersten Stufe
3.  $H_2S$ -Entfernung in einem oxidativen Schritt wie z.B. Sulferox.
4. Einfache Selexol-Stufe zur Abtrennung von  $CO_2$ .

Staub, saure Komponenten wie  $HCl$  und  $NH_3$  und Teere sind vorher zu entfernen. Eine mögliche Schaltung zeigt Abb. 10.4.

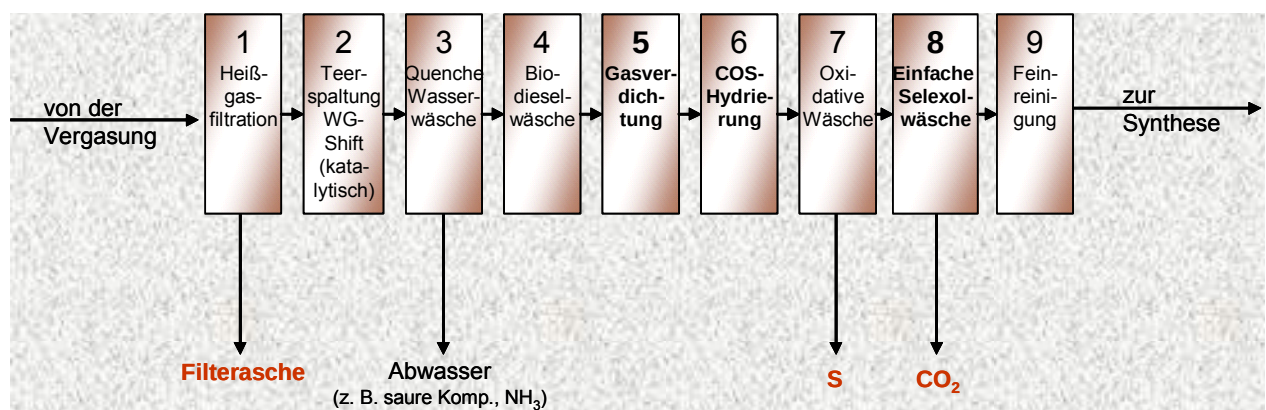


Abb. 10.4: Gasreinigungskonzept mit selektiver Abtrennung von Komponenten [67]

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden die Varianten Rectisol und das Konzept des modifizierten Selexolverfahrens mit selektiver Abtrennung von Komponenten herangezogen. Dabei sind in allen Verfahren Heißgasfilter, Teerspaltung bzw. Wassergas-Shift, Wasserwäsche und Biodieselmischer vorgeschaltet. Der Unterschied liegt folglich in der Apparatetechnik für die Entschwefelung und CO<sub>2</sub>-Reduktion. Motivation für das Vorgehen ist:

- a) Rectisol: Vollständige Abtrennung von Verunreinigungen möglich → *Sehr reines Produktgas*.
- b) Selektives Selexolverfahren:
  - Gezielte Abtrennung biomassespezifischer Inhaltsstoffe mit hohem Recyclingpotenzial.
  - Preiswerter als Rectisol.
  - Betriebswirtschaftlicher Vorteil wird durch die Gefahr einer geringeren Reinigungseffizienz als beim Rectisol erkauft.

## 11. Vorschläge zum Brennstoffmanagement

BtL-Anlagen werden das ganze Jahr über mit maximaler Verfügbarkeit produzieren. Es ist zu erwarten, daß die Anlagen über das Jahr gesehen unterschiedliche Biomassen mit differierenden Eigenschaften bekommen werden. Eine Variation in kurzen Zeiträumen wie Tagen wird durch unterschiedliche Lieferanten entstehen. Der einfachste Weg wäre es, in die Lieferverträge strenge Vorgaben bezüglich der Eigenschaften an die Biomassen hineinzuschreiben. Fraglich bleibt dann, ob sich die benötigten Mengen erzielen lassen. In jedem Fall wären die Landwirte in ihren Freiheitsgraden eingeschränkt, was entsprechende Preisaufschläge erwarten läßt.

Der Betriebsleiter wird unabhängig von der Gestaltung der Lieferverträge versuchen, besonders kurzfristige Schwankungen auszugleichen und für seinen Feuerraum am Eingabeschacht möglichst konstante Bedingungen einzustellen. Als technische Variationsmöglichkeit zur Einstellung des Brennstoffmenüs bietet sich der Lager- und Mischraum an (s. **Abb. 11-1**).



**Abb. 11-1:** Von der Brennstoffannahme bis zur Übergabe Feuerraum

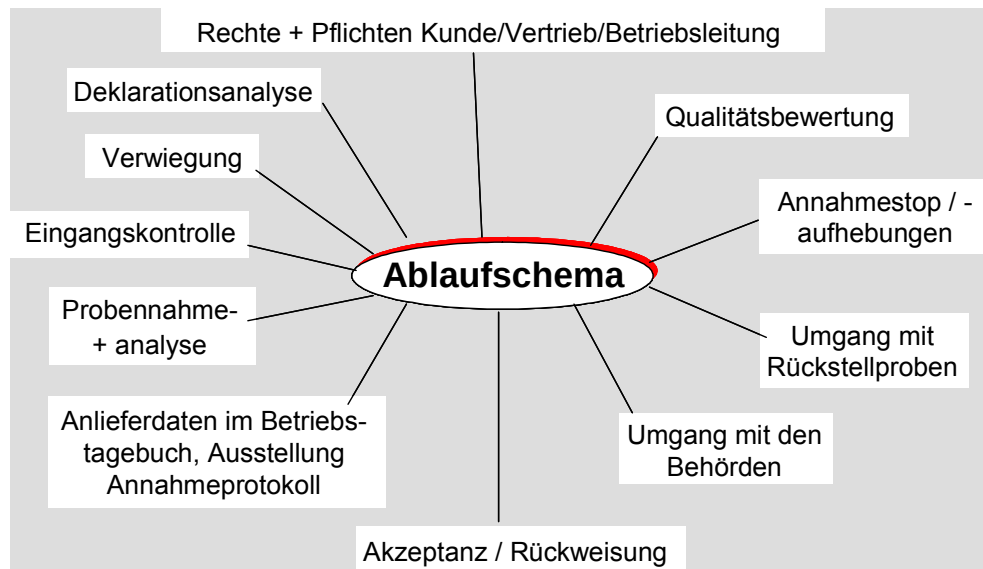
In Müllverbrennungsanlagen herrschen ähnliche Zwänge. Die Eigenschaften des Brennstoffs wechseln sowohl jahreszeitlich als auch kurzfristig aufgrund einer Vielzahl an Lieferanten. Die Wärmefreisetzung aber sollte konstant gehalten werden, um Schäden zu vermeiden, eine gleichmäßige Stromproduktion zu gewährleisten und Emissionsspitzen zu vermeiden.

Das betriebsbedingte Eigeninteresse zur Überwachung der Brennstoffeigenschaften wird i.d.R. begleitet von Vorgaben der Genehmigungsbehörden, welche Ablaufschema zur genehmigungskonformen Annahme von Abfällen vorschreiben. Die komplexen Regelwerke beinhalten mindestens die Themengebiete

- Formulargestaltung
- Kommunikations- und Genehmigungswege
- Überwachung der Eingangseigenschaften
- Handelnde Personen und Rechte und Pflichten.

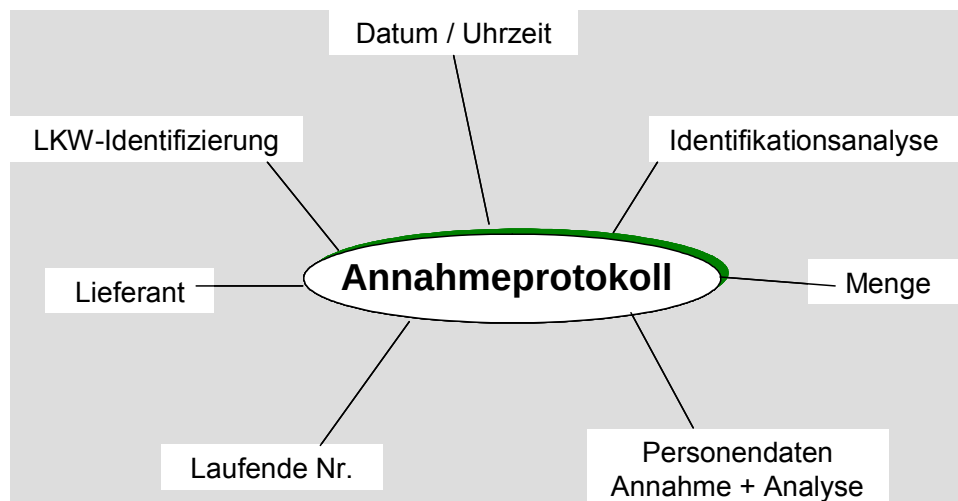
In der Detaillierung ergibt sich eine Aufteilung (s. **Abb. 11-2**), welche sich zu einem mehrseitigen Papier summieren kann.





**Abb. 11-2:** Themengebiete im Ablaufschema zur genehmigungskonformen Abfallannahme einer thermischen Abfallbehandlungsanlage (exemplarisch)

Ein wichtiges Instrument für das Brennstoffmanagement kann das Annahmeprotokoll sein (s. **Abb. 11-3**). In diesem Papier lassen sich ungefähre Eigenschaften sowie die Menge der jeweiligen Lieferung ablesen. Die Einhaltung der Identifikationsanalyse ist für jeden Lieferanten genehmigungsrechtlich verpflichtend. Bei Abweichungen muß der Anlagenbetreiber die Lieferung zurückweisen.



**Abb. 11-3:** Annahmeprotokoll einer thermischen Abfallbehandlungsanlage (exemplarisch)

Die Betriebserfahrungen und formalen Vorlagen anderer Branchen ließen sich für zukünftige Betreiber von BtL-Anlagen nutzen, um kurz- und langfristige Schwankungen in den Brennstoffeigenschaften zu minimieren. Ein vollständiger Ausgleich wird sich nicht erreichen lassen.

## 12. Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

### 12.2 Exemplarisches Beispiel ArtFuel - Konzept

Nach Auskunft von [61] sind autotherme Wirbelschichten bis zu einer Größe von 500 MW<sub>therm</sub> technisch möglich. Die Referenzdaten als Grundlage für die Parametervariationen im folgenden Kapitel zeigt **Tab. 12-1**.

|                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Konzept = ArtFuel                                                                                                                                      | Input = Biomassemix mit 5 % der Anliefermenge<br>= Biomasse als Siedlungsabfall und 95 % der Anliefermenge als Energiepflanzen.                                         |
| Größe der Anlage = 500 MW <sub>therm</sub> FWL*<br>Input = 1.019.200 t <sub>FS</sub> /a<br>Stunden auf Vollast = 8.000 h/a                             | <i>Preise:</i><br>Biomasse zur Beseitigung = 0 €/t<br>Energiepflanzen = 55,- €/t <sub>FS</sub> mit Wassergehalt = 10 Gew.-%.                                            |
| Referenz-Biomasse = Weizenstroh mit H <sub>u</sub> = 14,1 MJ/kg, Wassergehalt = 10 Gew.-%, Aschegehalt = 7 Gew.-%                                      | <i>Erlöse:</i><br>Naphta = 34.560 t/a zu 500 €/t<br>Straight Run Diesel = 48.800 t/a zu 1.508 €/t<br>Wachs = 38.800 t/a zu 1.158 €/t<br>Strom = 3.649 kW zu 11 cent/kWh |
| Energieausbeute, gespeichert in den Kohlenwasserstoffen nach FTS = 38 %, bezogen auf Energieinhalt der Biomasse. Keine externe H <sub>2</sub> -Zugabe. | <i>Ansatz:</i> Stickstoff und Wärme keine verkaufsfähigen Produkte                                                                                                      |
| Mittlere Transportentfernung = 50 km, eigener LKW mit 11,4 €/t <sub>FS</sub> im Inbetriebnahmejahr der BtL-Anlage                                      | <i>Annahme:</i> Ascheentsorgung mit Kosten von 10,- €/t möglich                                                                                                         |
| Transport und Aufbereitung als durchsatzabhängige Kostengruppen auf Seiten der BtL-Anlage                                                              | Betriebszeit = 20 Jahre, lineare Abschreibung, Interner Zinsfuß = 10 %                                                                                                  |

Technische Größen; Kaufmännische Grundlagen

**Tab. 12-1:** Wichtige Daten der Referenzanlage gemäß ArtFuel-Konzept

Wegen der Größe der Anlage wird eine finanziell mittlere Transportentfernung von 50 km zugrunde gelegt. Die Energiepflanzen werden nur aus der unmittelbaren Umgebung mit dem Traktor angeliefert; der weitaus größere Teil sollte von Lastkraftwagen eingesammelt und transportiert werden. Die Logistik muß nicht unbedingt vom Biomasseproduzenten bewältigt werden; die Einschaltung eines Lohnunternehmens oder durch den Betreiber der BtL-Anlage selber ist ebenfalls denkbar.

**Tab. 12-2** zeigt den geschätzten Investbedarf für das Anlagenkonzept aus Betreibersicht. Die Aufstellung der Kosten geht davon aus, daß die Auftragsvergabe an einen Generalunternehmer (Abk. GU) erfolgt. In die Investkosten eingeflossen sind Leistungen auf Bauherrenseite wie Grundstückskosten, Baufeldvorbereitung, Bahnumladestation, Straßenanbindung, Fahrzeuge/Container/Lader, Anschluß des EVU, Gebühren, Unvorhergesehenes und Bauzeitinsen. Die Kosten gehören nicht in Lieferverträge mit Anlagenbauern. Zu berücksichtigen auf Bauherrenseite sind ferner Vorbereitungskosten wie Umweltverträglichkeitsuntersuchung, Öffentlichkeitsarbeit, Projektsteuerung, Bauleitung, Gutachter, Vertragsgestaltung, Projektmanagement und vieles mehr.

In der angestellten Betrachtung besitzen die Bauherrenkosten außerhalb des eigentlichen Anlagenbaus einen Umfang von 86,8 Mio €. Dies macht, bezogen auf die gesamten Herstellungskosten von 383,4 Mio € einen Anteil von 23 % aus. Legt man den angesetzten Lieferumfang des GUs in Höhe von 296,6 Mio € zugrunde, entsprächen die 86,8 Mio € einem Aufschlag von ca 30 % an Kosten auf Bauherrenseite.

Es ist zu beachten, daß der exakte Wert stark von den Standortbedingungen abhängt (z.B. Grundstückskosten, Verkehrsanbindung oder EVU-Anschluß). Auch der Punkt *Unvorhergesehenes* kann durch Randbedingungen wie der Sorgfalt des Projektmanagements auf Bauherrenseite oder der Erfahrung des GUs stark beeinflusst werden.

Aus der Unsicherheit der angesetzten Beträge auf Bauherrenseite im Rahmen dieser Studie sollte nicht geschlossen werden, daß die Kosten zu vernachlässigen sind.

|                                                           | AK<br>€            | Planung +<br>Bauzeitinsen<br>€ | AK/HK<br>€         | steuerl. ND<br>a | kalk. ND<br>a | Reparatur / Instandhaltung<br>% v. AK/HK | €                 |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|------------------|---------------|------------------------------------------|-------------------|
| Grundstückskosten                                         | 4.530.000          | 1.119.489                      | 5.649.489          |                  |               |                                          | 0                 |
| Anlieferung, Zerkleinerung, Lagerung u. Brennstoffaufgabe | 3.775.000          | 649.910                        | 4.424.910          | 15               | 20            | 3,00%                                    | 113.250           |
| Bauteil Thermisch. System, AGR, FTS + Außenanlagen        | 32.604.700         | 5.613.277                      | 38.217.977         | 25               | 25            | 0,50%                                    | 163.024           |
| Maschinen- + Anlagentechnik Vergasung                     | 12.684.000         | 2.183.697                      | 14.867.697         | 15               | 20            | 5,00%                                    | 634.200           |
| Maschinen- + Anlagentechnik Rohgasreinigung               | 64.477.000         | 11.100.462                     | 75.577.462         | 13               | 20            | 4,00%                                    | 2.579.080         |
| Maschinen- + Anlagentechnik FTS                           | 35.862.500         | 6.174.145                      | 42.036.645         | 10               | 20            | 3,00%                                    | 1.075.875         |
| Maschinen- + Anlagentechnik Kessel u. Stromerzeugung      | 50.000.000         | 8.608.079                      | 58.608.079         | 15               | 20            | 4,00%                                    | 2.000.000         |
| Elektro- + Leittechnik                                    | 24.453.525         | 4.209.957                      | 28.663.482         | 15               | 20            | 4,00%                                    | 978.141           |
| Nebenanlagen, Wärmetauscher, Rohrleitungstechnik          | 32.604.700         | 5.613.277                      | 38.217.977         | 15               | 17            | 5,00%                                    | 1.630.235         |
| Engineering, IBS, Probetrieb GU                           | 8.151.175          | 823.516                        | 8.974.691          | 16               | 20            | 0,00%                                    | 0                 |
| Vorbereitung des Baufeldes                                | 755.000            | 239.703                        | 994.703            | 25               | 25            | 0,00%                                    | 0                 |
| Luftzerlegungsanlage                                      | 15.000.000         | 2.582.424                      | 17.582.424         | 15               | 20            | 3,00%                                    | 450.000           |
| Bahnumladestation (Gleis + Containerstellplatz)           | 2.000.000          | 339.804                        | 2.339.804          | 25               | 25            | 0,50%                                    | 10.000            |
| Straßenanbindung                                          | 1.000.000          | 169.902                        | 1.169.902          | 25               | 25            | 0,00%                                    | 0                 |
| Fahrzeuge, Container und Lader                            | 2.000.000          | 238.263                        | 2.238.263          | 5                | 8             | 10,00%                                   | 200.000           |
| Anschluß des EVU                                          | 800.000            | 95.305                         | 895.305            | 20               | 20            | 0,10%                                    | 800               |
| Summe Gebühren                                            | 2.301.023          | 493.819                        | 2.794.843          | 16               | 20            | 0,00%                                    | 0                 |
| Erstausstattung Ersatz- und Verschleißteillager           | 9.903.678          | 1.709                          | 9.905.386          |                  |               | 6,00%                                    | 594.221           |
| Unvorhergesehenes                                         | 30.290.230         | 0                              | 30.290.230         | 16               | 20            | 4,00%                                    | 1.211.609         |
| <b>Summe</b>                                              | <b>333.192.531</b> | <b>50.256.738</b>              | <b>383.449.269</b> |                  |               |                                          | <b>11.640.434</b> |
| <b>Gesamt</b>                                             |                    |                                | <b>383.449.269</b> |                  |               |                                          | <b>11.640.434</b> |

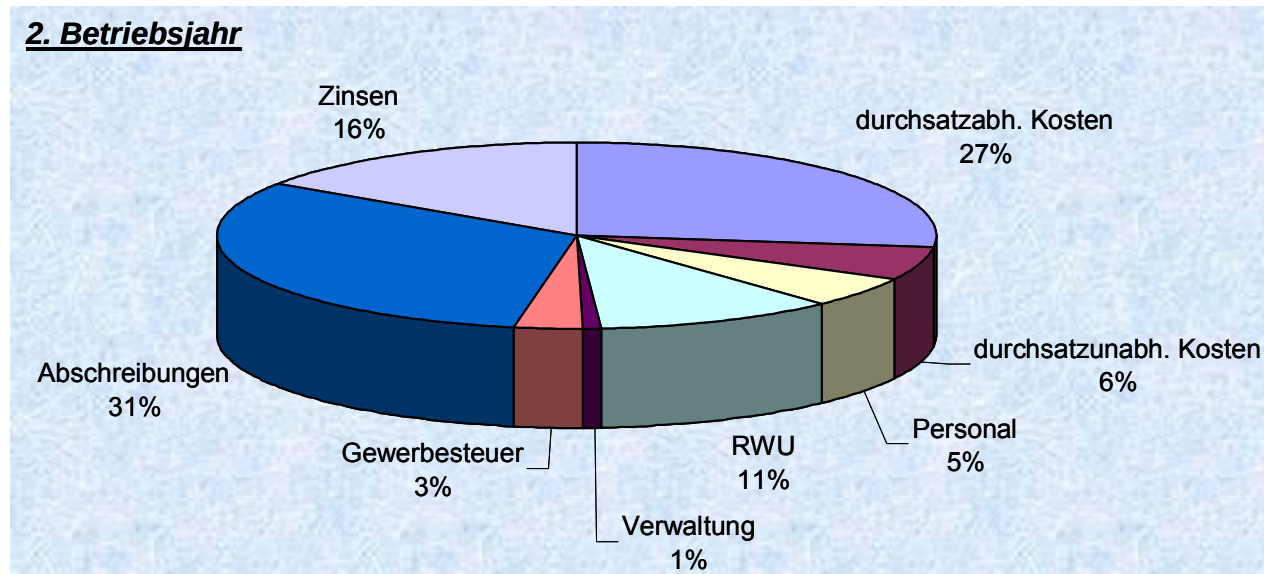
**Tab. 12-2:** Darstellung des Modules *Invest* für die 500 MW<sub>therm</sub>-Anlage gemäß ArtFuel-Konzept mit den Voraussetzungen gemäß Tab. 12-1

Die Ergebnisrechnung in **Tab. 12-3** sowie die Kostenstruktur in **Abb. 12-1** zeigen den Degressionseffekt der hohen Anlagengröße bei den Punkten Personal, Abschreibungen und Zinsen. Ein Anstieg des Anteils der durchsatzabhängigen Kosten ist besonders wegen der gestiegenen Punkte Transport und Zerkleinerung zu verzeichnen. Hinzu kommt beim ArtFuel-Verfahren der Einsatz von Branntkalk.

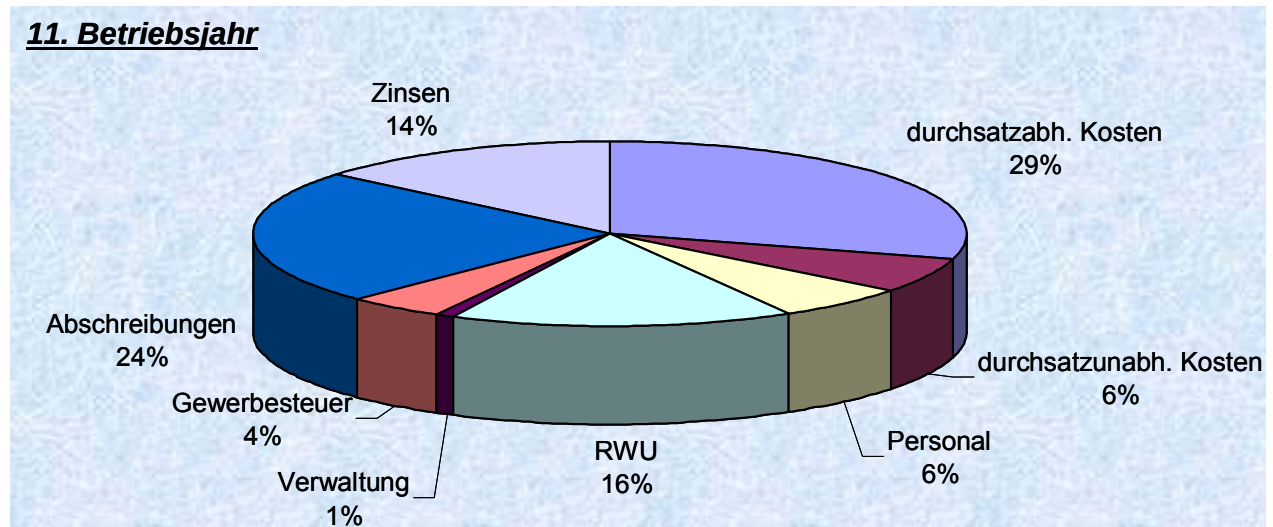
| Werte in €                       | 2012              | 2013              | 2014              | 2015              | 2016              | 2017              | 2018              |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Brennstoffkosten                 | -53.253.200       | -54.576.922       | -55.935.721       | -57.330.593       | -58.762.567       | -59.797.748       | -61.201.732       |
| Erlöse OUTPUT                    | 139.011.920       | 142.137.758       | 145.339.938       | 148.620.537       | 151.981.701       | 154.434.132       | 157.723.137       |
| sonst. Erlöse                    | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| <b>SUMME ERLÖSE</b>              | <b>85.758.720</b> | <b>87.560.836</b> | <b>89.404.217</b> | <b>91.289.945</b> | <b>93.219.134</b> | <b>94.636.384</b> | <b>96.521.406</b> |
| Beseitigung Aschen               | 1.386.112         | 1.413.834         | 1.442.111         | 1.470.953         | 1.500.372         | 1.530.380         | 1.560.987         |
| Beseitigung Adsorbens + Schwefel | 509.600           | 519.792           | 530.188           | 540.792           | 551.607           | 562.640           | 573.892           |
| <b>WERTSCHÖPFUNG</b>             | <b>83.863.008</b> | <b>85.627.210</b> | <b>87.431.918</b> | <b>89.278.200</b> | <b>91.167.154</b> | <b>92.543.364</b> | <b>94.386.526</b> |
| Gehälter Angestellte             | 1.350.844         | 1.391.369         | 1.433.110         | 1.476.104         | 1.520.387         | 1.565.998         | 1.612.978         |
| Löhne gewerb. Mitarb.            | 2.651.614         | 2.731.162         | 2.813.097         | 2.897.490         | 2.984.415         | 3.073.947         | 3.166.165         |
| Jahresgeh.                       | 100.386           | 103.397           | 106.499           | 109.694           | 112.985           | 116.375           | 119.866           |
| <b>SUMME PK</b>                  | <b>4.102.843</b>  | <b>4.225.929</b>  | <b>4.352.707</b>  | <b>4.483.288</b>  | <b>4.617.786</b>  | <b>4.756.320</b>  | <b>4.899.010</b>  |
| Instandhaltungskosten            | 9.894.369         | 8.904.932         | 10.294.102        | 12.352.922        | 12.599.981        | 12.851.980        | 13.109.020        |
| sonst. durchsatz.abh.Kosten      | 24.685.484        | 20.043.992        | 20.564.628        | 21.100.467        | 21.652.005        | 21.889.395        | 22.393.929        |
| durchsatz.unabh.Kosten           | 4.613.522         | 4.707.792         | 4.804.028         | 4.902.272         | 5.002.567         | 5.099.220         | 5.202.364         |
| Verwaltungskosten                | 654.198           | 667.282           | 680.628           | 694.240           | 708.125           | 722.287           | 736.733           |
| Gewerbesteuer                    | 1.346.072         | 2.564.069         | 2.506.021         | 2.337.583         | 2.480.668         | 2.665.139         | 2.804.762         |
| Abschreibungen                   | 25.671.669        | 25.671.669        | 25.671.669        | 25.671.669        | 25.671.669        | 25.224.016        | 25.224.016        |
| Zinsen                           | 12.645.710        | 12.645.710        | 12.645.710        | 12.645.710        | 12.645.710        | 12.645.710        | 12.645.710        |
| <b>SUMME KOSTEN</b>              | <b>83.613.866</b> | <b>79.431.374</b> | <b>81.519.492</b> | <b>84.188.150</b> | <b>85.378.511</b> | <b>85.854.068</b> | <b>87.015.543</b> |
| <b>DB III</b>                    | <b>249.142</b>    | <b>6.195.835</b>  | <b>5.912.427</b>  | <b>5.090.050</b>  | <b>5.788.643</b>  | <b>6.689.296</b>  | <b>7.370.984</b>  |

**Tab. 12-3:** Ergebnisrechnung für die ersten sieben Betriebsjahre gemäß ArtFuel-Konzept mit den Voraussetzungen gemäß Tab. 12-1

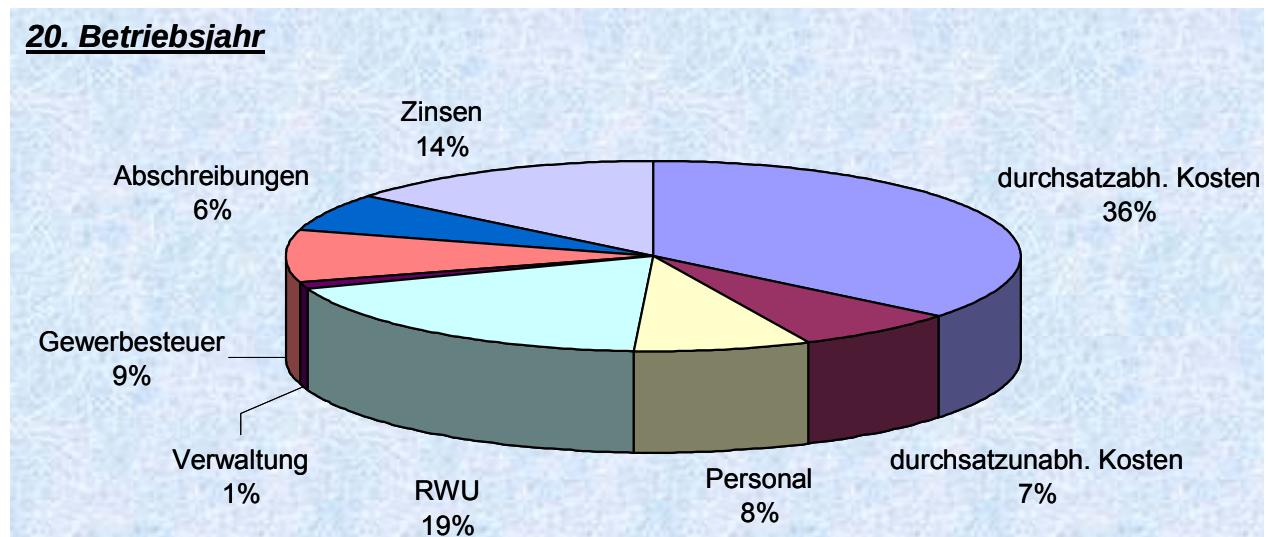
## 2. Betriebsjahr



## 11. Betriebsjahr



## 20. Betriebsjahr



**Abb. 12-1:** Kostenaufteilung über eine Betriebszeit von 20 Jahren ohne Brennstoffkosten für das ArtFuel-Konzept mit den Voraussetzungen gemäß Tab. 12-1

## 12.2 Parametervariationen an der ArtFuel-Anlage

### 12.2.1 Referenzzustand

Um die Auswirkung verschiedener Parameter auf die Wirtschaftlichkeit einer kommerziellen BtL-Anlage und den m#246;glichen Biomasse-Annahmepreis darzustellen, wurden Sensitivit#228;tsanalysen durchgef#252;hrt. Diese ver#228;ndern einen technischen oder preislichen Parameter bei konstanten sonstigen Bedingungen. Bei der Variation eines technischen Parameters werden alle damit unmittelbar zusammenh#228;ngenden Gr#246;#223;n technisch sinnvoll ebenfalls ge#228;ndert. Beispiel: Beim #220;bergang von Stroh auf Holz sind Heizwert, Ascheanteil, Strom- und Kohlenwasserstoffausbeute anzupassen.

Als Bezugsgr#246;#223;e dient eine 500 MW<sub>therm</sub>-Anlage. Die entsprechende Bilanzierung entstammt dem Projekt RENEW [7].

Die in der BtL-Anlage freiwerdende W#228;rme wird verstromt. Eine kommerzielle Nutzung als verkaufsf#228;higes Produkt ist nicht vorgesehen, da eine Anlage damit rechnen mu#223;, keine Abnehmer in nennenswertem Umfang zu finden. Eine Nutzung der Restw#228;rme auf einen niedrigen Wassergehalt der Biomasse erscheint bei feucht angelieferten Materialien ratsam, um den Sauerstoffverbrauch der Vergasung zu minimieren.

### 12.2.2 Wirtschaftlichkeit als Funktion der Biomasseeigenschaften

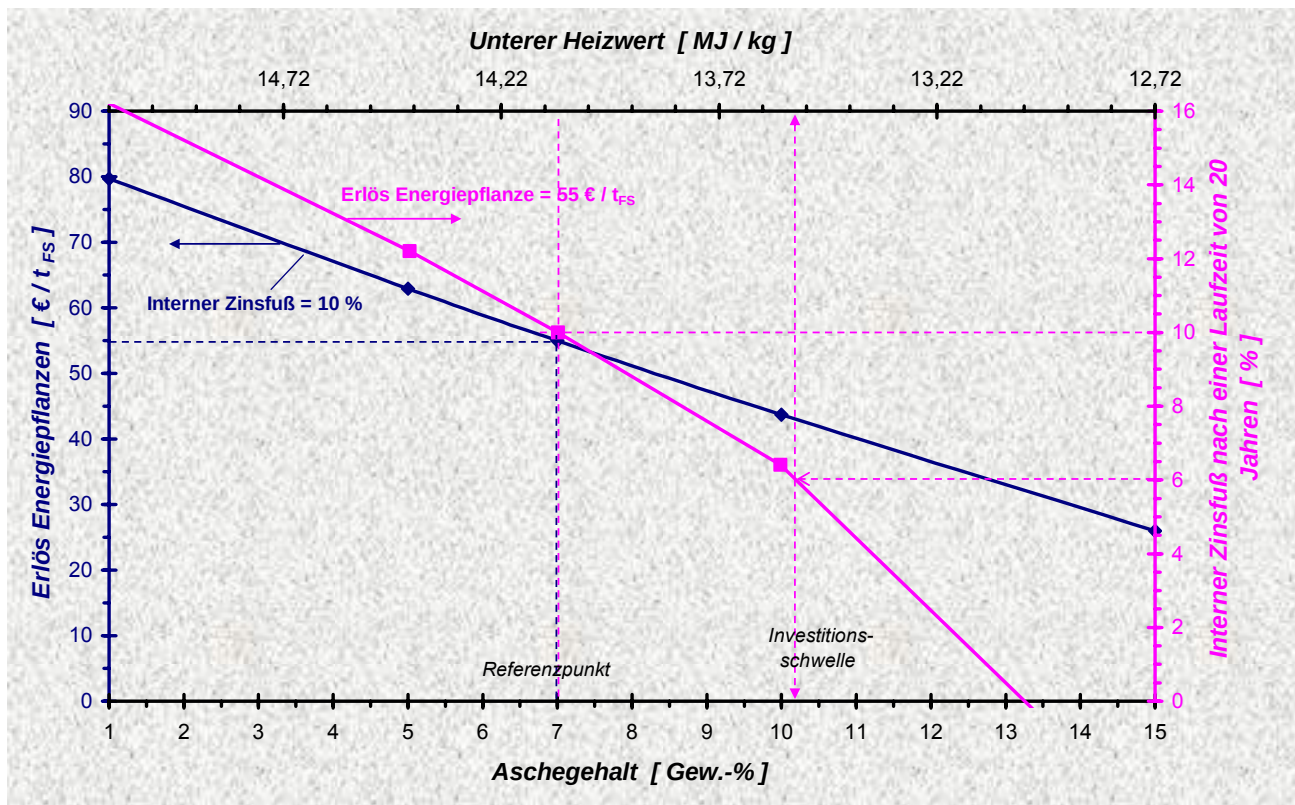
Im Kap. 9 wurden die qualitativen Anforderungen an Biomasse aus technischer Sicht der Anlagenbetreiber geschildert. Wie beeinflussen nun aber Charakteristika der Materialien den m#246;glichen Annahmepreis?

Eine wesentliche Gr#246;#223;e sind Aschegehalt und Heizwert (s. **Abb. 12.2.2-1**). Auf der unteren X-Achse ist der Aschegehalt der Biomasse dargestellt; auf der oberen Achse der damit korrespondierende Heizwert bei Festlegung eines konstanten Wassergehaltes von 10 Gew.-%. Die blaue Kurve mit der zugeh#246;rigen linken Y-Achse bildet den Erl#246;s der Energiepflanze ab, welche der Landwirt frei Feld erzielt, wenn der BtL-Anlagenbetreiber seine Rentabilit#228;t bei 10 % Internem Zinsfu#223; h#228;lts und dementsprechend f#252;r die Biomasse den Preis ansetzt.

Die rote Kurve mit der rechten Y-Achse gilt f#252;r den Fall, da#223; der Biomassepreis konstant gehalten wird. Gezeigt wird die Sensibilit#228;t f#252;r den Internen Zinsfu#223; bei #220;nderung der Eigenschaft *Aschegehalt*.

Beide Kurven zeigen eine starke Abh#228;ngigkeit von dieser Materialeigenschaft.





- Bem.:** 1. Der Heizwert des Referenzmaterials Weizenstroh wurde im CUTEC-Institut nach verschiedenen Methoden gemessen und errechnet. Es ergaben sich als Ergebnis: 15,1 MJ/kg gemäß Direktbestimmung, 14,9 MJ/kg gemäß Formel von Boje aus der Elementanalyse, 14,1 MJ/kg gemäß Verbandsformel aus der Elementanalyse. Gemäß Festlegung wird für vergleichende Betrachtungen immer die Verbandsformel benutzt in dieser Arbeit.
2. Der Heizwert gemäß der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird nur durch die Änderung des Aschegehaltes variiert. Der Wassergehalt bleibt konstant bei 10 Gew.-%. Dies entspricht dem Analysewert.
3. Der Begriff *Erlös Energiepflanzen* müßte aus Sicht eines BtL-Anlagenbetreibers eigentlich als Kosten gesehen werden. Um aber herauszustellen, daß in der vorliegenden Studie zu dem Preis für die Pflanzen (zu zahlen an den Landwirt) die Kosten für Aufbereitung und Transport durch eine Partei X (z.B. der Landwirt, ein landwirtschaftliches Lohnunternehmen oder der BtL-Produzent) hinzukommen, wird die kleine sachliche Unstimmigkeit in Kauf genommen, um die Schnittstelle *Abgabe beim Landwirt* deutlich zu machen.

**Abb. 12.2.2-1:** Energiepflanzenerlös und Interner Zinsfuß als Funktion des Heizwertes

Die Ursachen für den hohen Einfluß des Mineraliengehalts auf den möglichen Annahmepreis sind:

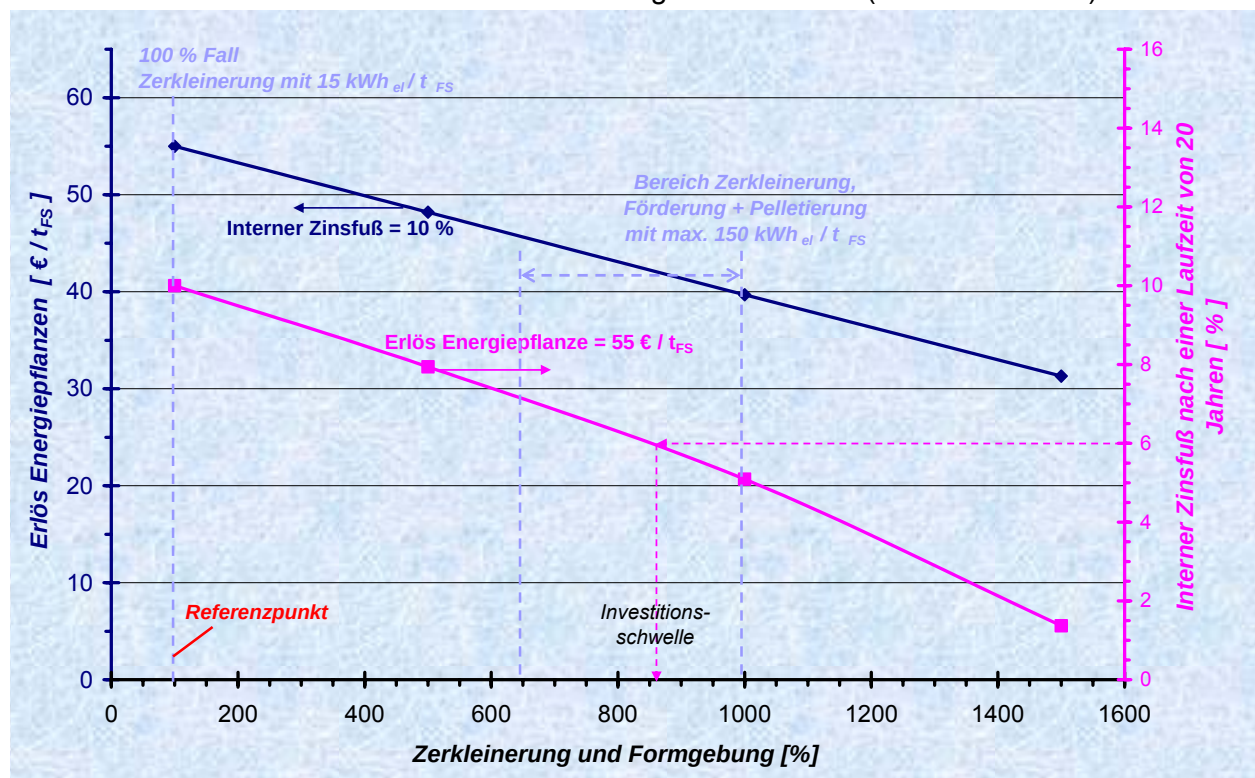
1. Asche stellt ein Inertmaterial dar. Es ist im Input zu bezahlen; liefert aber kein verkaufsfähiges Produkt. Um die Feuerungswärmeleistung auf dem Nennwert zu halten, ist mehr Brennstoff einzukaufen. *Beispiele:* Bei einem Aschegehalt von 1 Gew.-% beträgt der Nenndurchsatz der BtL-Anlage 949.770 t<sub>FS</sub>/a; bei 15 Gew.-% sind dies 1.127.972 t<sub>FS</sub>/a. Der Erlös aus Kohlenwasserstoffen und elektrischem Strom muß somit auf mehr Brennstoff verteilt werden.
2. Die Mineralien in der Asche sind zu erwärmen. Dies steigert den Verbrauch an Sauerstoff im Falle sauerstoffeinsetzender Verfahren (→ *Rückgang des Stromerlöses*) und

Brennstoff-Kohlenstoff ( $\rightarrow$  Rückgang der Kohlenwasserstofflöse); im Falle allothermer Verfahren sind mehr sonstige Energieträger fossilen oder alternativen Ursprungs einzusetzen ( $\rightarrow$  zusätzliche Brennstoffkosten).

### 3. Die Asche verursacht Entsorgungskosten.

Für die alternativen Verfahren aus Kap. 9 mag der in Abb. 12.2.2-1 dargestellte Zusammenhang anders aussehen; das Gleiche gilt auch bei anderen Anlagengrößen. An den in den Punkten 1 bis 3 genannten Ursachen für den Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit ändert dies nichts.

Für Transportzwecke hilfreich wäre eine Pelletierung der Biomasse. Die Schüttdichte der Pellets ist hoch, Lagerung und Umgang mit dem Material wären erleichtert. Leider erfordert jegliche Formgebung i.d.R. elektrische Energie, die zunehmend teurer wird. Der Einfluß des Aufwandes auf die Wirtschaftlichkeit der BtL-Anlage ist sehr stark (s. **Abb. 12.2.2-2**).



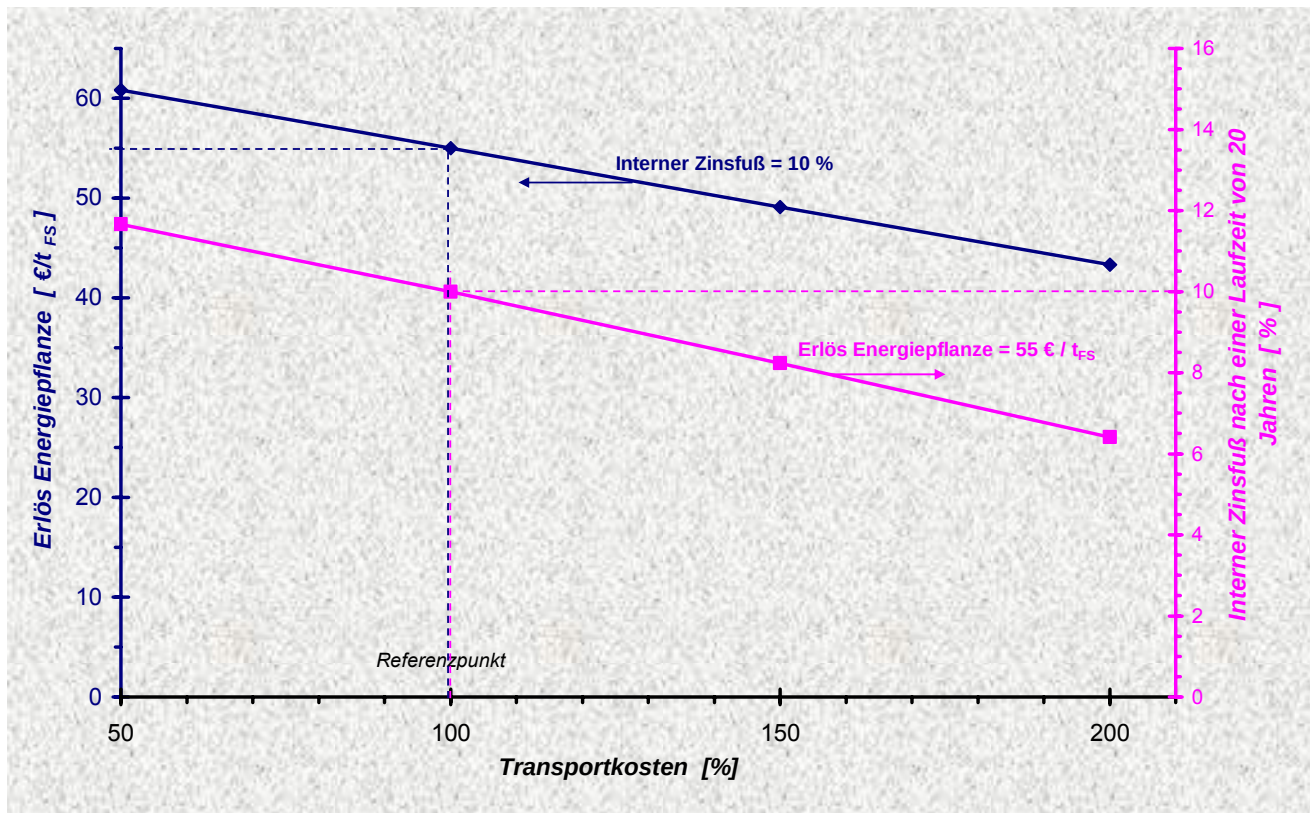
Anmerk.: Ausgangspunkt ist der in Tab. 12-1 beschriebene Referenzzustand als 100 %-Fall.

**Abb. 12.2.2-2:** Biomasse mit Zerkleinerung und Formgebung

Aufgrund des hohen Einflusses müssen auch Anforderungen bezüglich sehr feiner Biomassen, welche evtl. zweistufige Zerkleinerungsvorgänge erfordern, im Planungsstadium kommerzieller BtL-Anlagen sehr genau geprüft werden. Tiefere Ursache dafür ist, daß die einzusetzende elektrische Energie sehr hochwertig ist und sie dazu dient, einen Energieträger ( $\rightarrow$  Kraftstoff) zu produzieren, der auf die Energieeinheit bezogen einen niedrigen Erlös erzielt.

Große BtL-Anlagen benötigen eine große Masse an Input. Der Transport dürfte nicht aus der unmittelbaren Umgebung kommen. Eine Erhöhung der Schüttdichte über eine geeignete Form-

gebung um den Faktor zwei bis drei senkt die Transportkosten signifikant. **Abb. 12.2.2-3** in Vergleich mit Abb. 12.2.2-2 aber zeigt, daß der Aufbereitungsaufwand sehr genau überlegt sein muß.



**Abb. 12.2.2-3:** Möglicher Erlös für die Energiepflanzen und Wirtschaftlichkeit als Funktion der Transportkosten

In Kap. 7 wurden Möglichkeiten des Einsatzes von Pflanzennährstoffen (Erdalkali, Alkali, Phosphor) in die verschiedenen BtL-Verfahren aufgezeigt. Kap. 10 diskutierte verschiedene Gasreinigungsrouten zur Abscheidung von Staub, Teeren, sauren Komponenten (N-Verbindungen, HCl, S-Verbindungen) bzw. CO<sub>2</sub>. Es wurde dargelegt, daß HCl sehr einfach (In-Situ mit Branntkalk bei Wirbelschichten oder über einfache Wäscher) abzutrennen ist ebenso wie die N-Verbindungen. Für die Schwefel- und CO<sub>2</sub>-Abtrennung setzen die BtL-Routen auf Varianten der Selexol-Wäsche oder des Rectisol-Verfahrens. Für den Biomasse-Einsatz optimierte Selexolwäschen für die BtL-Routen sind noch zu entwickeln. Sollte die Forschung erfolgreich sein und auch stark schwefelhaltige Biomasse zu verarbeiten sein, ergäbe sich ein großer Vorteil für die Erlössituation in der Landwirtschaft (s. **Abb. 12.2.2-4**)

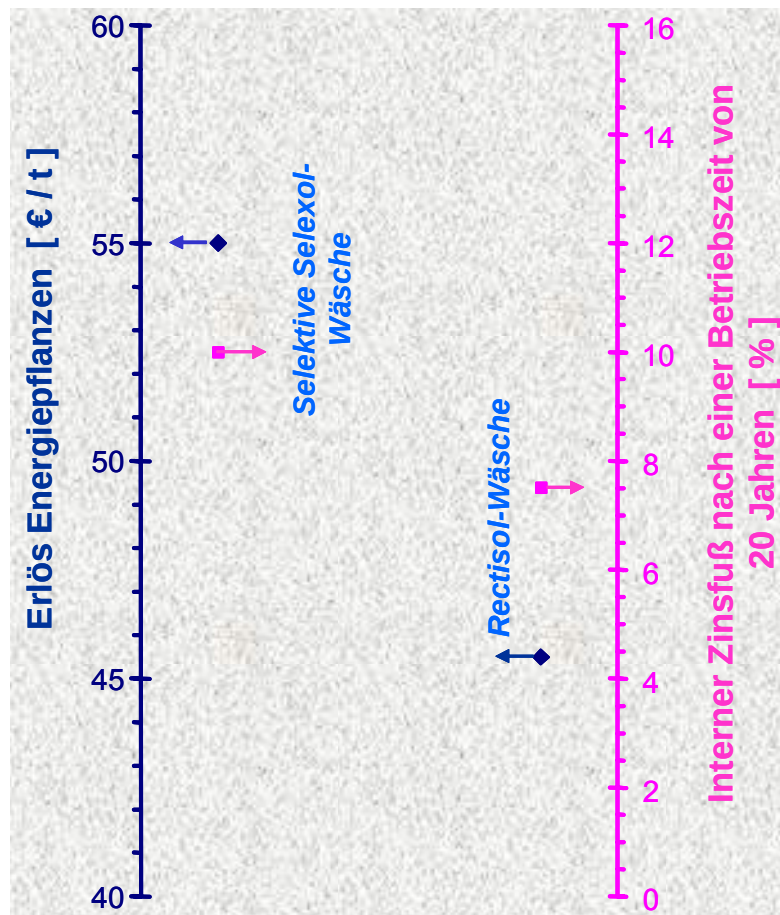


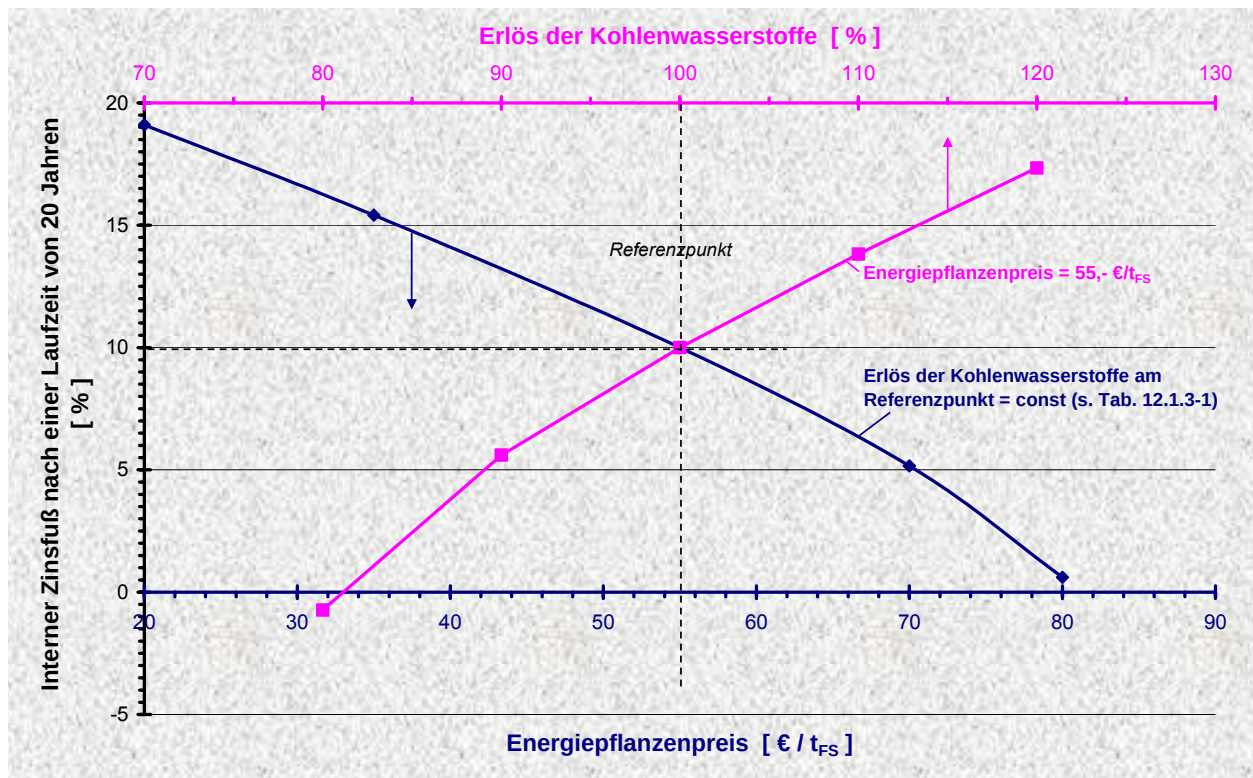
Abb. 12.2.2.-4: Vergleich der Varianten *Selektive Selexol-* und *Rectisol-Wäsche*

Der betriebswirtschaftliche Nachteil des Rectisolverfahrens resultiert v.a. aus zwei Punkten:

1. Aufwändige Apparatechnik mit damit verbundenen Invest- und RWU-Kosten.
2. Etwas höherer Stromverbrauch.

Der große Vorteil des Verfahrens liegt in dem Umstand, daß es Stand der Technik ist. Garantien für die Reinigungswirkung sind leichter zu geben als beim Selexolverfahren. Aus Gründen des FTS-Katalysatorschutzes und einer besser gesicherten Verfügbarkeit der Gesamtanlage könnten sich potenzielle Betreiber einen Einsatz trotz der primären finanziellen Nachteile des Einsatz überlegen.

Abschließend soll noch die Frage beantwortet werden, wie Biomasseproduzenten von Schwankungen des Treibstoffpreises betroffen sein werden, falls es Preisgleitklauseln in den Verträgen gäbe. **Abb. 12.2.2-5** zeigt die hohe Abhängigkeit des Energiepreises vom Erlös der Kohlenwasserstoffe. Zu beachten für die Landwirtschaft ist, daß sie einen geringeren Erlös aufgrund sinkender Kraftstoffpreise nicht einfach weitergeben kann, da sie vom Kunden „Natur“ abhängig ist.

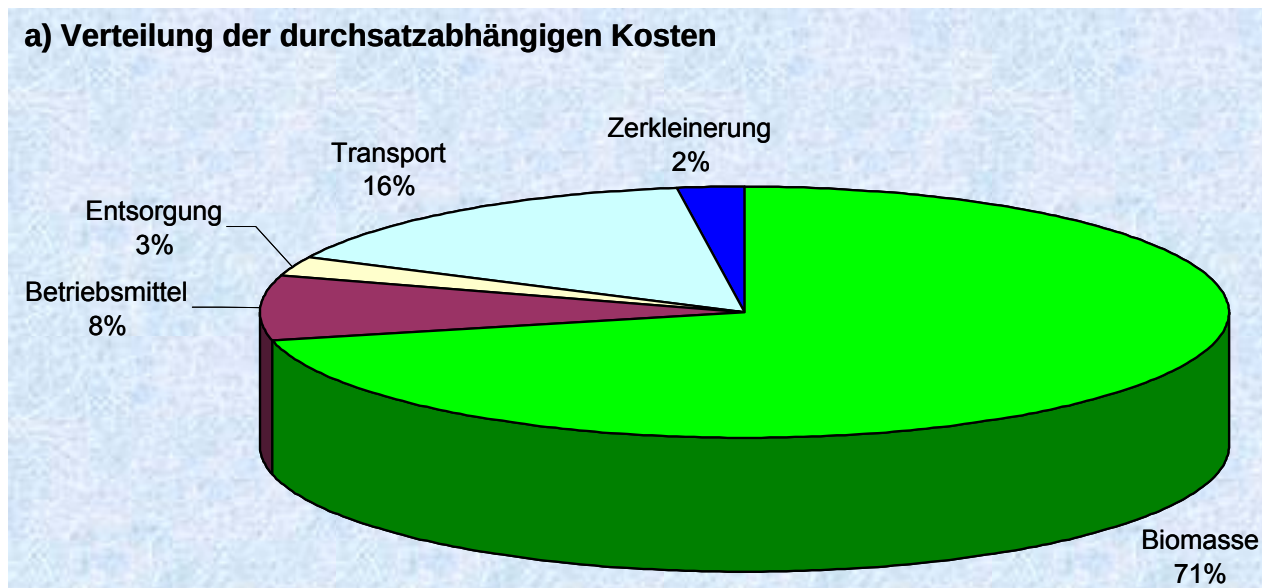


**Abb. 12.2.2-5:** Abhängigkeit von Energiepflanzenpreis und Kohlenwasserstoferlös

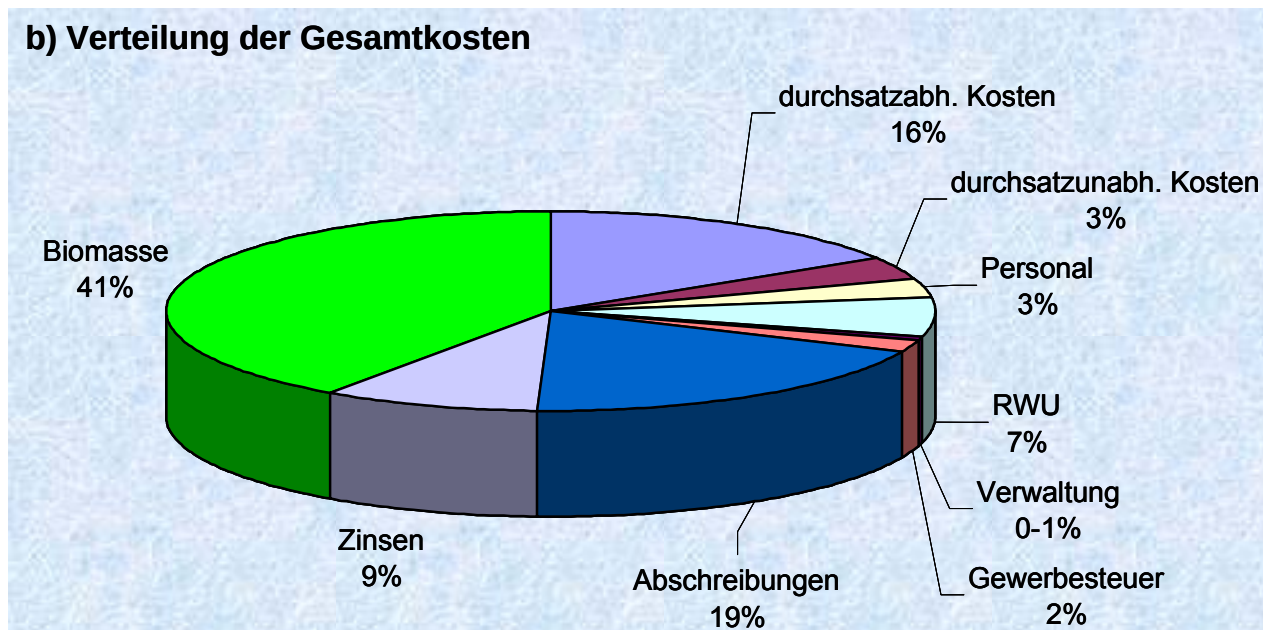
Die Ursache für die starke Abhängigkeit liegt in dem Umstand, daß mit den in dieser Arbeit angesetzten Rahmenbedingungen die Brennstoffkosten einen hohen Anteil an den Aufwendungen einnehmen (s. **Abb. 12.2.2-6**). Das exakte Ausmaß wird später in den kommerziellen Anlagen von den spezifischen Bedingungen abhängen.



**a) Verteilung der durchsatzabh#228;ngigen Kosten**



**b) Verteilung der Gesamtkosten**



**Abb. 12.2.2-6:** Zusammensetzung der Kosten unter den angesetzten Randbedingungen beim ArtFuel-Konzept zu Beginn des kommerziellen Betriebes



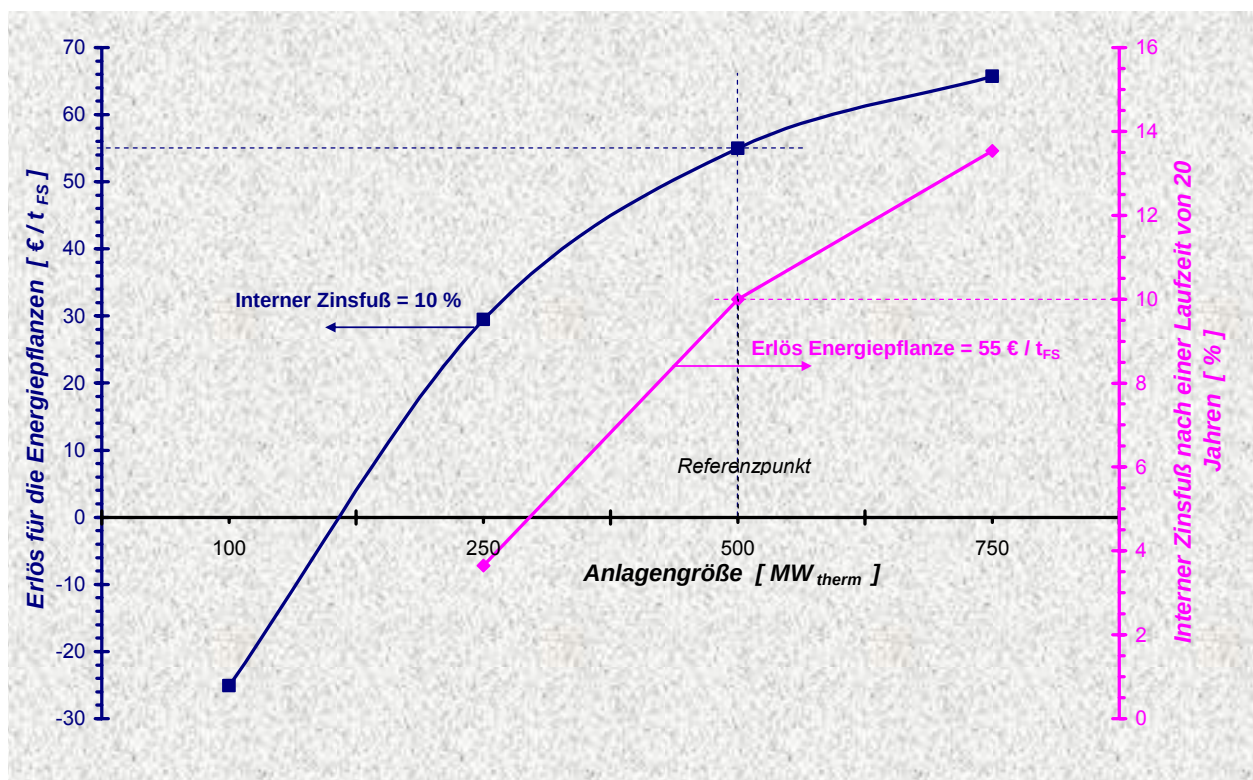
### 12.2.3 Anlagentechnische Gesichtspunkte

Alle bisherigen Betrachtungen fußten auf einer Anlagengröße von 500 MW<sub>therm</sub>. In dieser Größenordnung zeigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen Größenordnungen an Preisen für Biomasse und Kohlenwasserstoffen, die nach dem derzeitigen Stand des Wissens am Markt durchsetzbar sein könnten. Geht man zu niedrigeren Anlagengrößen über, steigen die Anforderungen an niedrige Biomassepreise und/oder hohe Kohlenwasserstoffpreise stark an (s. **Abb. 12.2.3-1**).

Wie zu sehen ist, müßte bei der angenommenen Erlössituation bei einer Anlagengröße von 100 MW<sub>therm</sub> der Biomasseproduzent für sein Material sogar noch zahlen, damit die BtL-Produktion wirtschaftlich ist.

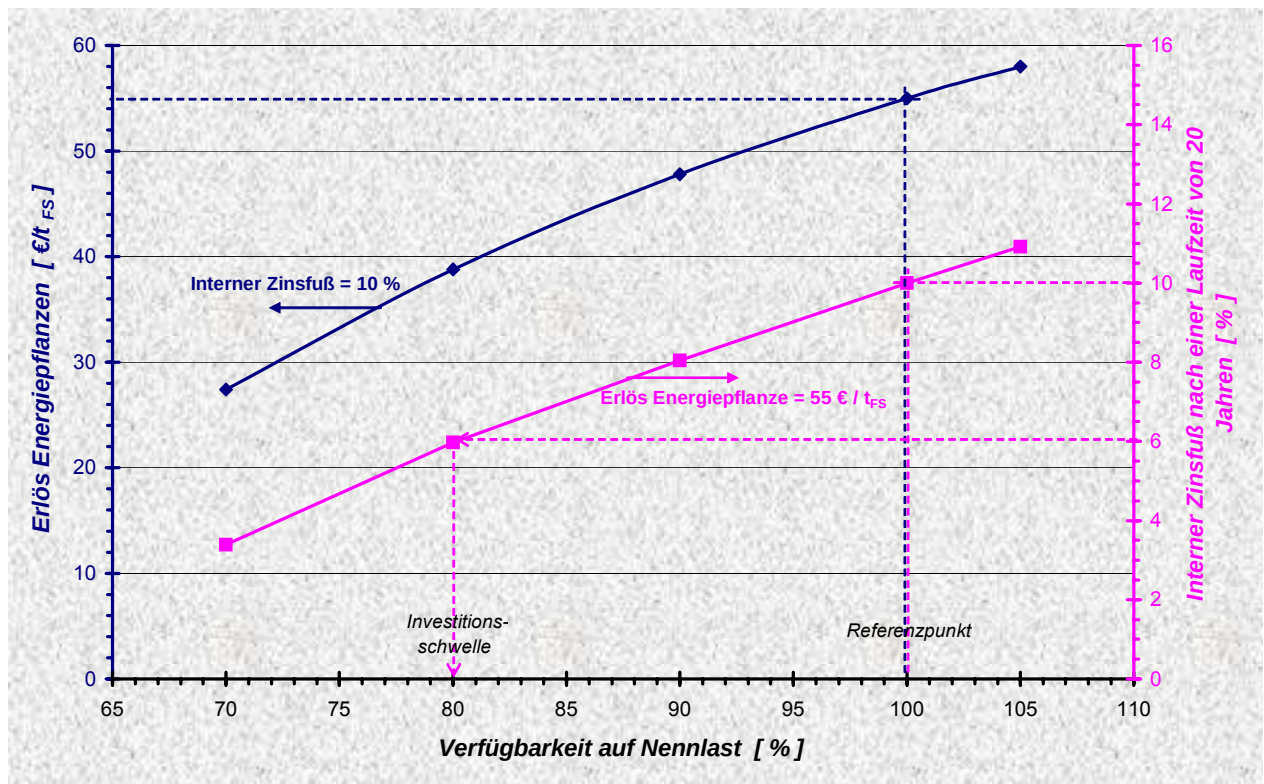
Auf der anderen Seite besteht eine gute Chance zur Erhöhung des Biomassepreises und/oder Absenkung der notwendigen Kohlenwasserstoffpreise, wenn die Anlagenkapazität steigt.

Bei der Betrachtung wiederholt werden muß, daß die Berechnung ohne Wärmeerlös durchgeführt wird. Bei kleineren Anlagenkomplexen aber könnten durchaus benachbarte Industrieunternehmen eine gesicherte ganzjährige Dampfabnahme sicherstellen. In diesem Falle sähe die Kurve nicht so ungünstig aus Sicht der Biomasselieferanten aus. Die exakte Situation müßte eine Einzelfallbetrachtung zeigen.



**Abb. 12.2.3-1:** Einfluß der Anlagengröße auf mögliche Biomassepreise und Internen Zinsfuß

Eine hohe Anlagengröße nützt nichts, wenn die Kapazität nicht maximal genutzt wird. Die den bisherigen Berechnungen zugrundeliegende Nutzungsdauer auf Vollast von 8.000 h/a entspricht einer Jahresverfügbarkeit von 91 %. Es sollte darauf geachtet werden, daß der Wert eingehalten bzw. soweit als möglich überschritten wird (s. **Abb. 12.2.3-2**)



**Abb. 12.2.3-2:** Bedeutung der Anlagen-Verfügbarkeit auf Nennlast unter den angesetzten Randbedingungen

Eingetragen in die Graphik ist auch die Darstellung der „Investitionsschwelle“. Angesetzt wurde ein Wert von 6%. Dies ist ein Erfahrungswert aus der Finanzwirtschaft als ungefähre Rendite bei langfristig angelegtem Kapital. Der Interne Zinsfuß muß mit deutlichen Abstand darüber liegen, um das Risiko des Investors zu bezahlen.

## 13. Empfehlungen zur Maximierung der Wirtschaftlichkeit

Die Betrachtungen dieser Arbeit ergaben einen zur Wahrung der Wirtschaftlichkeit der BtL-Anlage hohen notwendigen Dieselpreis, der über anderen Berechnungen liegt [z.B. 48,72]. Es wurde ausführlich dargelegt, daß die traditionelle Forstwirtschaft mit Waldholz nur einen sehr kleinen Beitrag zum Biomasseinput zu vertretbaren Preisen leisten können und die Potenziale bei Energiepflanzen liegen.

Zum Abschluß sollen einige Optimierungspotenziale genannt werden, welche sich aus den Sensitivitäts- und technischen Analysen ergaben:

### a) für Biomasseverkäufer:

1. Lieferung mineralienarmer Pflanzen an die BtL-Anlage z.B. durch Züchtung.
2. Maximierung des Ca- und/oder Mg-Gehaltes bei Lieferung der Pflanzen an BtL-Anlagen mit Wirbelschichtvergaser.
3. Die Aufbereitung der Biomasse ist zu optimieren hinsichtlich a) minimalen Stromverbrauch und b) maximaler Transportdichte.
4. Logistikkonzepte zur ganzjährigen Versorgung der BtL-Anlagen mit gesicherten Brennstoffeigenschaften sind aufzustellen.

### b) für Verfahrensentwickler von BtL-Technologien:

5. Optimierung der BtL-Verfahren zur Schaffung von Aschen, welche als Rohstoff in die düngermittelherstellende Industrie einzusetzen sind. Die Asche sollte zu einem verkaufsfähigen Produkt werden.
6. Versuchsergebnisse mit Synthesegasreinigungsverfahren als Alternative zur Rectisolwäsche sollten gesammelt werden.
7. Maximierung des Wirkungsgrades der BtL-Technikumsanlagen bzw. der Großanlagenkonzepte hinsichtlich Kohlenwasserstoffausbeute, Stromproduktion und Wärmenutzung ist anzustreben. Vertriebswege für den Stickstoffverkauf in Konzepten mit einer Luftzerlegungsanlage am Produktionsort sind zu finden.

## 14. Unterschrift

*Clausthal-Zellerfeld, den 31.07.2006*

Ort, Datum

*ppa S. Voegel*

Dr.-Ing. Stefan Voegel

## 15. Verwendete Unterlagen

- [1] DIN-(Vor-)Norm: *Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen*; Deutsche Fassung CEN/TS 14961:2005; Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN, Mai 2005
- [2] Heil, J.; Emundts, J.: *Thermische Abfallbehandlung - eine Verfahrensübersicht*; Unterlage des Lehr- und Forschungsgebietes Kokereiwesen, Brikettierung und Veredlungstechnik der RWTH Aachen, nießen\091195.doc, 1995
- [3] Scheffer, K.: *Biomasse - gespeicherte Sonnenenergie aus der Vielfalt der Pflanzenarten - Potenziale, Bereitstellung, Konversion*,  
[http://www.fv-sonnenenergie.de/publikationen/th00/th2000\\_04scheffer.pdf](http://www.fv-sonnenenergie.de/publikationen/th00/th2000_04scheffer.pdf)
- [4] Verbundprojekt *Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands*, Federführend: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Jena), Fördermittelgeber: BMVEL über die FNR (Gülzow)
- [5] Vortrag Frau Dr. Rottmann-Meyer: *Pflanzenbauliche Untersuchungen zur regional- und standortspezifischen Energiepflanzenerzeugung*, Start-Up-Meeting der Länderkooperation Niedersachsen / Brandenburg / Hessen / Volkswagen AG am 7.04.2005 in Wolfsburg
- [6] VDI-Richtlinie 2067, Blatt 1: *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*, September 2000
- [7] *RENEW - Renewable Fuels for Advanced Power Trains*, EU-Vorhaben, Contract No SES6-CT-2003-502705, 1.01.2004 bis 31.12.2007
- [8] Dernbach, M.; Gahler, A.; zum Hingst, J.; Pärish, P.: *Produktion, Bereitstellung und Verbrennung biogener Festbrennstoffe*; Projektarbeit, Technische Universität Clausthal, Januar 2003
- [9] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg): *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*; Springer Verlag, Berlin•Heidelberg•New York, 2001
- [10] Obernberger, I.: *Thermische Nutzung fester biogener Brennstoffe*; VDI Schriftenreihe *Regenerative Energien in Ungarn und in Deutschland*; ISBN 3-931384-32-2, VDI Verlag GmbH (Hrsg.), Düsseldorf, S. 59-101
- [11] Audits mit Forstamt Seesen, September 2005 in Clausthal
- [12] *Verordnung über die Entsorgung von Altholz (Altholzverordnung)*, Bundesgesetzblatt Teil I, S. 3302, <http://www.bundesanzeiger.de>; gültig ab 1.03.2003
- [13] *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)*, 29. März 2000, Verkündungsfundstelle BGBl I 2000, 305
- [14] Mantau, U.; Weimar, H.: ; *Altholzaufkommen und -verwertung*; Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft im Auftrage von Holzabsatzfonds (HAF), Verband Deutscher Papierfabriken (VDP) und Bundesverband der Altholzaufbereiter und -verwerter (BAV), Oktober 2001
- [15] -: *Vormarsch der Holzpellets*; Sekundär-Rohstoffe 09/2005, S. 275-77
- [16] *Die zweite Bundeswaldinventur - BWI*, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, 2004

- [17] Audit mit Forstamt Clausthal und Forstinformationszentrum Harz, 30.06.2005 in Clausthal
- [18] Informationsbroschüre: *Holzpellets*; Biomasse Info-Zentrum am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart, Juni 2002
- [19] Informationsbroschüre: *Holz-Heizungen: Brennstoffe, Technik, Förderung*; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg)
- [20] Hartmann, H.; Höldrich, A.: *Neue Umrechnungsfaktoren für Scheitholzraummaße*; Forstmaschinen-Profi November 2005, 13. Jahrgang, S. 28-30
- [21] Brüggemann, C.: *Heizwert von Holz im Vergleich zu anderen Brennstoffen*; Forstmaschinen-Profi November 2005, 13. Jahrgang, S. 38-39
- [22] Franke, A.: *Kerngeschäft Biomassekraftwerke am Beispiel der INNERGETIC AG*; EURO-FORUM-Fachtagung Biomasse-Energieträger für die Zukunft; München, 2+3. Juli 2001
- [23] *Markt- und Kostenentwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*; Ing.-Büro Fichtner im Auftrag der Bundesinitiative BioEnergie, April 2002
- [24] von Moos, A.: *Bündeltechnik setzt sich in der Schweiz durch*; Forstmaschinen-Profi November 2005, 13. Jahrgang, S. 12-14
- [25] *KTBL-Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/05*; Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), ISBN 3-7843-2178-X, Darmstadt 2004
- [26] [Hannover] Audit mit Landwirtschaftskammer Hannover, 26.08.2005 in Hannover
- [27] Stratmann, R.; Menz, M.; Schraa, M.: *ZMP-Marktbilanz Getreide•Ölsaaten•Futtermittel 2005*, Verlag ZMP Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle GmbH, Bonn 2005, ISBN 3-937856-25-0
- [28] Datensammlung: *Richtwert-Deckungsbeiträge 2004 der Landwirtschaftskammern Hannover und Weser-Ems*; Ausgabe 2004
- [29] Audit mit *Institut für Nutzpflanzenkunde* der Universität Kassel, 06.09.2005 in Rosdorf
- [30] Musterliefervertrag: Anbau- und Liefervertrag für Mais ab Ernte 2004, anonym
- [31] Audit mit Fa. AGRAVIS Raiffeisen AG, 26.07.2005 in Hannover
- [32] Musterliefervertrag: *Anbau- und Liefervertrag für Getreide*, anonym
- [33] Scheffer, K.: *Konzepte für die Bereitstellung von Biomasse für die Kraftstoffproduktion. Ökonomische und ökologische Optimierung des Anbaus und der Treibstoffnutzung*; Vortrag auf dem Workshop *Sp(i)rit vom Feld*, Naturschutzbund Deutschland e.V. und Volkswagen AG, Kassel, 19.09.2005
- [34] Heinz, A.; Stülpnagel, R.; Kaltschmitt, M.; Scheffer, K.; Jezierska, D.: *Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen*; Forschungsbericht, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (Universität Stuttgart) u. Institut für Nutzpflanzenkunde (Universität Gesamthochschule Kassel), April 1999, Band 63
- [35] Englisch, M.: *Biogene Brennstoffe - Feuerungstechnik für ein breites Brennstofffenster: Von Holzpellets bis Pferdemist*; VDI-Wissensforum *Einsatz von Biomasse in Verbrennungs- und Vergasungsanlagen*; VDI-Seminar 40 10 05, Leipzig, 11-12. November 2004
- [36] EU-Project *RENEW*: Contract No SES6-CT-2003-502705; Zwischenbericht der CUTec zum Workpackage 2.2 im Subproject 2 (Del. 2.2.12), 31. Juli 2006.



- [37] Gruber, T.: *Pelletfeuerungen mit Biomasse zur Wärmeerzeugung*; 6. FKS-Symposium, 17+18. Mai 2006, Braunschweig, ISBN-10: 3-00-018915-7
- [38] Kracek, F.C.; Bowen, N.L.; Morey, G.W.: *Equilibrium relations and factors influencing their determination in the system  $K_2SiO_3$  -  $SiO_2$* ; J. Phys. Chem., 41 [9] 1183-1193 (1937)
- [39] Kracek, F.C.: *The system sodium oxide-silica*; J. Phys. Chem., 34 [7] 1583-1598 (1930)
- [40] Phillips, B.; Muan, A.: *Phase equilibria in the system calcium oxide-iron oxide-silica in air*; J. Am. Ceram. Soc., 42 [9] 413-423 (1959)
- [41] Bowen, N.L.; Andersen, O.: *The binary system  $MgO$ - $SiO_2$* ; Am. J. Sci., 187 (37) [222] 487-500 (1914)
- [42] Roedder, E.W.: *The system  $K_2O$ - $MgO$ - $SiO_2$ . I. II*; Am. J. Sci., 249 [2] 81-130 (1951)
- [43] Segnit, E.R.: *Further data on the system  $Na_2O$ - $CaO$ - $SiO_2$* ; Am. J. Sci., 251 [8] 586-601 (1953)
- [44] Tien, T.Y.; Hummel, F.A.: *System  $SiO_2$ - $P_2O_5$* ; J. Am. Ceram. Soc., 45 [9] 422-424 (1962)
- [45] Vodegel, S.: *Mikrowellen-Sintern von Aluminiumoxid*; VDI-Fortschrittsberichte, VDI-Verlag GmbH, ISBN 3-18-335403-9, Düsseldorf 1994
- [46] Obernberger, I.: *Aschezusammensetzung und Ascheverwertung*, in *Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen*, gefördert durch BML und FNR (Gülzow), Förderkennzeichen FKZ 97 NR 022, 2001
- [47] -: *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau*; Hrsg.: Hydro Agri Dülmen GmbH (Dülmen), Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 12. Aufl., 1993
- [48] Henrich, E.; Dinjus, E.: *Das FZK-Konzept zur Kraftstoffherstellung aus Biomasse*, Symposium *Biomasse-Vergasung - Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung*, 1. bis 2. Oktober 2003, Leipzig
- [49] Schriftliche Auskunft der Fa FUTURE ENERGY GmbH: *Technical Information on GSP Process*; 14.10.2005
- [50] Informationsbroschüre: *Vergasungstechnik - Die Flugstromvergasungstechnik der Future Energy*; Hrsg.: FUTURE ENERGY GmbH, Freiberg, 1995
- [51] Audit mit Fa FUTURE ENERGY GmbH, 27.06.2005 in Freiberg
- [52] Schingnitz, M.; Volkmann, D.: *Erzeugung von Wasserstoff und Treibstoffen aus erneuerbaren Energierohstoffen*; ERDÖL ERDGAS KOHLE 120, Jg. 2004, Heft 2
- [53] Informationsbroschüre: *Erdöl und Erdgas: Suchen, Fördern, Verarbeiten*; Hrsg.: Mobil Oil AG, Hamburg, 12. Auflage 1994
- [54] Hofbauer, H.; Aichernig, C.: *Wirbelschichtvergasung auf Dampfbasis*; VDI-Berichte Nr. 1891, 1995, S. 197-210
- [55] Persönliche Gespräche von Vertretern der TU Wien und des CUTec-Instituts seit September 2004
- [56] Schriftliche Auskunft der Fa. REPOTEC Umwelttechnik GmbH, 1. Juli 2005
- [57] Homepage des EU-Projektes RENEW; <http://www.renew-fuel.com>, 2005
- [58] Homepage der Fa. Choren; <http://www.choren.de>, 2005
- [59] Vortrag der Fa. CHOREN, 1. Arbeitstreffen der BtL-Informationsplattform AG 1: *Biomassebereitstellung*, Träger: BMVEL / FNR, 23.06.2006, Dornburg



- [60] EU-Project *RENEW*: Contract No SES6-CT-2003-502705; Zwischenbericht der CUTec zum Workpackage 2.2 im Subproject 2 (Del. 2.2.1), 31. Mai 2005.
- [61] Schriftliche Auskunft der Fa. ENVIROTHERM GmbH, 12.07.2005
- [62] Senkel, N.; Hou, J.: *Recherche zur Synthesegasreinigung mittels flüssiger Absorbentien*, Projektarbeit, TU Clausthal + CUTec, Mai 2005
- [63] Kohl, A.; Nielsen, R.: *Gas Purification*; Gulf Publishing Company (Texas, USA), ISBN 0-88415220-0, 5. Auflage, 1997
- [64] Auftaktveranstaltung der BtL-Informationsplattform *Großtechnische Synthesegaserzeugung*, 14. April 2004, Freiberg
- [65] Lurgi Handbuch, Hrsg.: Lurgi AG, Frankfurt am Main, 2. Aufl. 1970
- [66] Schriftliche Auskunft der Fa. UOP (Antwerpen), 17.10.2005
- [67] Vodegel, S.: *Anforderungen an Biomasse aus der Sicht von Anlagenbetreibern*; 1. Fortschrittsstreffen der Länderkooperation *Biomasse für Sunfuel*, 26-27. April 2006
- [68] *AfA-Lexikon - Zweiter Hauptteil: Materialien und amtliche Texte*, Stand Juni 2005, Verlag Stollfuß
- [69] *Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen*; Hrsg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Gülzow), FKZ 22007303, 2005
- [70] Schindler, M.: *Sachstandsbericht SUNREG I*; 1. Fortschrittsstreffen der Länderkooperation *Biomasse für Sunfuel*, Werlte, 26-27. April 2006
- [71] Born, M.: *Dampferzeugerkorrosion - Wissensstand und Aufgaben*; in *Optimierung der Abfallverbrennung 3*, Hrsg: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.; TK Verlag, Neuruppin 2006, ISBN 3-935317-21-2, S. 641-660
- [72] -: *Biokraftstoffe - eine vergleichende Analyse*; Hrsg: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow 2006

## 16. Abkürzungsverzeichnis

|                |                                                                                |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| AK             | <b>A</b> nschaffungsk <b>o</b> sten                                            |
| BtL            | <b>B</b> iomass to <b>L</b> iquid                                              |
| CUTec          | <b>C</b> lausthaler <b>U</b> mwelt <b>t</b> echnik-Institut GmbH               |
| daf            | Wasser- und Aschefrei                                                          |
| DB             | <b>D</b> eckungs <b>b</b> eitrag                                               |
| EVU            | <b>E</b> nergieversorgungs <b>u</b> nternehmen                                 |
| FE             | Fa. <b>F</b> UTURE <b>E</b> NERGY                                              |
| FS             | <b>F</b> euchts <b>s</b> ubstanz                                               |
| FTS            | <b>F</b> ischer-Tropsch <b>S</b> ynthese                                       |
| FWL            | <b>F</b> euerungswärme <b>l</b> eistung                                        |
| FZK            | <b>F</b> orschungszentrum <b>K</b> arlsruhe                                    |
| GU             | <b>G</b> eneral <b>u</b> nternehmer                                            |
| HK             | <b>H</b> erstellungsk <b>o</b> sten                                            |
| HOAI           | <b>H</b> onorar <b>o</b> rdnung für <b>A</b> rchitekten und <b>I</b> ngenieure |
| HTV            | <b>H</b> ochtemperatur <b>v</b> ergaser                                        |
| H <sub>u</sub> | <b>U</b> nterer <b>H</b> eizwert                                               |
| k.A.           | <b>k</b> eine <b>A</b> ngabe                                                   |
| LR             | <b>L</b> urgi- <b>R</b> uhrgas                                                 |
| ND             | <b>N</b> utzungsb <b>a</b> uer                                                 |
| NTV            | <b>N</b> iedertemperatur <b>v</b> ergaser                                      |
| PK             | <b>P</b> ersonal <b>k</b> osten                                                |
| REM            | <b>R</b> asterelektronen <b>m</b> ikroskopie                                   |
| RWU            | <b>R</b> eparatur / <b>W</b> artung / <b>U</b> nterhaltung                     |
| Sblose         | <b>S</b> onnenblumenspelzen <b>l</b> ose                                       |
| Sbpel          | <b>S</b> onnenblumenspelzen in <b>P</b> elletform                              |
| Zkr            | <b>Z</b> uckerrübenschnitzel <b>p</b> ellets                                   |