

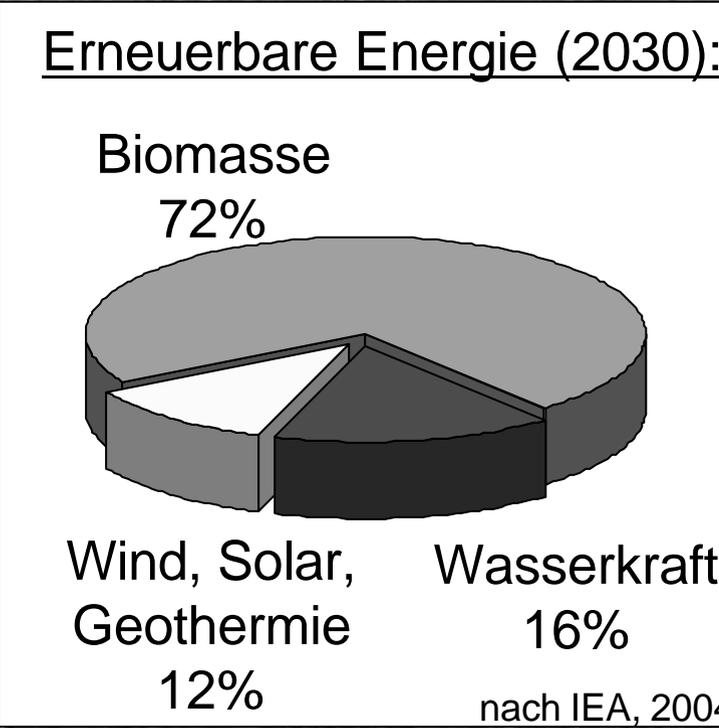
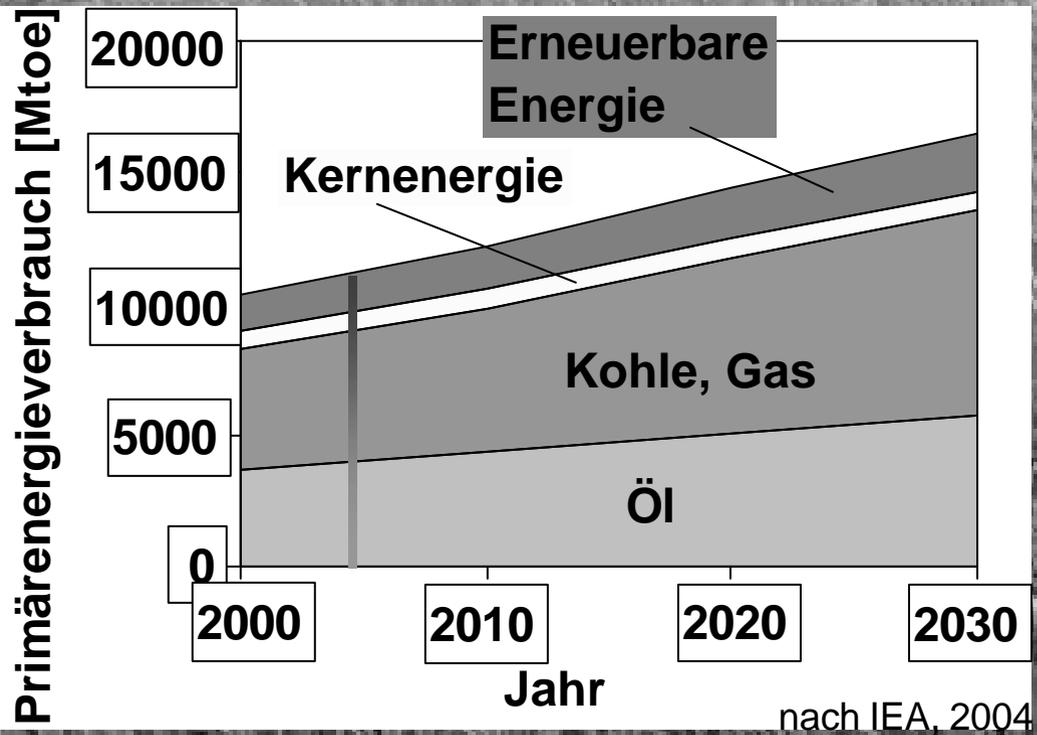


Salzhaltige Pflanzen zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe

**Thorsten Wüster
RWTH Aachen, 14. März 2005**

Motivation

Weltenergiebedarf



steigende Erzeugung erneuerbarer Energie aus Biomasse

Energiesituation in Entwicklungsländern

- Biomasse größte Energiequelle
- Energieversorgung von 2,4 Mrd. Menschen basiert auf Brennholz oder Holzkohle

Resultierende Probleme:

- Holzkahlschlag → Bodenerosion, Versteppung
- Schadstoffbildung bei Verbrennung → Atemwegserkrankungen

Steigender Einsatz von Diesel / Kerosin:

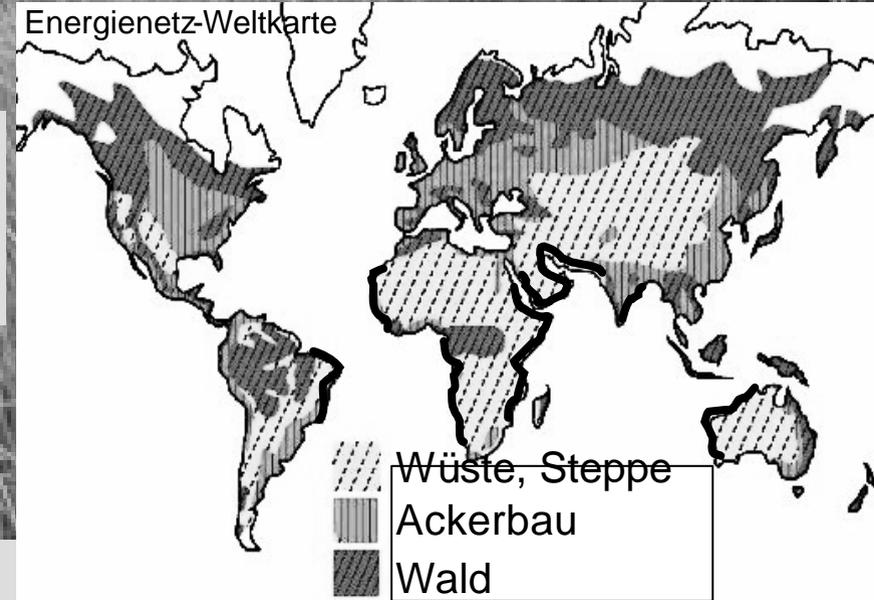
- Kerosinkocher
- Dezentrale Energieerzeugung mit Dieselmotoren
- Verkehrssektor



flüssige Kraftstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Voraussetzungen für Energiepflanzenanbau

Forderung:
Energiepflanzenanbau nicht in Konkurrenz zu anderen Landnutzungsarten



Neue Anbauflächen erschließen:
z.B. trockene & wüstenähnliche Gebiete

Küstennahe Wüsten zur Bewässerung mit Meerwasser

Identifizierte Anbaufläche: 0,5 Mio. km² (□ 25% der weltweit bewässerten Agrarfläche)*

Anbau salztoleranter Energiepflanzen

Gliederung

- Halophyten
- Bereitstellungskonzept
- Biomassekonversion
- Bewertung
- Zusammenfassung und Fazit

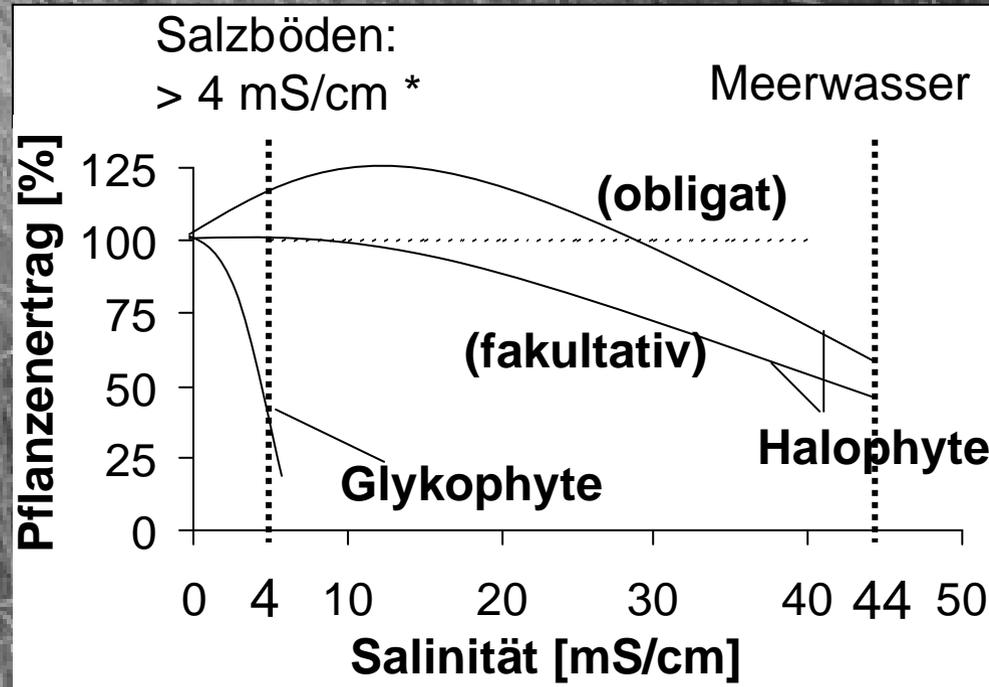
Halophyten

Anpassungsmechanismen:

- Salzfiltrierung
- Absalzhaare / Salzdrüsen
- Sukkulenz

Anforderungen an Energiepflanzen:

- Eignung für die Bewässerung mit Meerwasser
- schnelles Wachstum / hohe Hektarerträge
- geringer Wasserverbrauch
- geringer Aufwand für Anbau und Ernte



Halophyten:

Primärbiomasseproduktion: 16 ... 40 t_{tr}/ha/a *

Zusammensetzung der Pflanzensubstanz **:

| | Spartina alter. Gew.-% | Stroh Gew.-% |
|--------|---------------------------|-----------------|
| C: | 30,2 | 41,4 |
| H: | 5,1 | 5,9 |
| N: | 1,3 | 0,7 |
| NaCl: | 6 | ~0,8 |
| Asche: | 27,8 | 11,4 |



Scheinbare Summenformel: CH_{2,01}O_{0,88}

Heizwert: H_u= 11,4 MJ/kg (Stroh: 14,8 MJ/kg) **

* Glenn, Watson in „Towards the rational use of high salinity tolerant plants, 1993

** Lehr und Forschungsgebiet Kleingewässer, Biotritikologie und thermische Abfallbehandlung, RWTH Aachen

Bereitstellungskonzept: Anbau / Bewässerung

Forderung:

- Keine Salzwasservermischung mit Grundwasser → plastic beds
- Keine Salzansammlung im Boden → Drainagen, Auswaschung



Bewässerungsrate

Flutungsmethode: $9,3 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{tr}} \sim 18 \text{ m/a} \sim 5 \text{ cm/d}^*$

Abschätzung:

minimale Bewässerungsrate = $1,5 \times \text{Evapotranspirationsrate}^*$

Transpiration: $\text{C}_4\text{-Pflanze } 200 - 300 \text{ l/kg}_{\text{tr}}^{**} \sim 0,3 - 0,6 \text{ m/a}$

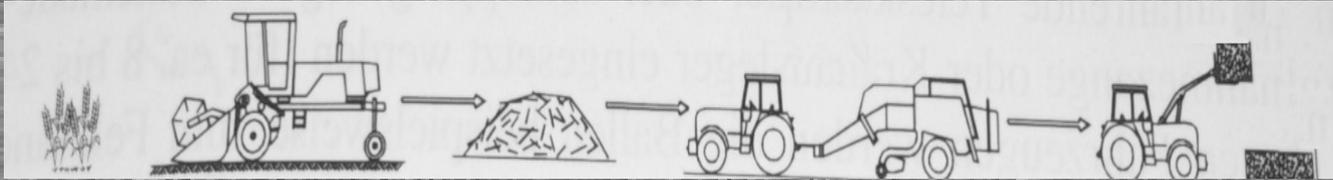
Evaporation: $1,5 - 2,5 \text{ m/a}$

→ Minimale Bewässerungsrate: $2,7 - 4,7 \text{ m/a}$

* Glenn, Watson in „Towards the rational use of high salinity tolerant plants, 1993

** Strauburger, Lehrbuch der Botanik, 25. Auflage, 2000

Bereitstellungskonzept: Ernte / Transport



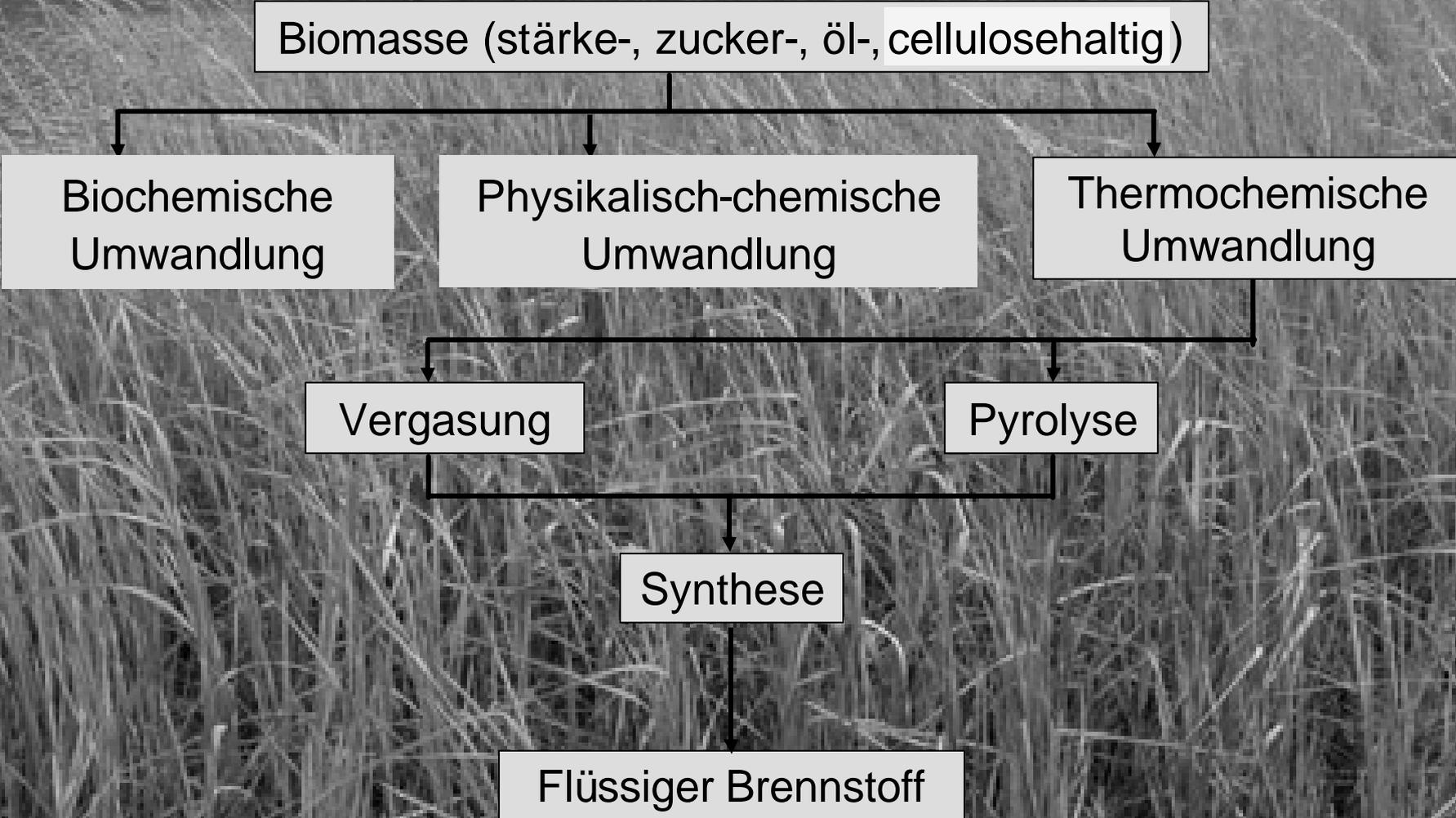
mehrstufiges Ernteverfahren:

- mähen
- auswaschen
- trocknen (2-3 Tage)
- pressen (Quaderballengröße $0,8 \times 0,8 \times 2,5 \text{ m}^3 \sim 320 \text{ kg/Ballen}$)

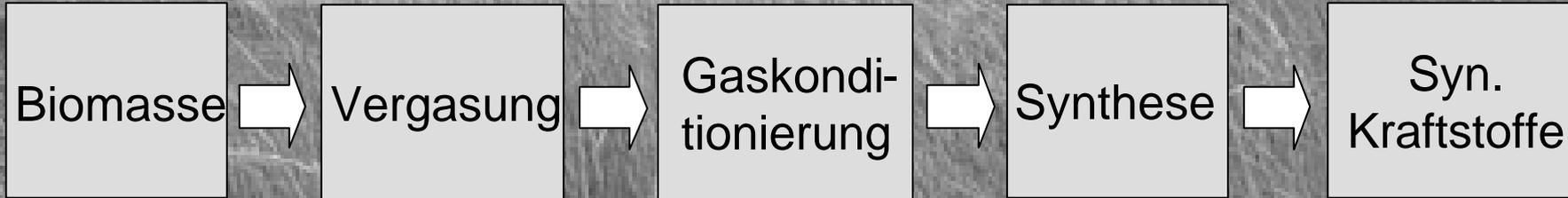
LKW-Transport:

- Volumenauslastung limitierend
- Zugmaschine + Anhänger fassen ~ 53 Ballen \rightarrow Nutzlast $\sim 17 \text{ t}$

Prozesse und Technologien zur Nutzung von Biomasse



Prozesskette



Synthesegaserzeugung durch gestufte Reformierung (DM2)

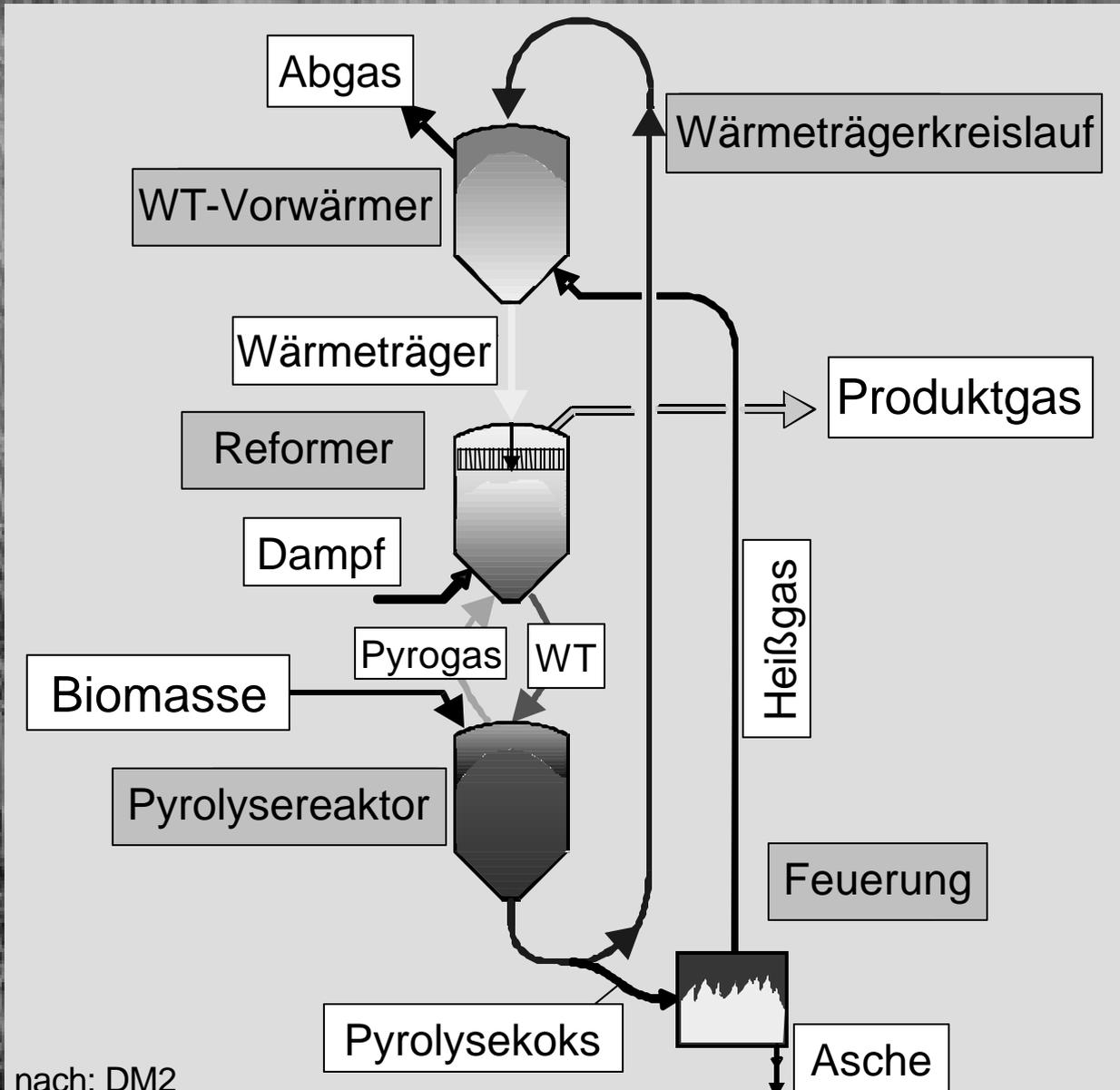
Gaskonditionierung: Gasreinigung, CO₂-Wäsche, PSA

Kohlenwasserstoffsynthese nach der Shell-Mitteldestillat-Synthese

Auswirkungen der Elementzusammensetzung



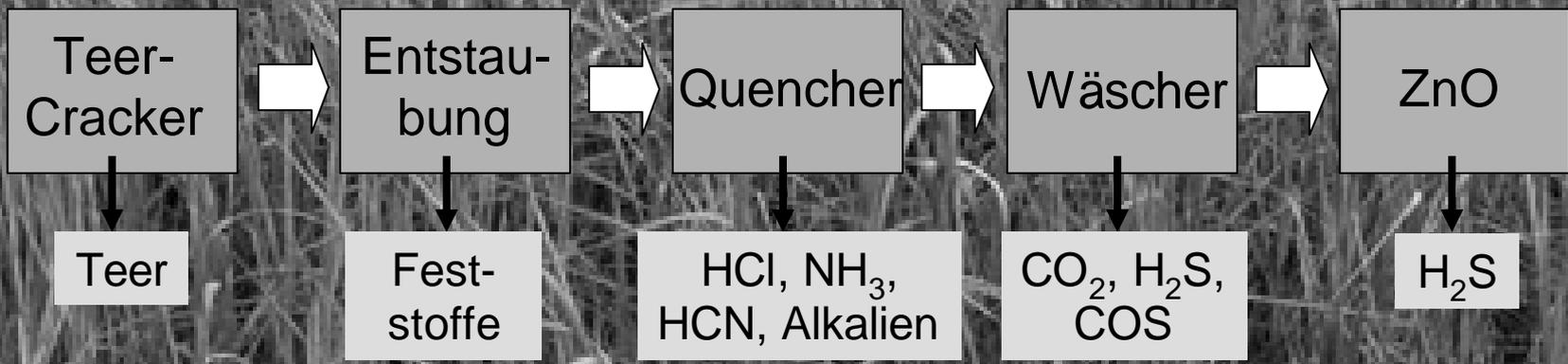
Synthesegaserzeugung: gestufte Reformierung



Gasreinigung

Synthesegasanforderungen für Fischer-Tropsch-Synthese: *

| | |
|--|--------------------------|
| Partikel (Asche) | < 0,1 mg/Nm ³ |
| Teer | unter Taupunkt |
| Halogenverbindungen (HCl) | < 10 ppb |
| Schwefelverbindungen (H ₂ S, COS) | < 10 ppb |
| Stickstoffverbindungen (HCN, NH ₃) | < 20 ppb |
| Alkalien | < 10 ppb |



hohe Gasanforderungen erfordern aufwendige Gasreinigung

* Vogel et al. in Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 24, 2004

Shell-Mitteldestillat-Synthese (SMDS):

Fischer-Tropsch-Synthese (FT): $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{-CH}_2\text{-} + \text{H}_2\text{O} \quad \Delta H < 0$

Produkte: LPG ($<C_4$), Benzin (C_5 - C_9), Kerosin (C_9 - C_{11}), Diesel (C_{11} - C_{15}),
Wachs ($>C_{20}$)

SMDS-Prozessschritte:

- FT zu $>C_{30+}$ (Synthesegas: $\frac{H_2 - CO_2}{CO_2 + CO} \approx 1,8$)
- Hydrierung \rightarrow 55 Gew.-% Diesel, 20 Gew.-% Kerosin, 20 Gew.-% Benzin

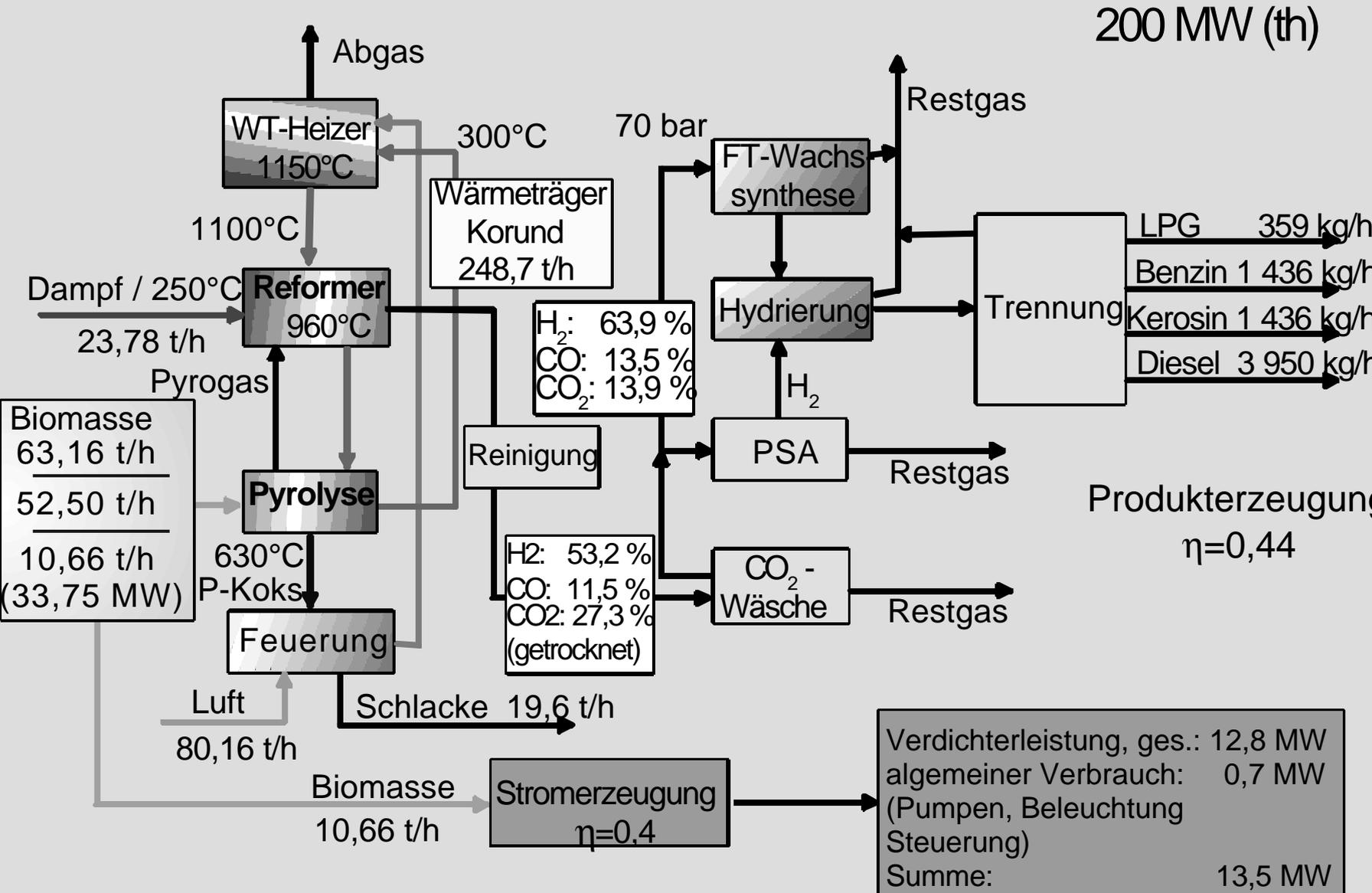
Eigenschaften von FT-Diesel:

- Aromaten- und Schwefel-frei
- hohe Cetanzahl



SMDS: optimierte Ausbeute hochwertiger flüssiger Kraftstoffe

Prozesskettenanalyse



Ökonomische, ökologische und energetische Bewertung

$$\dot{m}_{Bio} = \frac{P_{th,Anlage}}{H_{u,Bio}}$$

Annahmen:

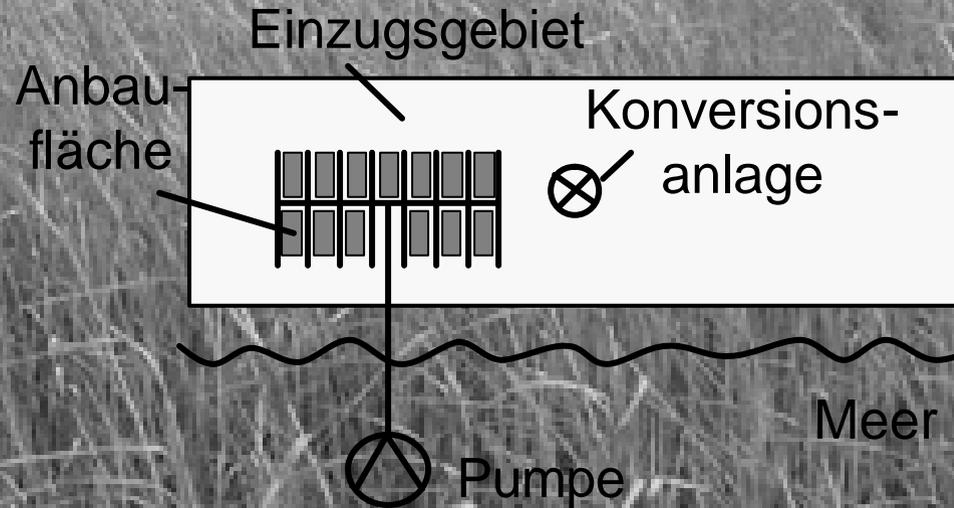
jährl. Hektarertrag: 24 t_{tr}/ha/a

Bewässerungsrate: 6 m/a

Pumphöhe: 10 m

Zinssatz: 13 %

Abschreibungsdauer: 15 a



Kraftstoffproduktionskosten [€/l]:

$$K_{BTL} = K_{Anlage} + K_{Biomasse} + K_{Transport}$$

$$\text{mit } K_{Anlage} = f(\text{Anlagengröße}^*)$$

$$K_{Biomasse} = f(\text{Anbau/Ernte}^{**}, \text{Bewässerungsrate, -kosten}^{***})$$

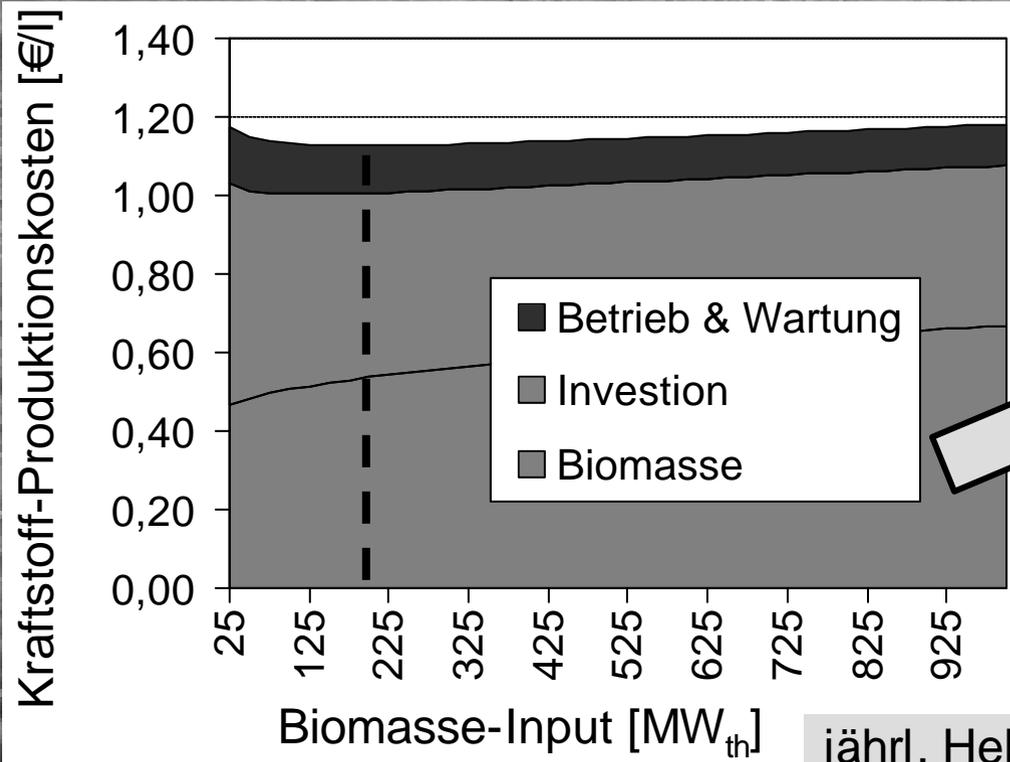


* Tijmensen „The production of Fischer Tropsh liquids and power through biomass gasification“, 2000

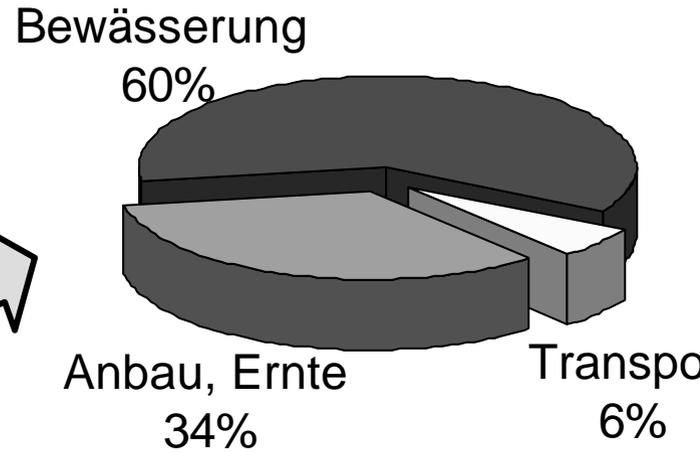
** Glenn, et al. „Growing Halophytes to Remove Carbon from the Atmosphere“, Environment, 1992.

*** ...

Ökonomische, ökologische und energetische Bewertung



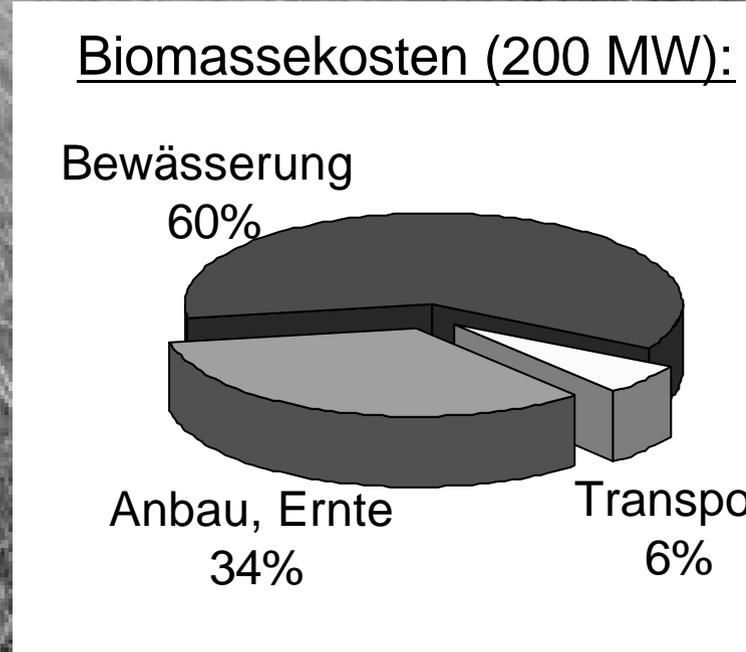
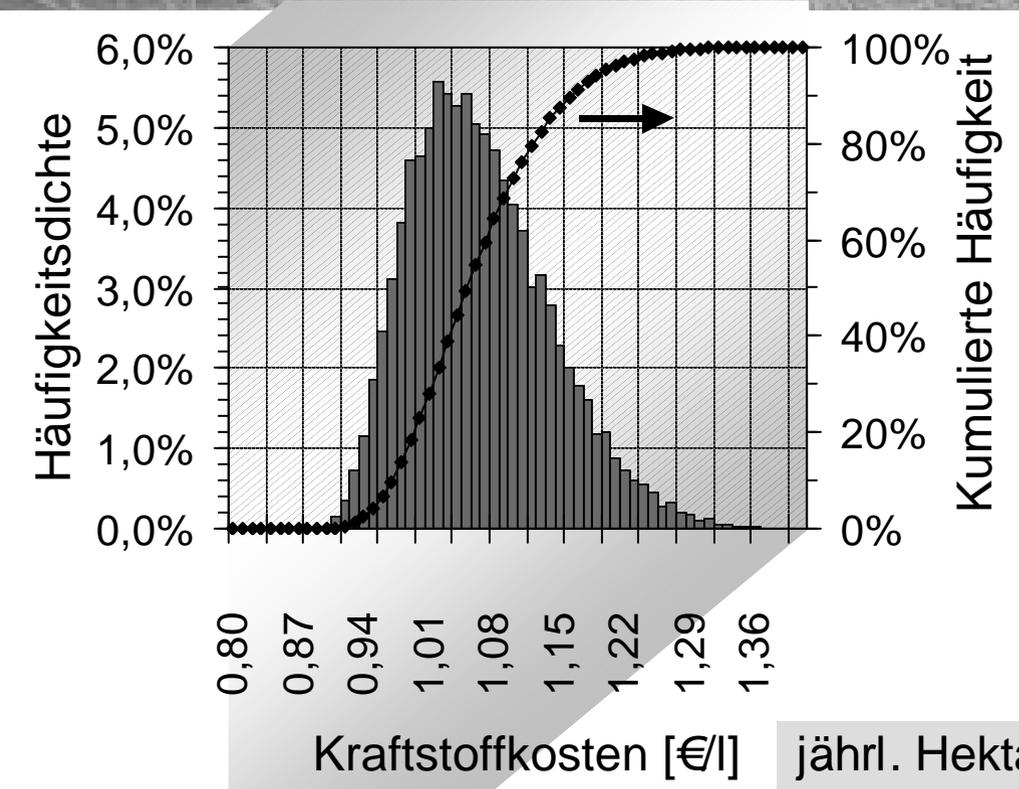
Biomassekosten (200 MW):



| | |
|---|-------------------|
| jährl. Hektarertrag [t _{tr} /ha/a]: | 16...(24)...40 * |
| Bewässerungsrate [m/a]: | 3...(6)...18 |
| Bewässerungskosten [c _€ /m ³]: | 0,5...(1,1)...1,5 |
| Anlagenwirkungsgrad [%]: | 22...(40)...46 |

* Annahme: Dreiecksverteilung und um jeweiliges Erwartungswert

Ökonomische, ökologische und energetische Bewertung



Vergleich:
konventioneller Diesel ~0,3 €/l

| | |
|---|-------------------|
| jährl. Hektarertrag [$t_{tr}/ha/a$]: | 16...(24)...40 * |
| Bewässerungsrate [m/a]: | 3...(6)...18 |
| Bewässerungskosten [€ct/m ³]: | 0,5...(1,1)...1,5 |
| Anlagenwirkungsgrad [%]: | 22...(40)...46 |

BTL-Kosten um Faktor ~4 über denen von konventionellem Diesel

* Annahme: Dreiecksverteilung um jeweiligen Erwartungswert

Ökonomische, ökologische und energetische Bewertung

Erntefaktor: $EF = \frac{W_{\text{Kraftstoff}}}{\sum E_i + Ne}$

$$\sum E_i = E_{\text{Bewäss.}} + E_{\text{Trans.}} + E_{\text{Anlage}}$$

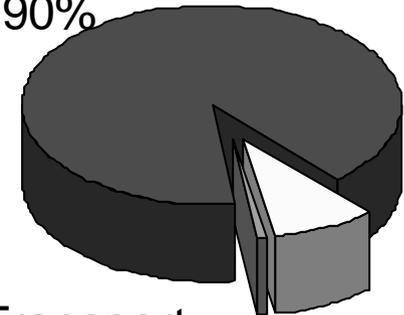
mit $E_{\text{Anlage}} < K_{\text{Invest}} / 0,5 \text{ €/kWh}^*$

→ $EF_{200\text{MWth}} = 2,2$

Kumulierter Energieaufwand:

Bewässerung

90%



Transport
1%

Konversions-
anlage 9%

CO₂-Bilanz:

BTL-Diesel CO₂-Emission: ~ 23 g/MJ (ohne CO₂ aus Anlagenbau)

konv. Diesel CO₂-Emission: ~ 86 g/MJ **

➔ Halophyten im BTL-Prozess energetisch und ökologisch positiv

* Rebhahn: Energiehandbuch, Springer, 2002

Zusammenfassung

Für die Produktion synthetischer Kraftstoffe aus Halophyten in ausgewählten küstennahen Wüsten gilt unter den hier beschriebenen Annahmen:

- **Halophytenanbau steht nicht in Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau**
- **Halophytenanbau erfordert aufwendige Feldtechnik**
- **Halophytenanbau erfordert aufwendiges Salzwassermanagement**
- **Produktion synthetischer Kraftstoffe erfordert hohe Investkosten**
(Gaserzeugung, Gasreinigung, Synthese, Produktaufbereitung)
- **Literpreis würde Faktor ~ 4 über heutigem Diesel liegen** (ohne Steuer)
- **Positive Energiebilanz und CO₂-Einsparung* ist möglich**

gegenüber Nutzung von konventionellem Diesel

**Insgesamt liefert diese technisch-ökonomische Analyse
nur bedingt volkswirtschaftliche Hinweise,
Entwicklungsländern diese Anbau- und Nutzungstechnik
zu empfehlen.**