

3. Motorische Verbrennung von biogenen Treibstoffen

3.1 Begriffe: Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

BHKW = Biomasse-Heiz-Kraftwerk

= Kraft-Wärme-Kopplung mit Verbrennungsmotor; primär „stromgeführt“, d.h. auf Maximierung des elektrischen Wirkungsgrades ausgelegt ist. Leistungsbereich 1 – 5 MW_{el.} (z.B. in Güssing)

BBHKW = Biomasse-Blockheizkraftwerk; primär „wärmegeführt“ für Nahwärmeversorgung. Leistungsbereich 0,2 bis 1 MW_{el.}

Anteile an Modul-Nennleistung:

Gesamt-Nutzungsgrad: $\approx 85\%$

$P_{el} \approx 35\%$

$P_{th} \approx 50\%$

... nur wenn der thermische Leistungsanteil auch tatsächlich nutzbar ist!

Nutzungsmöglichkeiten der thermischen Leistung von Biogas-BHKW im landwirtschaftlichen Betrieb:

- Prozesswärme für Biogas-Prozess
- Heizung
- Warmwasser
- sonstige Prozesswärme (max. 110°C)
- Trocknungstechnik (mit niedrigem Leistungsbedarf !)
- Absorptions-Kühlung (→ “KWKK”)

..... gilt nicht nur für Biogas, sondern auch für **Holzgas, Pflanzenöl..** mit motorischer Verbrennung

Absorptions-Kälteprozeß:

Prinzip: 2 Kreisprozesse gekoppelt; ein linksläufiger Kälteprozess und ein rechtsläufiger Kraftprozess.

$$Q_C + Q_A = Q_0 + Q_H + P_P$$

Q_C = Verdichter-Wärmestrom

Q_A = Absorber-Wärmestrom

$$\zeta = Q_0 / (Q_H + P_P) =$$

$$= T_C / T_A \cdot T_0 / T_H \cdot (T_H - T_A) / (T_C - T_0)$$

= Wärmeverhältnis

Q_0 = Kälteleistung

Q_H = Heizleistung

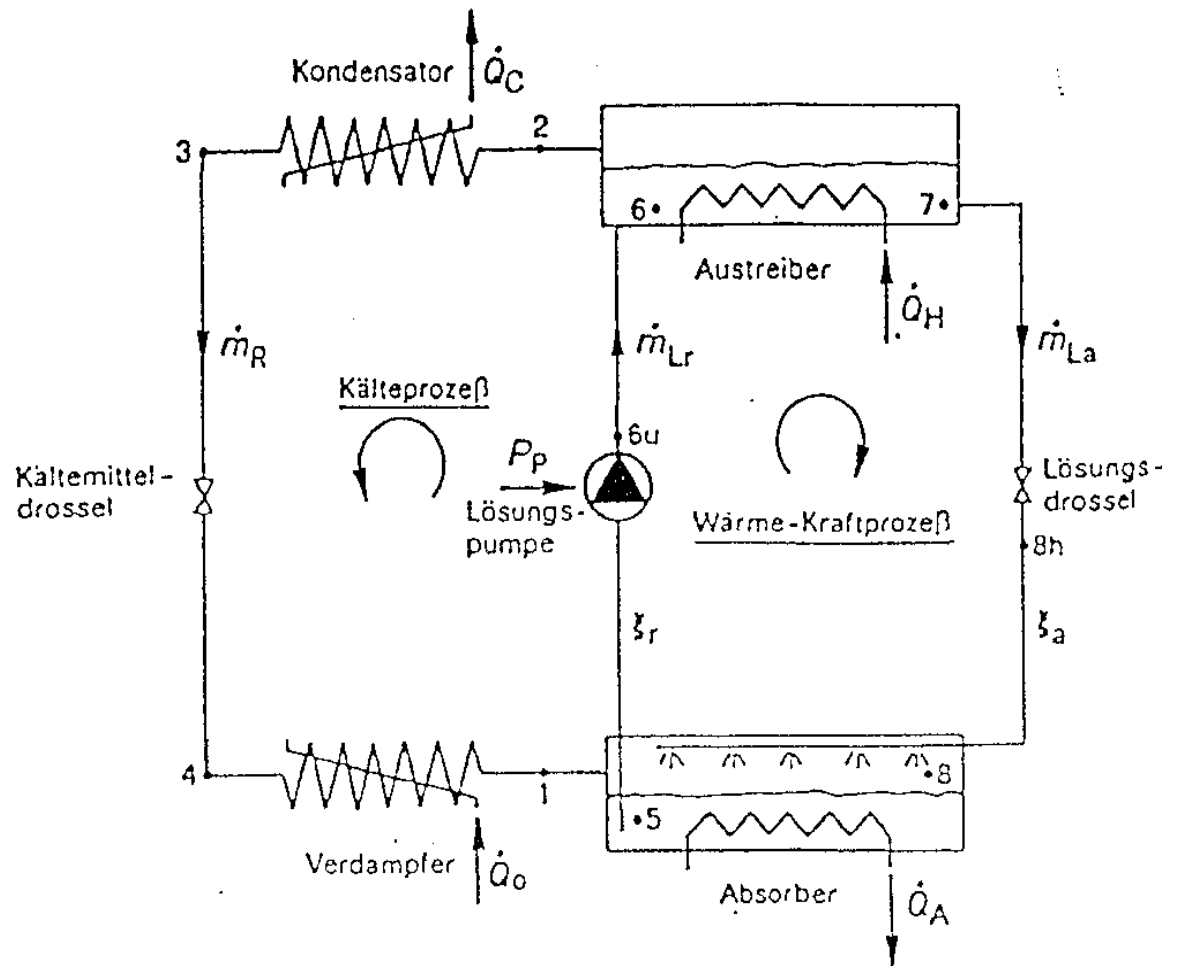
P_P = Leistung der Lösungspumpe

Zweistoff-Gemische: z.B. NH₃ + H₂O oder LiBr + H₂O ... starke Absorptionskräfte

$\zeta \approx 0.2 - 0.25$... bei luftgekühlten Kleinanlagen (Camping-Kühlschrank..)

$\zeta \approx 0.7 - 1.0$... bei Großanlagen mit Wasserkühlung der Wärmetauscher

Absorptions-Kälteprozeß: Schema:



3.2 Gasmotorentchnik

Gasmotoren allgemein:

- Gasförmige Kraftstoffe sind sehr heterogen bezüglich des Verbrennungsverhaltens (Luftbedarf)
- Die Klopfneigung ist i.a. geringer als bei flüssigen Kraftstoffen; höhere Verdichtungsverhältnisse als bei Benzinmotor möglich
- Methanzahl (MZ) = Maß für die Klopfestigkeit (CH₄ = MZ 100; Biogas MZ ca. 130; CO₂-Gehalt erhöht die MZ)
- günstiges CO₂-Hu-Verhältnis: um 25 - 30% niedrigere CO₂-Emissionen je Leistungseinheit!
- großes technisches Entwicklungspotential

Gasmotor-Konzepte:

OTTO – Gasmotor:

Ungeregelter Betrieb (bez. λ)

„stöchiometrischer“ Betrieb ($\lambda = 1$) + Dreiweg-Katalysator

Magermotor-Konzept ($\lambda > 1$):

mit Vorkammer („homogener MM“)

ohne Vorkammer

Gas – Dieselmotor: luftverdichtend; „innere“ Gemischbildung

Diesel – Gasmotor: gemischverdichtend; „äußere“ Gemischbildung

zu Gasmotorentchnik - allgemein:

Gas-Dieselmotor: luftverdichtend; Hochdruck-Einblasung von Gas + DK-Zündstrahl; Emissionswerte der TA-Luft können eingehalten werden (bez. Emissionen am günstigsten); guter Wirkungsgrad (hohes Verdichtungsverhältnis möglich)

Neue Gemischbildungstechnik: „**Trans-Valve-Injection**“:

Gaseinblasung ähnlich wie multi-point-Benzineinspritzung; damit wird eine hohe Gasgeschwindigkeit unabhängig von der Motordrehzahl erreicht.

Dieselmotor: gemischverdichtend; + DK-Zündstrahl; nicht für Gas mit geringer MZ geeignet (Gemischverdichtung)

Erdgas: .. grundsätzlich „guter“ Kraftstoff; sehr niedrige Emissionen erreichbar:
..für ULEV geeignet (Kalifornien); ab 2003 10% „ZEV“ (=Elektroautos, H₂, Brennstoffzellen)

Stationärmotoren: Problem der Netzzusammenschlüsse: z.B. GUS-Gas MZ 98, Nordsee-Gas MZ 72, Nordafrika-Gas MZ 71 - 84...--> hohe Anforderungen an die Motorregelung!

(Fa. JENBACHER führend in der Gasmotorentechnik)

Maßnahmen gegen Klopfen:

rasch wirkend:

Spätverstellung
Lastreduktion

langsam wirkend:

Reduzierung der Gemischtemperatur
Erhöhung des λ
AGR

Deponiegas:

.. umweltpolitisch relevant: ca. 10% der gesamten CH₄-Emissionen aus Deponien
Motorische Verbrennungen (Verstromung) von Deponiegas seit ca. 1985; 1995: ca. 500 Deponiegasverstromungen in EU

Zusammensetzung:

| | Vol% |
|-----------------|---------|
| O ₂ | 0.5 |
| N ₂ | 2.3 |
| CH ₄ | 40 - 60 |
| CO ₂ | 40.8 |

MZ ca. 140

Spurenkomponenten (mg/Nm³):

| | |
|-----------------|---------|
| Cl ⁻ | ca. 50 |
| F ⁻ | ca. 14 |
| SH ⁻ | ca. 220 |

.... *Problem mit Katalysator!*

Weitere Probleme: H₂O-Dampf, Staub

3.3 Motorische Verbrennung von flüssigen erneuerbaren Kraftstoffen:

Rohstoffe:

Pflanzenöle und -fette

tierische Öle und Fette

Zucker, Stärke, Zellulose..: Alkohole (Methanol, Ethanol..)

Öle und Ester: **Diesel-Prozeß**

Alkohole: **Otto-Prozeß** und **Diesel-Prozeß**

Ölpflanzen, z.B. W-Raps:

| | |
|----------------|-------------------------|
| Ölertrag | 1400 l/(ha*a) (1200 kg) |
| Stroh | 4.8 - 6 t/(ha*a) |
| Schrot, Kuchen | ≈ 1.8 t/(ha*a) |

Energieertrag ≈ 5 GJ/(ha*a)

Energiebilanz RME:

- 30% Produktion (Raps)
- 42% Pressung, Rapsschrot (!)
- 8% Umesterung

Energieausbeute RME ca. 20%

Pflanzenöle - RME - Kraftstoffrelevante Eigenschaften:

| | <i>Einheit</i> | Pflanzenöl | Pflanzenöl- Methylester | Diesekraftstoff |
|-------------------|------------------------------------|------------|----------------------------|-----------------|
| Dichte (20°C) | kg/l | 0.92 | 0.88 | 0.83 |
| Viskosität (38°C) | mm ² /s | 39 | 4 - 6 | 2 - 4 |
| Stockpunkt | °C | +15 | -10 - +10 | -15 |
| CFPP | °C | +18 | -9 | -22 |
| Cetan-Zahl | - | 40 - 50 | 55 | 50 |
| H _u | MJ/l | 33 | 32 | 35 |
| | kWh/kg | 10.0 | 10.1 | 11.7 |
| Molmasse | kg/kmol | 882 | 296 | 191 |
| stöch. Luftbedarf | kg _{Lu} /kg _{Kr} | 12.4 | 12.5 | 14.5 |
| O-Gehalt | Gew.-% | 10.5 | 11.0 | -- |
| Koksrückstand | Gew.-% | 0.17 - 0.5 | 0.05 | 0.01 |

Pflanzenöle:

Technische Hauptprobleme: *Viskosität* und *Stockpunkt*; ergibt Probleme bei Kraftstoffzufuhr, Filter und vor allem Zerstäubung; Abhilfe ist möglich durch Aufheizen des Kraftstoffes (exponentielle Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur!). Dies spricht vor allem für den Einsatz in Stationäranlagen (KWK). Nebenkammer-Motoren oder Kolben mit Kugelbrennraum geeignet; „Duo-Therm-Verfahren“ (ELSBETT) arbeitet mit speziell geschichteter Einspritzung und reduzierter Kühlung (Ölkühlung). Dieselbeimischung ist ebenfalls eine Möglichkeit der Viskositätssenkung. Dauerbetrieb: Bei Direkteinspritzern nicht möglich (Verkokung..)

RME: Wirksamste Maßnahme ist die Umesterung. So können Standard-Dieselmotoren verwendet werden, die sowohl mit DK oder mit RME arbeiten können.

Auch der Betrieb mit Direkteinspritzern möglich. Die einzigen technischen Nachteile sind: Schmierölverdünnung (hohe Dampfdruckkurve)
 Kälteempfindlichkeit
 lösende Wirkung auf Lacke, Kunststoffdichtungen (Viton geeignet)

Vorteil (außer CO₂-Bilanz): rasche *biologische Abbaubarkeit* (ca. 3 Wochen im Boden)!

Abgasemissionen: (s. SAGERER)

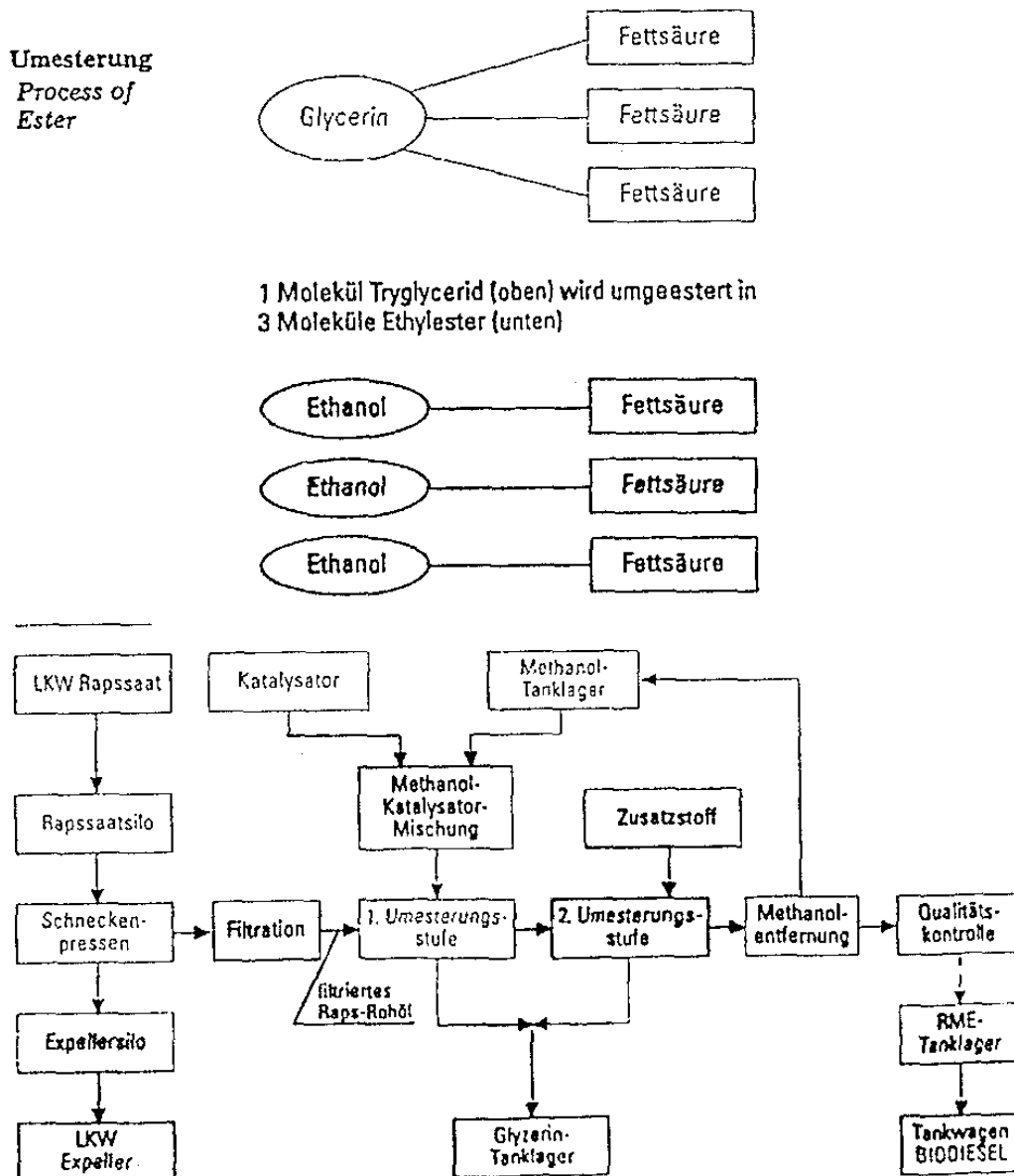
(Grundsätzlich: Vorsicht bei Vergleichen; die Motoreinstellung spielt eine große Rolle...)

Bisherige Ergebnisse:

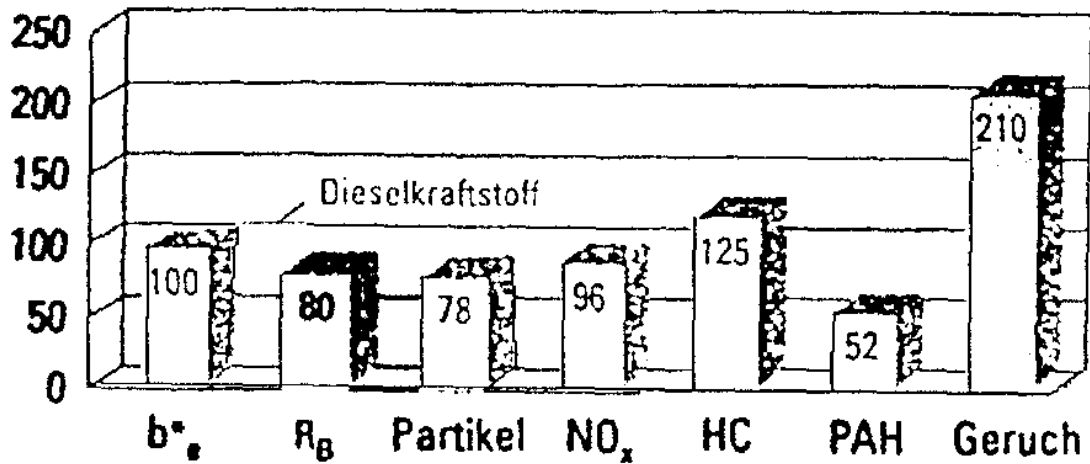
CO, HC, NO_x.. bei RME geringfügig höher als bei DK (<10%)

HC... bei Pflanzenöl deutlich höher als bei DK (ca. 25%)

Partikel, Rauch, PAH... Pflanzenöl und RME deutlich günstiger als DK

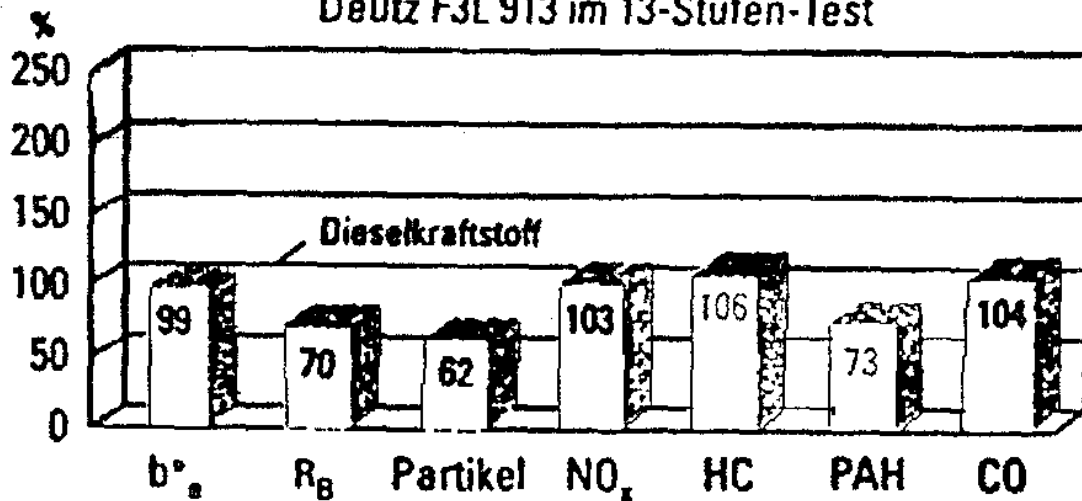


**Betriebsverhalten Rapsölmotor im 13-Stufen-Test
Deutz Wirbelkammermotor F6L 912 W**



Gewichtung nach ECE R 49

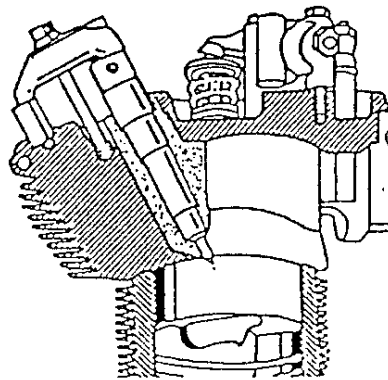
**Betriebsverhalten RME-Motor
Deutz F3L 913 im 13-Stufen-Test**



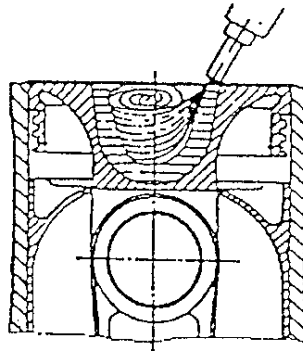
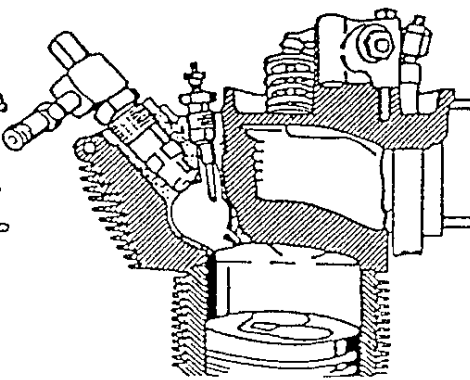
Gewichtung nach ECE R 49

(nach SAGERER)

Direkteinspritzung



Wirbelkammermotor



Duothermverfahren
(ELSBETT)

Alkohole:

Hauptsächlich für Ottoprozess geeignet; Beimischung zu Benzin - O₂-Gehalt wirkt sich günstig aus: bez. *Klopffestigkeit* und *Emissionen* (HC, CO, NO_x...)... λ kann höher sein !

Der Heizwert ist niedriger als bei Benzin, die Gemischbildung muss daher anders eingestellt werden; der Wirkungsgrad (Gütegrad) bei gleichem thermischen Wirkungsgrad ist jedoch höher als bei Benzin (10 - 15%)

Ev. ein technischer Nachteil: niedrige Dampfdruckkurve führt in einem Vergaser zu starker Abkühlung (...bis zum Vereisen des Vergasers);

Dieselpprozess: grundsätzlich möglich mit entsprechend veränderten Einstellungen; der große Vorteil wäre die starke Senkung der Emissionswerte, insbesondere der **NOx** und der **Partikel-Emissionen**.

Methanol weist durchwegs günstigere Werte auf als Ethanol

Alkohole - Kraftstoffrelevante Eigenschaften:

| | Einheit | Methanol | Ethanol | Dieselmkraftstoff |
|--------------------|------------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Dichte (15°C) | kg/l | 0.79 | 0.81 | 0.83 |
| Siedepkt./-bereich | °C | 65 | 78 | 180 -370 |
| Cetanzahl | CZ | 5 | 8 | 50 |
| Octanzahl | ROZ | 111 | 108 | -- |
| Hu | MJ/kg | 19.5 | 25 | 42.5 |
| stöch. Luftverh. | kg _{LU} /kg _{Kr} | 6.5 | 9 | 14.5 |
| Verdampfungswärme | kJ/kg | 1100 | 850 | 250 |

Alkoholproduktion:

Getreide (+ Stroh) ≈ 4.6 GJ/(ha*a)

Zuckerrübe ≈ 3.2 GJ/(ha*a)

„Biomass to Liquid - BTL“

Prinzip: Wasserstoffspeicherung durch chemische Bindung an Kohlenstoff in Form von Kohlewasserstoffen – wie bei fossilen Kraftstoffen auch – jedoch an regenerativen Kohlenstoff aus Biomasse.

⇒ *BTL = Kohlewasserstoffe aus Wasserstoff und Biomasse*

Vorteile:

- Hohe Qualität der BTL-Kraftstoffe, vergleichbar den synthetischen Kraftstoffen aus Erdgas („Synfuels“):
aromatenfrei
hohe Cetanzahl (als Dieselmkraftstoff)
- Keine wesentlichen Anpassungen der Motorentchnik notwendig
- Derzeit das größte technische Potenzial aller Biokraftstoffe, weil eine sehr weite Palette von Biomasse-Grundstoffen verwendet werden kann (von Grönpflanzen bis Holz..)

Verfahrenstechnisch gibt es verschiedene Wege, ein hochwertiges Synthesegas aus Biomasse zu erzeugen. Eines der Hauptprobleme ist die Teerfreiheit. Meist wird diese mit Hilfe von Wasserdampf als Vergasungsmittel („Quenchen“) zu erreichen versucht. Eine wesentliche Frage ist auch, wie der notwendige Wasserstoff erzeugt

wird. Im Carbo-V-Verfahren von CHOREN wird elektrolytisch erzeugter Wasserstoff verwendet. Ein anderer Weg ist die „Gestufte Reformierung“, in welcher aus Biomasse durch Pyrolyse ein Gas mit 40 –50% H₂ erzeugt wird.

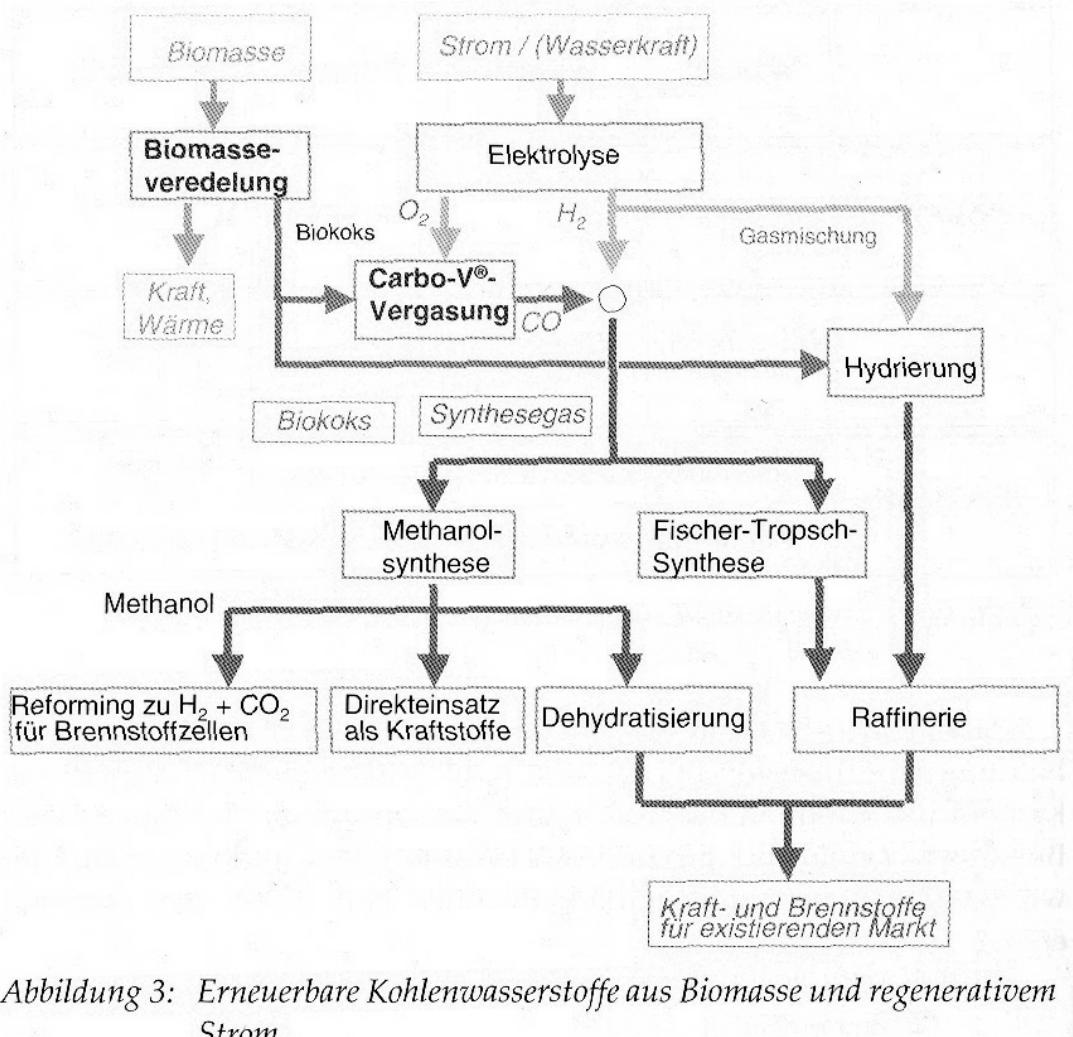


Abbildung 3: Erneuerbare Kohlenwasserstoffe aus Biomasse und regenerativem Strom

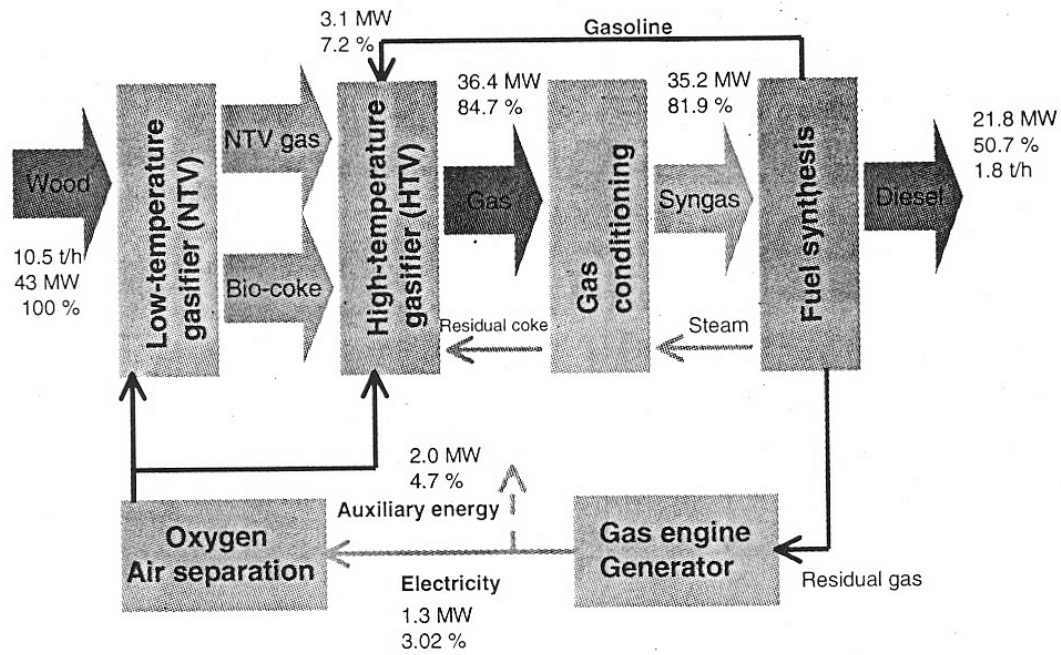


Abbildung 5: Massen- und Energiebilanz für BtL

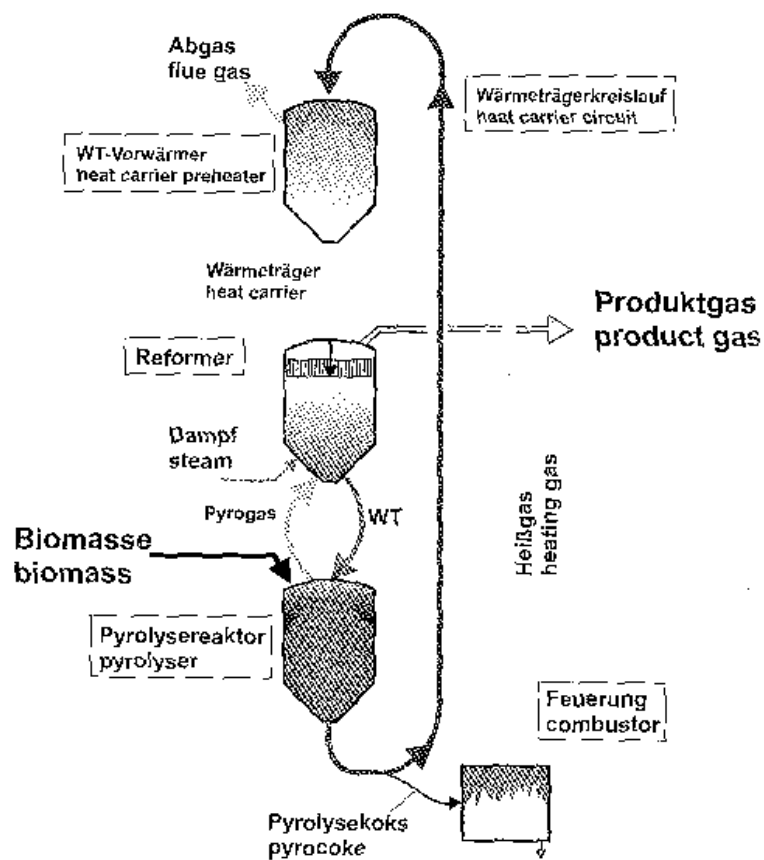
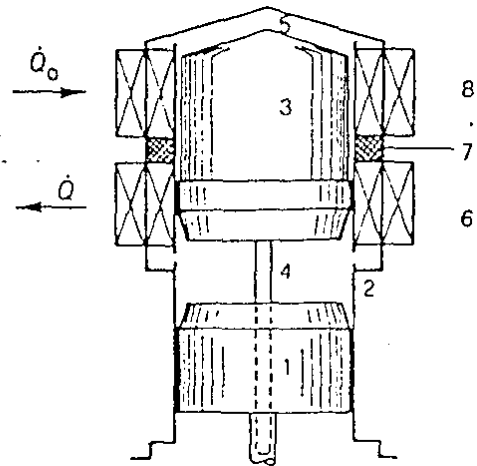
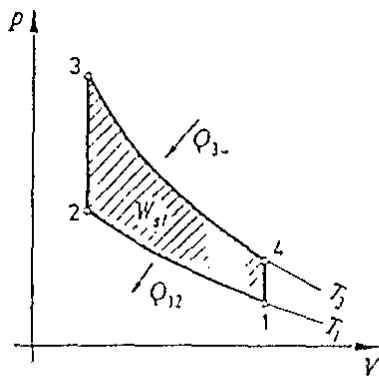


Abbildung 1: Prinzipschema Gestufte Reformierung

4. Stirling-Motor:

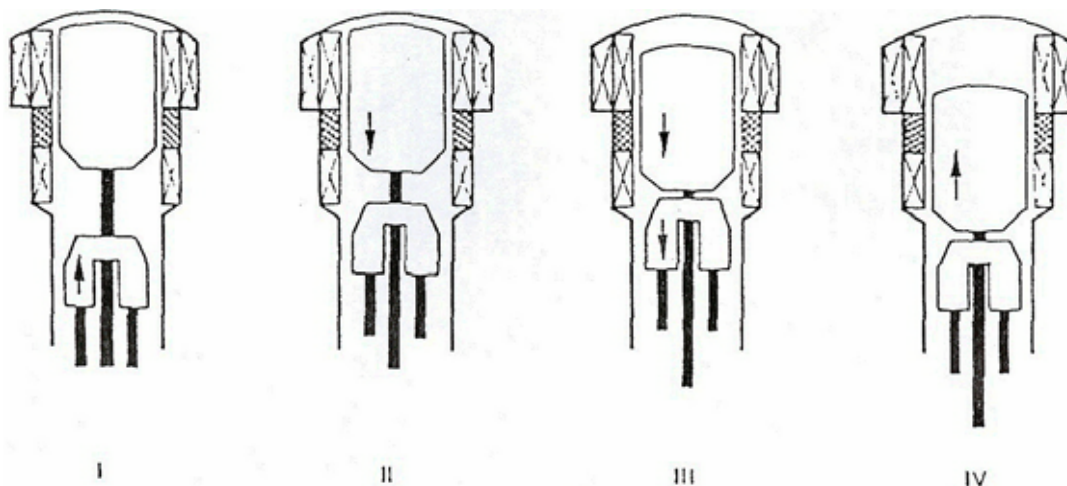
Der Stirling-Prozess kann als linksläufiger Kälteprozess oder als rechtsläufiger Prozess zur Energieumwandlung thermisch-mechanisch (Motor) geführt werden.

Der Stirling-Prozess als Kreisprozess eines **Heißgasmotors** besteht aus einer isothermen Kompression und Expansion und isochorer Wärmeübertragung im Inneren. Der Gaskreislauf ist geschlossen.



Prinzip der Stirling-Maschine:

- | | | |
|--|------------------|-----------------------------------|
| 1 Hauptkolben | 2 Zylinder | 3 Verdrängerkolben |
| 4 Kompressionsraum | 5 Expansionsraum | 6 wassergekühlter Wärmeübertrager |
| 7 Regenerator (innerer Wärmeaustauscher) | | 8 Wärmeübertrager (Rekuperator) |



Arbeitsphasen:

I. [1 -> 2] *Isotherme Kompression:* Das Arbeitsgas befindet sich im Kompressionsraum (4), wird durch den Hauptkolben verdichtet und gibt die Kompressionswärme nach außen ab.

II. [2 -> 3] *Isochore innere Wärmezufuhr vom Regenerator*: Der Verdränger transportiert das komprimierte Arbeitsgas vom Kompressionsraum(4) durch den Regenerator(7) zum Expansionsraum(5). Beim Durchströmen des Regenerators erfährt das Gas eine Anwärmung von T1 auf T3.

III. [3 -> 4] *Isotherme Expansion*: Wärmezufuhr von außen. Das Arbeitsgas expandiert während der gleichzeitigen Abwärtsbewegung des Arbeits- und Verdrängerkolbens, dabei wird mechanische Arbeit geleistet.

IV. [4 -> 1] *Isochore innere Wärmeabfuhr an den Regenerator*: Das Arbeitsgas wird durch den Verdränger in den Kompressionsraum (4) zurückgedrückt. Beim durchströmen des Regenerators (7) wird Wärme vom Gas an den Regenerator abgegeben, der wieder aufgeheizt wird.

$$\varepsilon = V1/V2$$

$$\eta_{th} = 1 - T1/T3 = \text{thermischer Wirkungsgrad}$$

Gase: Luft, He, H2..

Vorteil: beliebige Energiequellen können genutzt werden (Biomassefeuerung, Abwärme, Solarwärme...); kann emissionsfrei arbeiten

Nachteil: hoher technischer Aufwand, technische Probleme mit Dichtung, Antriebe (2 Kolben)

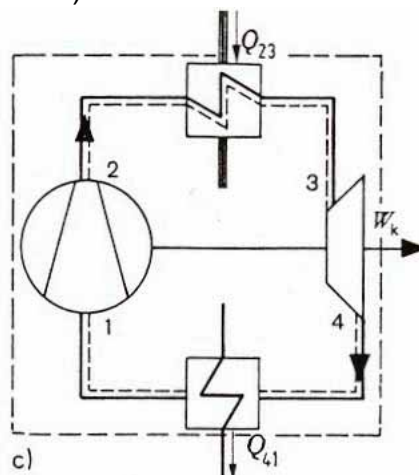
5. Gas-, Dampfturbinen, Dampfmaschinen

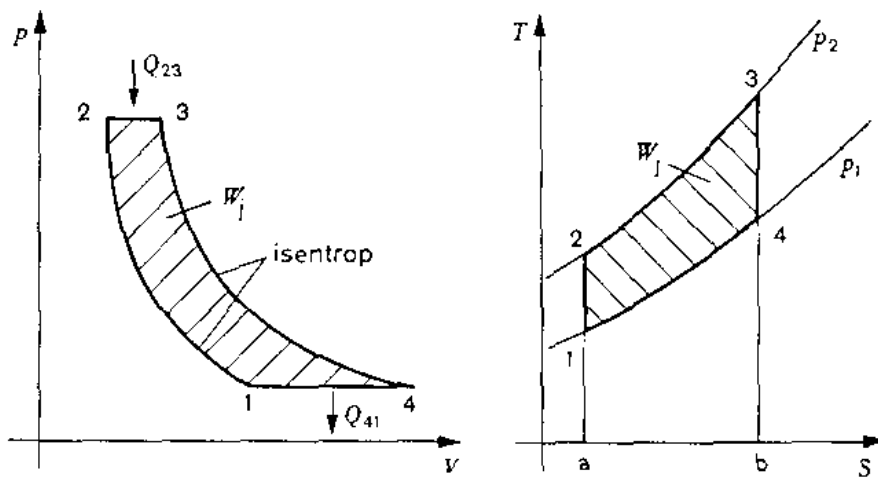
Gasturbinenanlagen: (Quelle der Abbildungen: CERBE u. HOFFMANN)

Arbeitsmedium Gase; Arbeit durch Gasentspannung;
im geschlossenen Kreislauf: „Wärmekraftanlage“,
im offenen Kreislauf: „Verbrennungskraftanlage“

Vergleichsprozess: **JOULE-Prozeß**

isentropische Kompression (1..2) und isentrope Expansion (3..4), isobare Wärmeübertragung (2..3 u. 4..1)





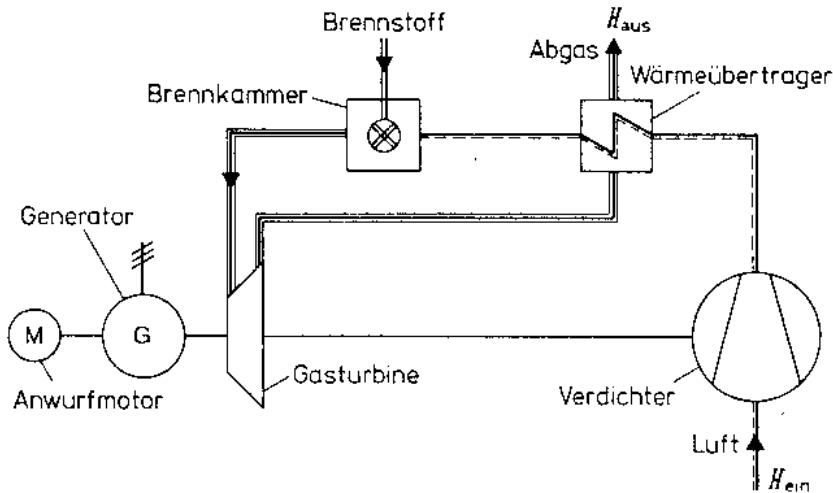
Schema eines Gasturbinen-Prozesses. JOULE-Prozeß im p-V- und im T-s-Diagramm:

$$\eta_{th} = |W_J| / Q_{23} = 1 - Q_{41}/Q_{23} = 1 - m \cdot c_p \cdot (T_4 - T_1) / (m \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2))$$

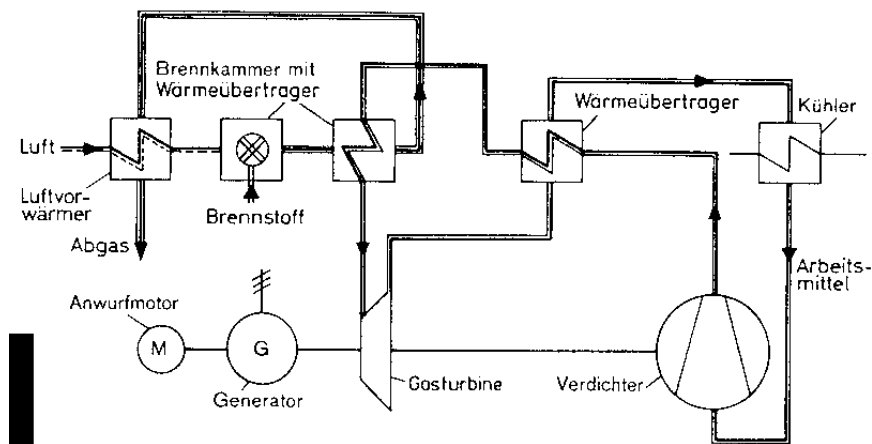
wenn $c_p = \text{konstant} \rightarrow \eta_{th} = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)$

$\eta_{th} = f(\kappa)!$ He $\kappa = 1,67$ Luft: $\kappa = 1,4$

$$\zeta = |W_J| / E_{q23} = \text{exergetischer Wirkungsgrad}$$



Gasturbinenanlage mit *offenem* Kreislauf und innerer Wärmezufuhr



Gasturbinenanlage mit *geschlossenem* Kreislauf und äußerer Wärmezufuhr.

In der Praxis werden 2 Anlagentypen realisiert:

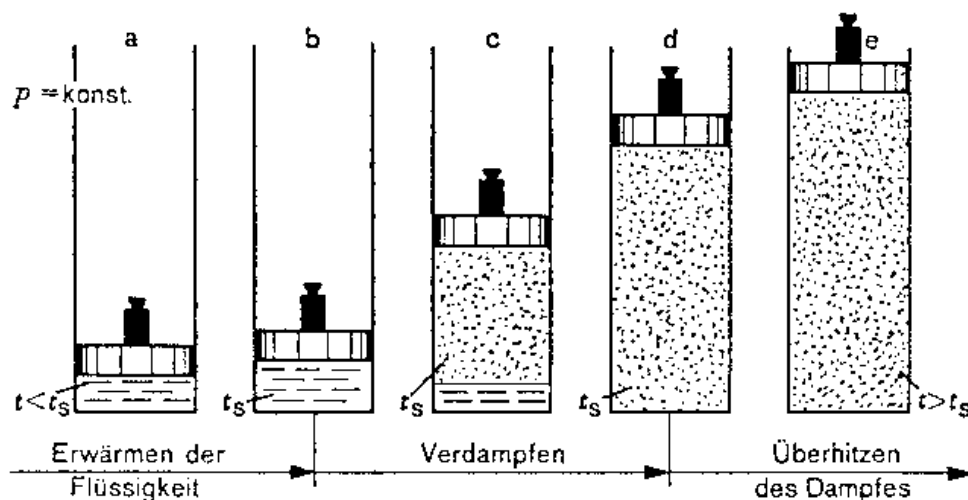
a) offenes System mit innerer Wärmezufuhr (= Verbrennungskraftanlage)
+ kompakt, geringes Gewicht, schnelles Anfahren möglich
auch für mobilen Einsatz geeignet

b) geschlossenes System mit äußerer Wärmezufuhr; billige Brennstoffe können eingesetzt werden; besserer Wirkungsgrad im Teillastbereich, jedoch träge; für Stationäreinsatz geeignet;

He kann als Arbeitsmittel verwendet werden.

Dampfkraftanlagen:

Wärmeanlagen mit Änderung des Aggregatzustandes des Mediums:



Schema: Verdampfungsvorgang bei konstantem Druck

3 Baugruppen:

Expansionsmaschine:

Dampfturbine
Dampfkolbenmaschine

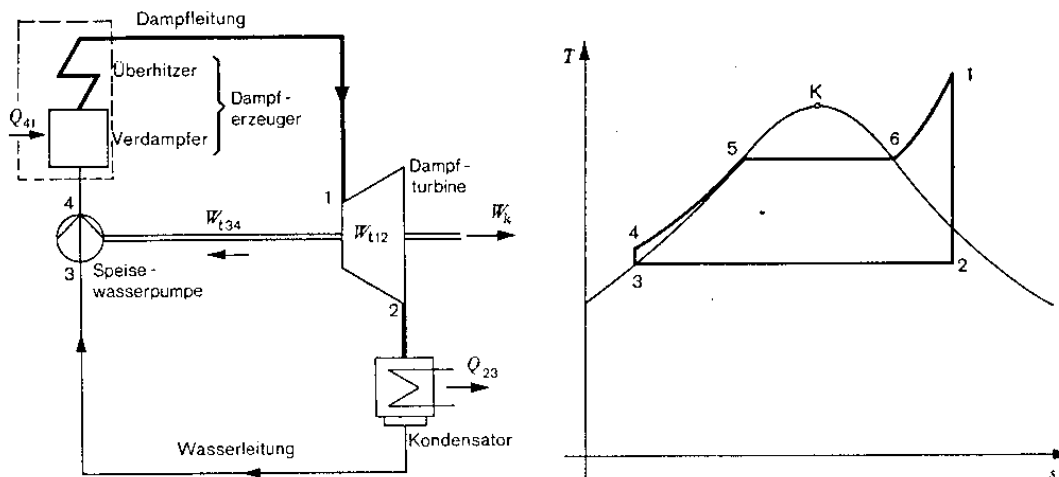
Wärmeübertrager:

Dampferzeuger (= Verdampfer und Überhitzer)
Kondensator (→ Wärmeabfuhr)

Speisewasserpumpe: dient der Förderung des Kondensates

Vergleichsprozess: CLAUSIUS-RANKINE-Prozess

isentrope Verdichtung/Expansion; isobare Verdampfung und Wärmeübertragung



Schaltbild einer Dampfkraftanlage und CLAUSIUS-RANKINE-Prozeß im T,s - Diagramm

$$\eta_{th} = |W_c/r| / Q_{zu} = 1 - (H_2 - H_3)/(H_1 - H_4)$$

Die Arbeit der Speisewasserpumpe ist gering gegenüber der Turbinenarbeit; meist wird sie nicht direkt von der Turbine angetrieben, sondern elektrisch; meist als „Nebenverbraucher“ gerechnet.

Der Clausius-Rankine-Prozeß weist grundsätzlich einen relativ geringen η_{th} auf! Verbesserungsmaßnahmen:

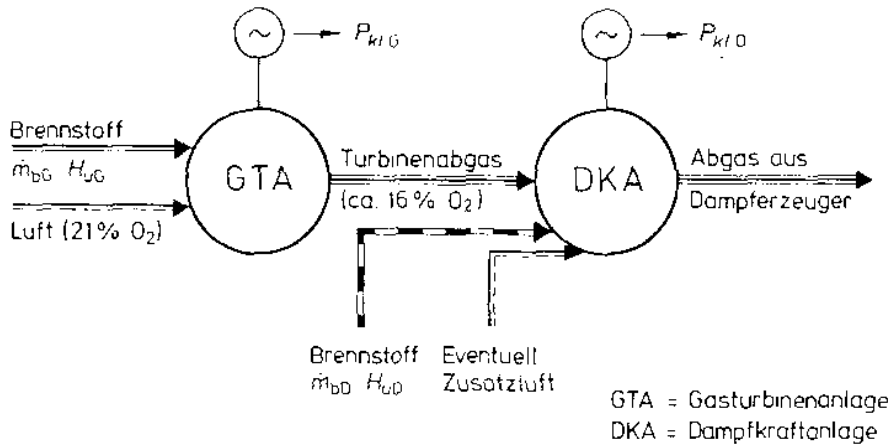
a) Gegendruck für die Turbine senken (z.B. durch Nutzung des Dampfes nach der Expansion für Heizzwecke (KWK))

b) Erhöhung des Eintrittsdruckes (oder T) in die Turbine.. technische Grenzen durch Materialeigenschaften... aber: über dem kritischen Druck: Dampferzeuger kann im Durchflussprinzip arbeiten (-> billigerer Dampferzeuger)

c) Vorwärmung des Speisewassers durch „Anzapfdampf“ in der Turbine (vor Kondensator)

Kombination von Gas- und Dampfkraftwerk (GUD):

1. Stufe: offene Gasturbinenanlage (GTA) - JOULE-Prozess
2. Stufe: Dampfkraftanlage (DKA) - CLAUSIUS-RANKINE-Prozess



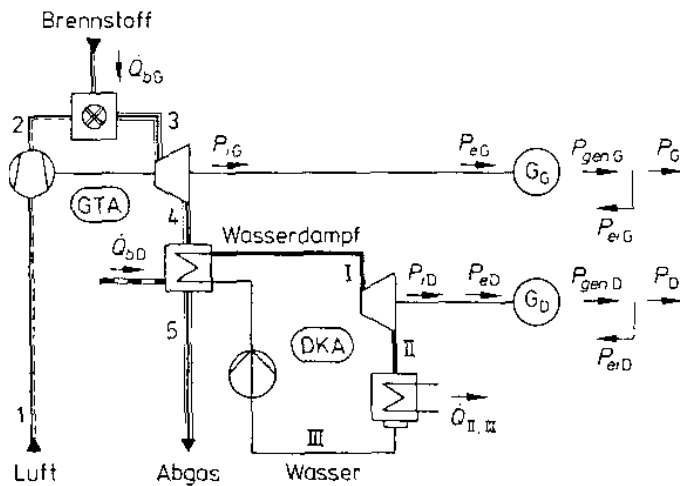
Schema eines kombinierten Gas-Dampf-Kraftwerkes mit Zusatzfeuerung

$$\eta_{GUD} = P_{GUD} / (Q_{bG} + Q_{bD})$$

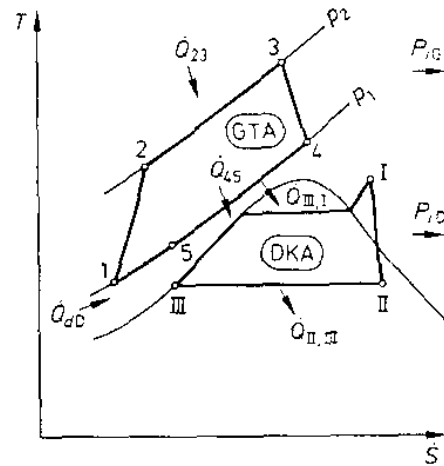
gas- oder ölbefeuert, ohne Zusatzfeuerung $\approx 53\%$
 mit Zusatzfeuerung $\approx 46\%$
 mit Wärmeauskopplung (GUD-HKW): $\approx 80\%$

(Nutzungsgrad)

$Q_{b..}$ = Brennstoffleistung



a) Schaltbild



b) T, S - Diagramm

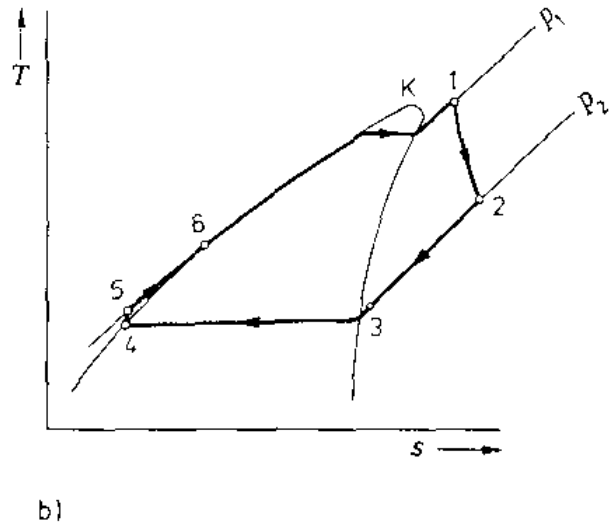
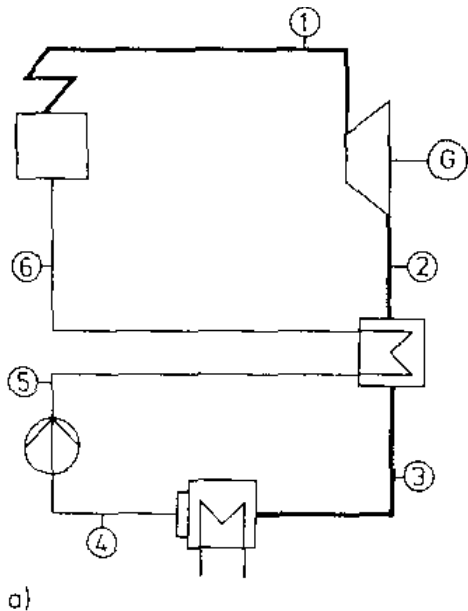
GUD-Prozess: Schaltbild und T, s - Diagramm

ORC - Prozeß: (Organic Rankine-Cycle)

Arbeitsmedium nicht Wasser, sondern ein Kältemittel (FCKW, Ammoniak, Silikonöl)
Wärme mit niedrigem Temperaturniveau kann genutzt werden (Abwärme, Abgas, Abdampf, Solarenergie, Geothermie...)

$t_{\max} = 90$ bis 300°C (meist bei 200°C betrieben)

Wirkungsgrade meist nicht über 12%.



ORC-Anlage: a) Schaltbild b) T,s - Diagramm

1 → 2 Irreversible Expansion des Dampfes in einer adiabaten Expansionsmaschine (Turbine oder Schraubenexpansionsmaschine)

2 → 3 Isobare Kühlung des Dampfes bis nahe zur Sättigung

3 → 4 Restkühlung und Kondensation des Dampfes

4 → 5 Pumpe; Druckerhöhung

5 → 6 Isobare Vorwärmung der Flüssigkeit durch den Dampf

6 → 1 Erwärmung der Flüssigkeit, Verdampfung und Überhitzung des Dampfes durch Wärmezufuhr von außen

6. Brennstoffzellen:

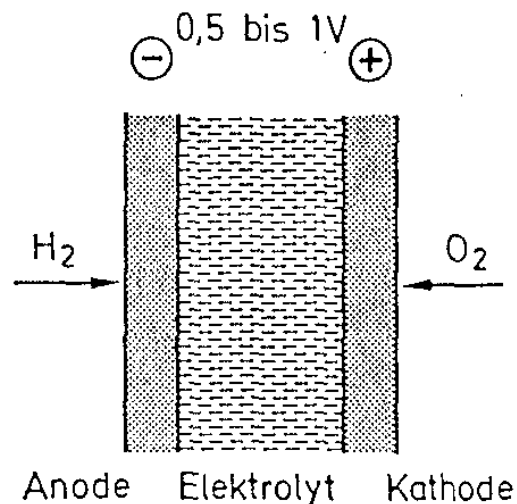
→ direkte Erzeugung von Elektrischer Energie aus H₂

Prinzip: 2 Teilprozesse



Aufbau: poröse Gasdiffusions-Elektroden umschließen einen Elektrolyten (z.B.: H₃PO₄ bei 180 - 200°C)

Elektroden: Pt + Ruß + PTFE-Fasern



Schema einer Wasserstoff-verstromenden Brennstoffzelle.

Typen:

Niedertemperaturzellen:

alkalische Elektrolyte (nicht mehr..)

Membranzellen; 80°C ..schon weit in der Entwicklung

H₃PO₄ (+P₂O₅); 160 - 220°C... marktreif (!?)

Hochtemperaturzellen:

Karbonatschmelzen-Zelle: Li₂CO₃/K₂CO₃;

Schmelze als Elektrolyt; 650-700°C

Oxidkeramische Zellen: ZrO₂ als O₂-leitender

Feststoffelektrolyt; 1000°C

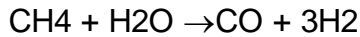
Praktische Ausführungen:

300 Zellen in Serie (elektrisch); als Zellenstapel; U = ca. 210 VDC (0.7V Zellenspannung)

Gasprozessanlage (Reformer):

CH₄ → Synthesegas: H₂ (3/4), CO₂; <1% CO (Katalysatorgift!)

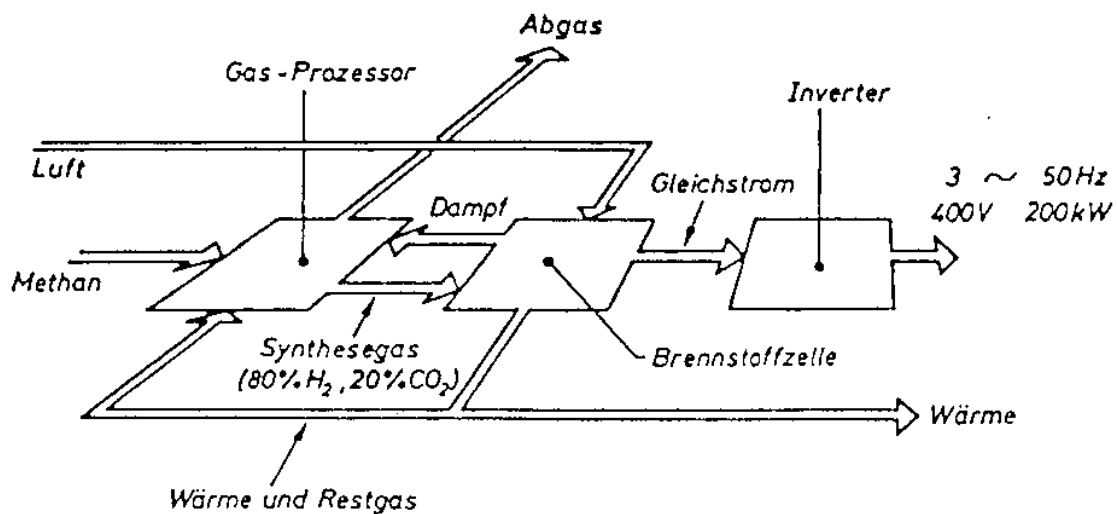
S muss entfernt werden



Die Regelung des Reformers ist sehr wichtig zur Stabilisierung des Prozesses

Wärmetauscher: Kühlung durch Wärmeträgeröl als Kühlplatten in die Zellenstapel eingesetzt; Sekundär-Kühlkreis mit Wasser (bis 120°C)

Systemwirkungsgrad: ca. 40% (sinkt allerdings mit Betriebsdauer), aber auch im Teillastbereich gleich hoher Wirkungsgrad!



Schema des Energie- und Stoffflusses in einem Brennstoffzellensystem

Ausblick: hohes Entwicklungspotenzial!

Hauptprobleme derzeit noch:

- Alterungsstabilität
- Hoher Preis

Anwendungen:

BHKW (bei Kleinanlagen schon Marktreife..)

Fahrzeugantriebe (Versuchsfahrzeuge bei den meisten Automobilkonzernen..)

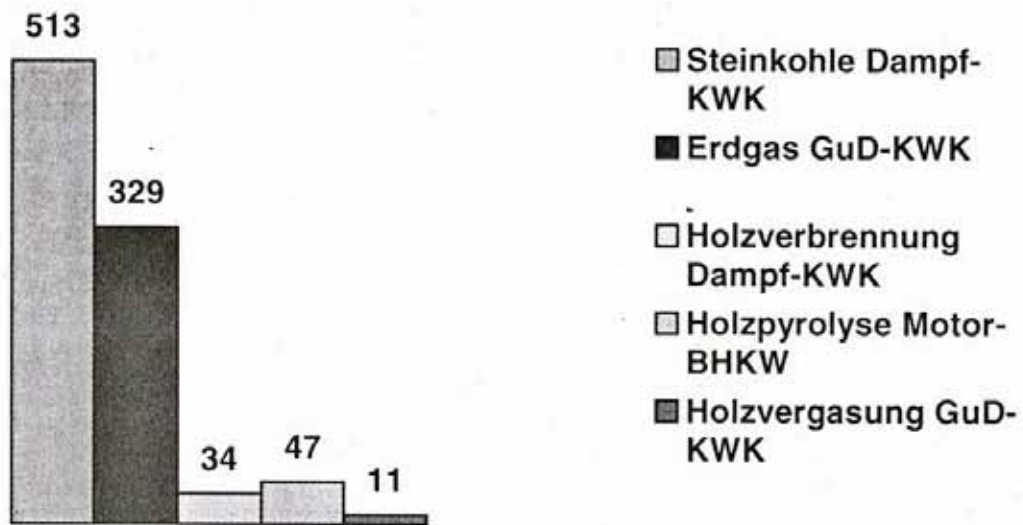


Abbildung 2: Treibhausgas-Emissionen pro erzeugter Endenergie (g CO₂äq/kWh_{th+el})

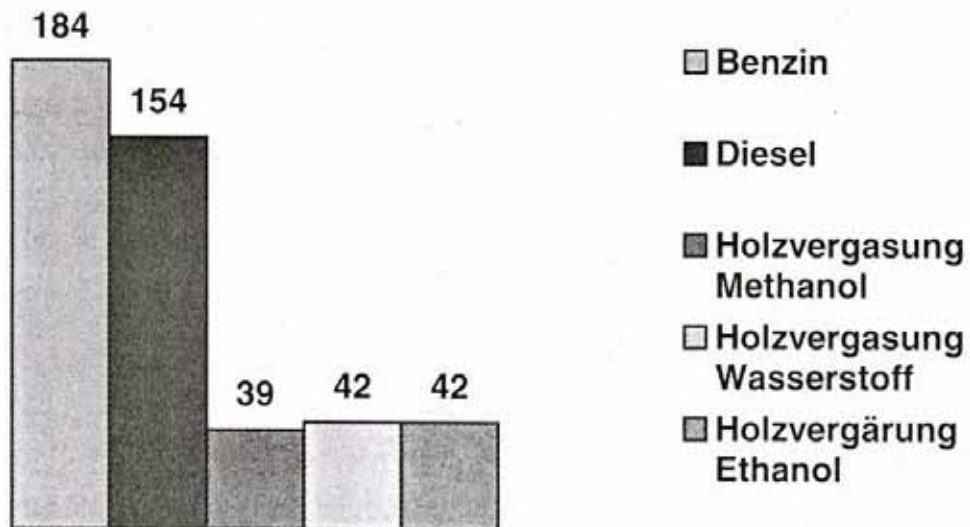


Abbildung 3: Treibhausgas-Emissionen pro Personenkilometer (g CO₂äq/Pkm)