

Anhang zum Schlussbericht

DIS 100354 / 150445

Abklärung der Potenziale der Teil- und Gesamtsysteme zur Verbesserung der Verstromung biogener Gase mit dem Gasmotor

ausgearbeitet von

Karl Höhener, Michael Spirig, TEMAS AG

im Auftrag des

Bundesamtes für Energie BFE

Februar 2004

Impressum

Auftraggeber und Begleitgruppe:

Daniel Binggeli, Bereichs- und Programmleiter Holz, BFE

Bruno Guggisberg, Bereichsleiter Biomasse und Kleinwasserkraftwerke, BFE

Dr. Alphons Hintermann, Bereichs- und Programmleiter Verbrennung, Brennstoffzellen, BFE

Fabrice Rognon, Bereichsleiter Umgebungswärme, WKK, Kälte, BFE

Auftragnehmer:

TEMAS AG, Egnacherstrasse 69, CH-9320 Arbon

Autoren:

Karl Höhener

Dr. Michael Spirig

2004

Diese Studie wurde im Rahmen der Forschungsprogramme WKK, Biomasse und Verbrennung des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

Vertrieb: ENET, 9320 Arbon, www.energieforschung.ch

Publikations-Nr. 240006

Inhaltsverzeichnis

1	Anhang	5
1.1	Marktpotenzial	5
1.2	Verfahren und Anlagenarten zur energetischen Nutzung von Biomasse	6
1.3	BHKW	8
1.4	Holzgas	10
1.4.1	Brennstoffparameter	10
1.4.2	Bestandteile von naturbelassenem Holz	11
1.4.2.1	Hackschnitzel	12
1.4.2.2	Holzpellets	12
1.4.3	Herstellungsverfahren	14
1.4.3.1	Prozesse, Verfahren und Vergasungs-Typen	14
1.4.3.2	Carbo-V-Verfahren, respektive CarboCompact	15
1.4.3.3	Fliessbett – Wirbelschicht: FICFB-gasification	17
1.4.3.4	Hersteller [H1, H15]	18
1.4.3.5	Pilotanlagen mit Festbettvergasung	21
1.4.4	Zusammensetzung, Eigenschaften	23
1.4.5	Partikelfilter	26
1.4.6	Gasqualitätsanforderungen bei Gasmotoren vs Turbinen	27
1.4.7	Zündstrahlmotor	28
1.4.8	Emissionen von WKK Anlagen	28
1.4.9	Nachbehandlung: SCRT-Verfahren	29
1.5	Biogas (Vergärung)	30
1.5.1	Verfahrensablauf	30
1.5.2	Herstellung	30
1.5.2.1	Anlagen in Betrieb	30
1.5.2.2	Firmen im Biogassektor [B18]	32
1.5.2.3	Aufbereitung	33
1.5.2.4	Prozessschritte	34
1.5.2.5	Grundstoffe und Leistungsbereiche	34
1.5.2.6	Unterscheidung der Gärverfahren	37
1.5.2.7	Kontinuierliche Trockenvergärungsverfahren	37
1.5.2.8	Nassvergärungsverfahren (Landwirtschaft)	39
1.5.2.9	BIOREK-Verfahren	40
1.5.3	Zusammensetzung, Eigenschaften	42
1.5.4	Entschwefelung mit Eisenoxidmasse	45
1.6	TA-Luft und LRV für stationäre Gasmotoren	46
2	Bezeichnungen und Abkürzungen	47
3	Links und Literaturverzeichnis	50

3.1 Links	50
3.2 Allgemeine Literatur	50
3.3 Gesamtsysteme (Gs)	51
3.4 Gasherstellung (He)	52
3.4.1 Holzgas (H), respektive Gas aus dem Vergasungsprozess	52
3.4.2 Biogas (B), respektive Gas aus dem Vergärungsprozess	54
3.5 Gasaufbereitung (Au)	56
3.6 Verstromung (Vs)	56
3.7 Emissionsnachbehandlung (En)	57

1 Anhang

1.1 Marktpotenzial

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 1) zeigt exemplarisch für Deutschland und China das mögliche Marktpotenzial für die Biogasverstromung (siehe auch [17]).

Land	Potenzial [8]
Deutschland	320 Biogasanlagen im Betrieb (Stand 11/98) 1650 Biogasanlagen im Betrieb (Stand 2001) 150 000 bis 200 000 Biogasanlagen längerfristig inkl.: Landwirtschaft, organischen Industrieabfällen, Haushaltsbiomüll
Volksrepublik China	6 - 7 Millionen Anlagen laufen (überwiegend sehr einfache Kleinanlagen mit ca. 10 m ³ Reaktorvolumen)

Tab. 1: Mögliches Marktpotenzial Deutschland und China

Die nachfolgenden Tabellen zeigen das technische Energiepotenzial von Bioenergien aufgeteilt nach Energieträgern und deren Nutzung in Deutschland. In der Summe könnte Biomasse etwa 4x mehr zur Energiegewinnung genutzt werden.

	Potenziale	Nutzung
	in PJ/a	
Brennholz		85
Waldrestholz	142	55
Industrierestholz	40	40
Altholz (ohne Altpapier)	81	12
Sonstige holzartige Biomasse	7	1
Stroh	104	3
Biogas, Klärgas, Deponiegas	145	16
Energiepflanzen	max. 400	0
Summe	max. 919	212

Tab. 2: Technische Potenziale einer Energiegewinnung aus Biomasse und deren Nutzung in Deutschland [www.fnr.de/veroff/gfg14_kwk.pdf]

Anmerkungen:

- Die zentrale Verstromung von Gas im Kombikraftwerk hat das grösste Potenzial für den Stromwirkungsgrad. Elektrizität lässt sich bedeutend besser verteilen als materielle Energieträger (Endverbrauch in Wärmepumpe). Dies setzt aber grosse Anlagen voraus (> 50 MW).
- Die dezentrale Verstromung in kleineren Kraftwerken hat vor allem bei biogenen Gasen Vorteile:
 - Biomasse kommt sehr verteilt vor. Das Zusammenführen muss mitberücksichtigt werden.
 - Dezentrale Anlagen ergeben eine grössere Unabhängigkeit und verteilen die Risiken.

1.2 Verfahren und Anlagenarten zur energetischen Nutzung von Biomasse

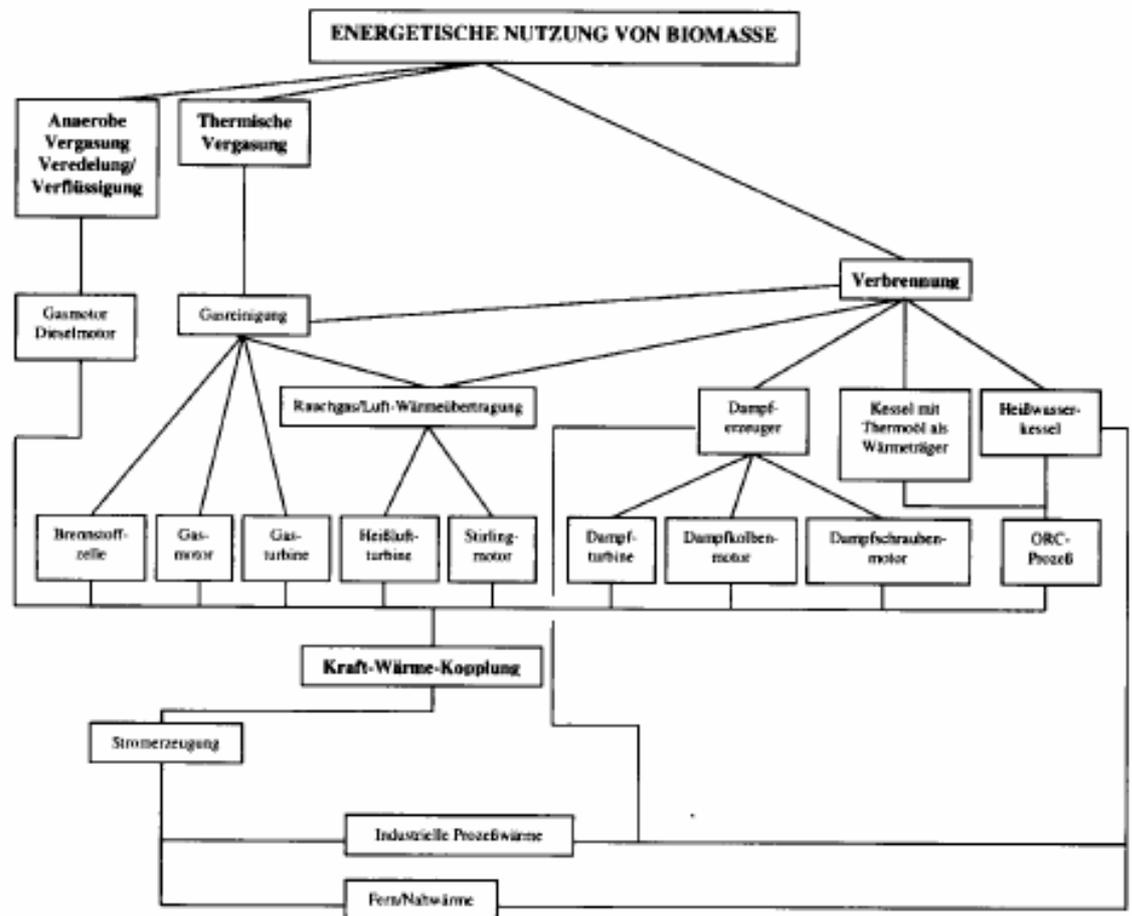


Abb. 1: Verfahren zur energetischen Nutzung von Biomasse [13]

Vorteile thermische Vergasung

- ➔ Einsatz unterschiedlicher biogener Vergasungsstoffe, wie Holz und anderer Biomasse, Klärschlamm, Müllfraktionen, entweder singular oder als Mischungen
- ➔ Eignung des Brenngases für unterschiedliche Antriebsmaschinen, wie Schwachgasmotoren, Gasturbinen, Wärmemotoren, Stirlingmotoren, Brennstoffzellen
- ➔ höherer energetischer Umsatz, bezogen auf den Energieinhalt des Vergasungsstoffs, als bei der Verbrennung, damit etwa doppelt so hoher elektrischer Wirkungsgrad sowie höherer Gesamtwirkungsgrad der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber dem Dampfprozess
- ➔ bessere Beherrschung des Emissionsverhaltens
- ➔ Eignung sowohl für den Einsatz in Großanlagen als auch in kleinen dezentralen oder mobilen Anlagen
- ➔ Möglichkeit der Herstellung von Kraft- und Treibstoffen
- ➔ Produktvielfalt (Elektroenergie, Wärme und Brennstoff sowie Synthesegas und Kohlenstoff hohen Reinheitsgrades als Rohstoffe für weitere Produkte)

Diese Vorteile zu erschliessen erfordert jedoch noch einigen Aufwand in Forschung und Entwicklung. Es gibt eine Reihe vielversprechender Lösungen an der Schwelle zur Marktreife, einen Durchbruch hat jedoch noch keine erzielt. Als ein Beispiel sei hier das Carbo-V-Verfahren erwähnt, dass ein sehr breites Spektrum an Einsatzstoffen ermöglicht und vor allem auch wegen seiner Eignung zur Synthesegaserzeugung Interesse verdient. Für dezentrale Anlagen geringer Leistung ist es wegen des hohen apparativen Aufwandes jedoch nicht oder nur bedingt geeignet.

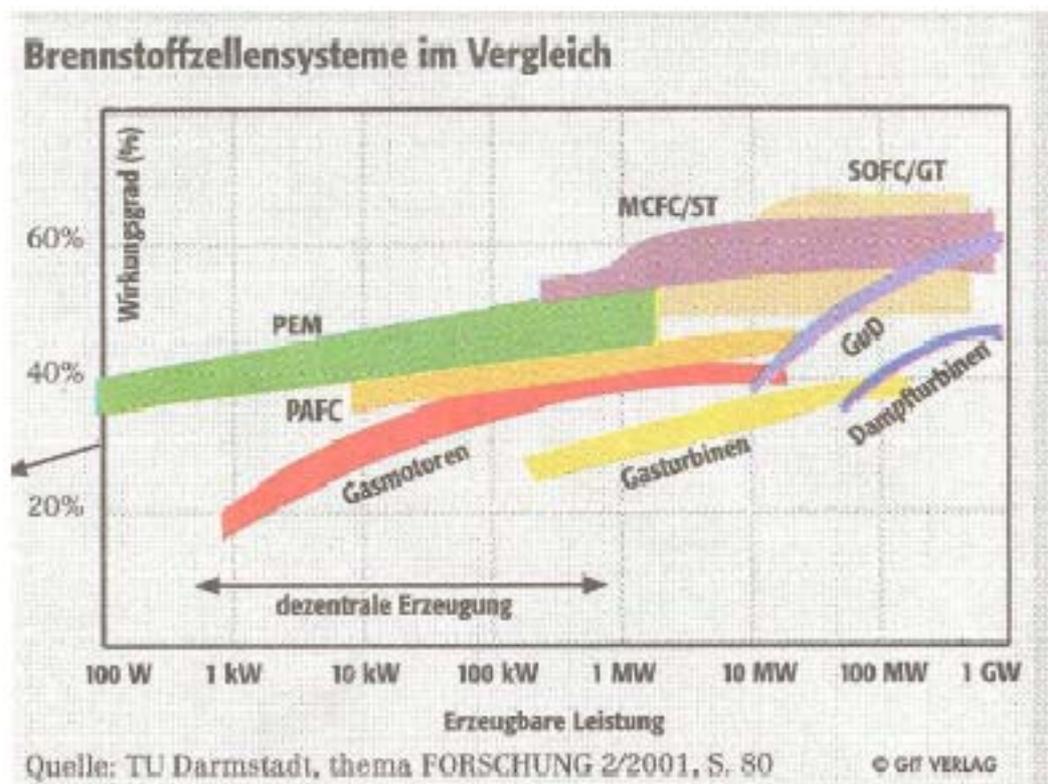


Abb. 2: Vergleich verschiedener Wirkungsgrade [13]

Anmerkung:

Von der Gasmotorseite her wird diese Art der Darstellung angezweifelt. Einerseits ist fraglich, welche Art von Wirkungsgrad relevant ist: Der Anlagenwirkungsgrad oder der Gesamtwirkungsgrad, welcher auch die Brennstoffherstellung von z.B. H₂, Brennstoffverteilung, etc. mit einbezieht. Andererseits ist der praktisch realisierte Wirkungsgrad von Gasmotoren heute höher als hier angegeben (Wirkungsgrad von 35 auf 41 Prozent, [14, Vs5]).

1.3 BHKW

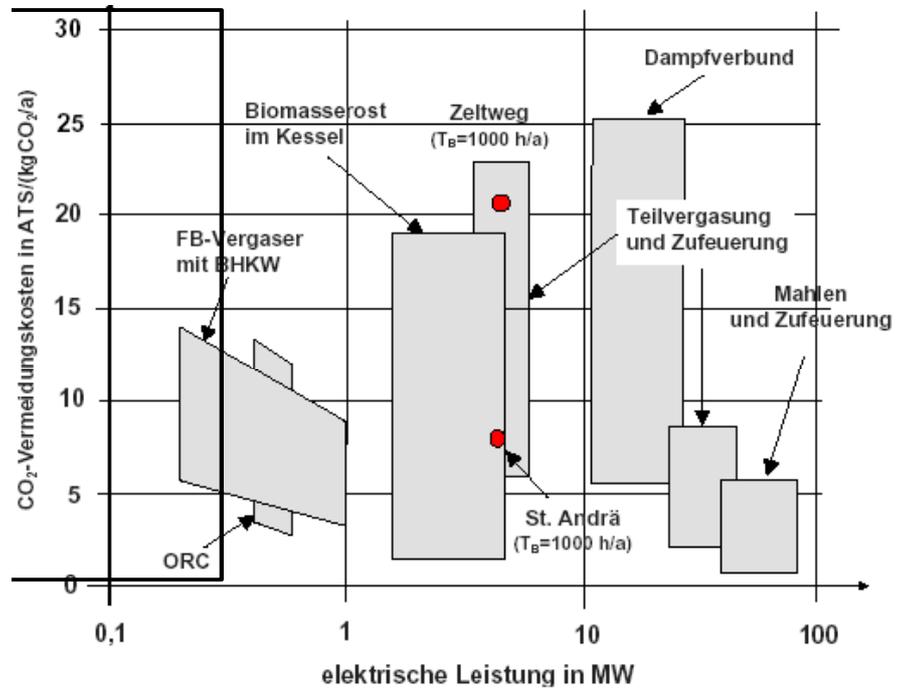


Abb. 3: Systeme zur Vermeidung von CO₂-Emissionen: Spezifische Investitionskosten zur Vermeidung von CO₂-Emissionen bei der Zufeuerung von Biomasse im Vergleich zu ausgewählten anderen Varianten [12]

Brennstoff	< 1 MW _{el}	1 - 5 MW _{el}	> 5 MW _{el}
fossile Brennstoffe (bisher eingesetzt)	bisher besetzt durch : Diesel-/Gasmotor	bisher besetzt durch : Diesel-/Gasmotor	bisher besetzt durch : Gasturbine
unbelastetes Holz (Waldrestholz, unbel. Industrierestholz)	bisher besetzt durch : Kessel- Dampfmotor	bisher besetzt durch : Kessel, Dampfmotor, Dampfturbine	bisher besetzt durch : Kessel, Dampfturbine
belastetes Holz (17. BImSchV)			bisher besetzt durch : Thermoselect, Gasmotor, MVA ¹⁾ , Dampfturbine
Klärschlamm			
Hausmüll			bisher besetzt durch : MVA ¹⁾ , Dampfturbine

¹⁾ MVA = Müllverbrennungsanlage

Einsatz denkbar Einsatz in Zukunft möglich ?

Einsatz nur unter besonderen Randbedingungen

Abb. 4 : Mögliche Einsatzgebiete für Generatorgas BHKW, Diekmann R. 1995 [H12]

Das BHKW-Infozentrum (www.bhkw-infozentrum.de) publiziert in http://www.bhkw-infozentrum.de/download/minibhkw_moduluebersicht.pdf die nachfolgende Übersicht der Hersteller und Anbieter von BHKW-Aggregaten.

Anbieter / Hersteller	Modul-Typ	Motor-Typ	el. Leistung [kW]	th. Leistung [kW]	Brennstoff-Verbrauch [kW]	el. Wirkungsgrad	th. Wirkungsgrad	Gesamt-wirkungsgrad
Erdgas-Module								
Valentin Energie und Umwelttechnik	Ecopower	Marathon Engine	2,0 - 4,7	6,0 - 12,5	8,8 - 19	25%	65%	90%
SenerTec	Dachs HKA G 5,0 Low NOx	SenerTec	5	12,3	19,6	26%	63%	89%
SenerTec	Dachs HKA G 5,5	SenerTec	5,5	12,5	20,5	27%	61%	88%
Giese Energie und Regeltechnik	Energator GB 6-15	Kubota	6	10	18	33%	56%	89%
Kuntschar + Schlüter	GBP 7 / 28	Ford VSG 413	7	28	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
EAW Energieanlagen Westenfeld	EW F 8 S	Ford VSG 413	8	19	32	25%	59%	84%
KW-Energetechnik	KWE 8G-4AP	Ford V 413	8	18	30	27%	60%	87%
Solo GmbH	Stirling Engine	Stirlingmotor	4 - 9	12 - 25	16,5 - 38	24%	74% - 65%	98% - 89%
Kuntschar + Schlüter	GTK 10 / A	Ford VSG 413	10	22	36	28%	61%	89%
energiwerkstatt GmbH	ASV 18 / 43	Ford DOC 420	14	32	49	29%	65%	94%
KraftWerk dezentrale Energiesysteme	Mephisto G 15	Ford DOC 420	5 - 14	19 - 30	23 - 44,5	21,5% - 31,5%	82,5% - 68,5%	104% - 100%
Höfler-Blockheizkraftwerke	G15 mephisto	Ford DOC 420	6 - 15	15 - 32	22 - 50	27% - 30%	68% - 64%	95% - 94%
Buderus Heiztechnik	Loganova E 0204 DN-20	Ford LRG 425	17	32	53	32%	60%	92%
EAW Energieanlagen Westenfeld	EW F 17 S (K)	Ford	17	32	53	32%	60%	92%
MENAG ENERGIE	DITOM D G 203	Deutz-Diter G 203	17	36	62	27%	58%	85%
KraftWerk dezentrale Energiesysteme	Mephisto G 18i	Ford DOC 420	6 - 18	14 - 39	20 - 58	30% - 31%	72,5% - 68%	102,5% - 99%
KraftWerk dezentrale Energiesysteme	Mephisto G 18	Ford DOC 420	6 - 18	22 - 42	27 - 58	22% - 31%	80,5% - 72,5%	102,5% - 103,5%
Kuntschar + Schlüter	GTK 18 / A	Continental TM 27	18	38	65	28%	58%	86%
MITURBO Umwelttechnik	PowerTherm 20G	Kubota VG 2203	8 - 20	14 - 38	k. A.	33%	k. A.	90%
Höfler-Blockheizkraftwerke	premi22	VW/Sk 1,4	22	45,5	78	28%	59%	87%
energiwerkstatt	ASV 30/63P	Perkins 1004	25	58	90	28%	64%	92%
MENAG ENERGIE	DITOM D TBG 203	Deutz-Diter TBG 203	25	48	86	29%	56%	85%
KraftWerk dezentrale Energiesysteme	Mephisto G26	Perkins 1004 Si	26	57	82	32%	69%	101%
MENAG ENERGIE	DITOM D G 229-4	Deutz-Diter G 229-4	27	53	96	28%	55%	83%
G. A. S. Energetechnik	µT 28-60/80 L	Capstone	28	65	112	25%	58%	83%
Buderus Heiztechnik	Loganova E 0824 DN-30	MAN E 0824 E	30	56	100	30%	56%	86%
EAW Energieanlagen Westenfeld	EW V 30 S	Valmet 420 G	30	65	106	28%	61%	90%
G. A. S. Energetechnik	µT 28-60/80 H	Capstone	30	65	112	27%	58%	85%
Kuntschar + Schlüter	GTK 30	MAN 0824	30	60	103	29%	58%	87%
KW-Energetechnik	KWE 30G-6 SPI	Ford CSG 649	30	60	100	30%	60%	90%
Heizöl-Motoren								
Kuntschar + Schlüter	HBP 5 / 20	Kubota D 722	5	20	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
SenerTec	Dachs HKA HR 5.3	SenerTec	5,3	10,4	17,9	30%	59%	89%
EAW Energieanlagen	EW K 6 S	Kubota D 11105 BG	6	13	21	29%	62%	91%
KW-Energetechnik	KWE 6D-3 AP	Kubota D1105 BG	6	14	23	26%	61%	87%
EAW Energieanlagen	EW K 10 S	Kubota D 1703 BG	10	19	31	32%	61%	93%
KW-Energetechnik	KWE 10P-3 AP	Kubota D 1703 - E BG	10	18	33	30%	55%	85%
Kuntschar + Schlüter	HTK 12 / A	Kubota V2203	12	22	42	29%	52%	71%
KW-Energetechnik	KWE 14D-4 AP	Kubota V2203-E BG	14	25	45	31%	56%	87%
EAW Energieanlagen	EW K 16 S	Kubota D 2803 BG	16	27	47	34%	57%	91%
Kuntschar + Schlüter	HTK 18 / A	Kubota V3300	18	32	62	29%	52%	71%
EAW Energieanlagen	EW I 20 S	Iveco 8041 I 05	20	32	58	34%	55%	89%
KW-Energetechnik	KWE 20D-4 AP	Kubota V 3300 E	20	34	65	31%	52%	83%
MITURBO Umwelttechnik	PowerTherm 20H	Kubota VG 2203	7 - 20	14 - 35	k. A.	34%	k. A.	90%
Kuntschar + Schlüter	HTK 25	Cummins 4B 3,9	25	32	70	36%	46%	82%
Kuntschar + Schlüter	HTK 30	Iveco 8041	30	38	83	36%	46%	82%

Tab. 3: Das serienreife Holzgaskraftwerk zur Erzeugung von Ökostrom & Biowärme (zu finden unter <http://sw-energie.saika.at/Holzgaskraftwerk.htm#HGKW5>).

1.4 Holzgas

1.4.1 Brennstoffparameter

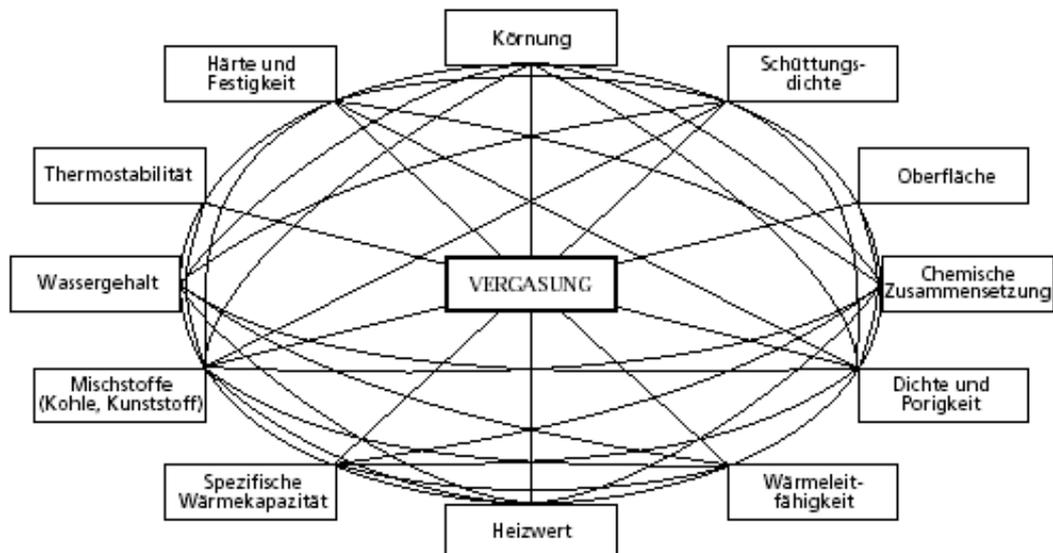


Abb. 5: www.vivis.de/Zeitschrift/Journal/texte/vergasung.pdf

Der Brennstoff Holz wird wie folgt charakterisiert:

1. Art und Zusammensetzung

Folgende feste Ausgangsbrennstoffe, respektive Rohmaterialien stehen zur Verfügung:

- Waldenergieholz
- Hölzer aus der Landschaftspflege
- Restholz aus der Holzverarbeitung
- Recyclingholz nach der stofflichen Nutzung
- nachwachsende Rohstoffe, die gezielt zur energetischen Nutzung angebaut werden
- Koppelprodukte aus landwirtschaftlicher Produktion

Im Anhang "Holzgas: Bestandteile von naturbelassenem Holz" ist eine Elementanalyse für verschiedene Holzsorten gegeben [H19].

2. Feuchtigkeit, Wassergehalt

10-30 Gewicht%, davon abhängig der Feststoffheizwert $H_u = 8-20$ MJ/kg

z.B. Brennholz mit Atro-Feuchte 20% ergibt einen Gasheizwert von 4.9 MJ/Nm³ [B13]

3. Spezifische Oberfläche als Funktion der Korngröße, Form

4. Ascheschmelzpunkt und -Gehalt

Bei Altholz spielt dies eine Rolle bei der Schadstoffbindung. Bei anderen Holzarten ist dies kein Problem.

1.4.2 Bestandteile von naturbelassenem Holz

	Einheit	Holz gemischt ^a	Holz-Schnitzel ^c	Kiefer ^b (stückig)	Birke ^b (stückig)	Fichte ^b (stückig)	Stückholz ^d	Holz-schnitzel ^d	Dieses Projekt
Asche	[Gew.-%]	0.1 - 1	2.2	0.1	0.2	0.1	0.88	0.90	
Wassergehalt	[Gew.-%]	10 - 60	45	9 - 11	7 - 18	6 - 16	14	54	
Heizwert H _u	[MJ/kgTS]	18.5	9.85	19.0	19.1	19.3			
C	[Gew.-%]	50	51	46.93	47.12	47.25			49.4
H	[Gew.-%]	6	5.45	6.28	6.22	6.30			6.10
O	[Gew.-%]	44		46.72	46.55	46.38			44.1
N	[Gew.-%]	0.08	0.25	0.07	0.11	0.07			0.13
S	[Gew.-%]	0.01					0.02	0.015	0.016
Cl	[Gew.-%]	<0.001	<0.004						0.001
K	[Gew.-%]	0.11	0.14				0.12	0.11	0.12 ^{0.065}
Ca	[Gew.-%]	0.27	0.42				0.43	0.27	0.34 ^{0.13}
P	[ppm]		160				210	92	100
Pb	[ppm]	1.1	<0.1 - 4.7				0.3	<1	1 ⁷
Cd	[ppm]	<0.1	<0.05 - 0.3				<0.1	<0.1	0.1 ^{0.3}
Cr	[ppm]	<0.5	<0.2 - 2.4				0.3	<0.3	1
Co	[ppm]	<0.1					<0.1	<0.1	0.1 ^{0.2}
Cu	[ppm]	1.9	<1 - 5.1				4.7	1.9	2.9 ⁰
Mo	[ppm]	<0.2					<0.2	<0.2	? ³
Ni	[ppm]	<1.2	<1 - 1.3				<1.2	<1.2	0.5
Hg	[ppm]		<1						-
Zn	[ppm]	11	3.4 - 28				4.0	11	22
As	[ppm]		<1						-
Mn	[ppm]						<10	100	80
Mg	[ppm]						210	330	270 ²¹⁰

^a: (Nussbaumer, 2000).

^b: (Skreiberg, 1997).

^c: (EMPA, 2000), Herkunft nicht näher spezifiziert..

^d: (BUWAL, 1996), Mittelwert aus 7 Proben; Herkunft nicht näher spezifiziert..

Tab. 4: Bestandteile von naturbelassenem Holz [H19]

**Schwankungsbereiche möglicher Schadstoffbelastungen bei Gebrauchthölzern
und unbelasteten Hölzern – Vergleich mit Grenzwerten zur Herstellung von
Holzwerkstoffen (AltholzV; Anhang II)**

Element	Gebrauchtholz (mg/kg)	unbelastetes Holz (mg/kg)	Grenzwert* (mg/kg)
Stickstoff	7.900 – 16.000	1.500	
Schwefel	100 – 2.000	60	
Chlor**	27 – 2.620	50 - 72	800
Fluor	4 – 345	< 20	100
Arsen	< 0,2 – 24	≤ 0,1	2
Cadmium	3	0,04 – 0,1	2
Chrom	< 0,1 – 501	0,4 – 34	30
Blei	4 – 1.030	0,4 – 4,2	30
Kupfer	0,3 – 1.430	1,2 – 2,8	20
Zink	20 – 1.540	11 – 120	
Pentachlorphenol	< 0,1 - 28		3
Polychlor. Biphen.			5

* Bezug: stoffliche Verwertung / Grenzwerte für Holzhackschnitzel und Holzspäne zur Herstellung von Holzwerkstoffen (AltholzV; Anhang II)

** bei PVC – beschichteten Holzwerkstoffen bis zu 24.190 mg/kg TS

Tab. 5: [www.izes.de/downloads/anhang.pdf]

1.4.2.1 Hackschnitzel

Durchbruch: Großhacker zur Waldhackschnitzelerzeugung entwickelt und erfolgreich getestet, durchschnittliche Hackleistung liegt bei 15 bis 20 Minuten je Abrollcontainer (37,7 m³) = 130 m³/h (Firma HTM Häckseltechnik in Soltau und der Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen)

1.4.2.2 Holzpellets

Eingangsmaterial [H11]:

- Späne und Stäube aus naturbelassenem Holz ohne Verunreinigungen (Leim, Beschichtungen, Abgrenzung von Futtermittelanlagen und landwirtschaftlichen Trocknungswerken etc)
- max. Korngröße von 4 mm
- Die Mindestmenge für eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Produktion liegt bei 5'000 – 7'000 t/a entsprechend 25'000 – 35'000 MWh/a, was dem Energieverbrauch von 2'000 – 3'000 Einfamilienhäusern entspricht. Bei 8'000 h/a ergibt das **Maschinengrößen von 3-5 MW.**

	Einheit	DIN 51731 Größenklasse HP 5	ÖNORM M 7135 Größenklasse HP 1
Durchmesser	mm	4 – 10	4 – 10
Länge	mm	< 50	< 5 x Durchmesser
Rohdichte	g/cm ³	1,0 – 1,4	> 1,12
Wassergehalt	---	< 12 %	< 10 %
Heizwert	kWh/kg	4,9 – 5,4	> 5,0
Aschegehalt	---	< 1,5 %	< 0,5 %
Abrieb	---	---	< 2,3 %
Preßhilfsmittel	---	nicht zulässig	< 2 % (pflanzl. Stoffe)
Überwachung	---	Eigenüberwachung	Erstprüfung period. Fremdüberwachung

Tab. 6: Normen für die Produktion von Holzpellets [H11]:

Produktionskosten [H11]:

- 100 - 130 €/t (bei einer Auslastung von 2'000 – 4'000 Betriebsstunden p.a)
- 73 - 95 €/t (bei einer Auslastung von 7'000 – 8'000 Betriebsstunden p.a)
- 52 - 13 €/t (ohne Trocknung (selten))

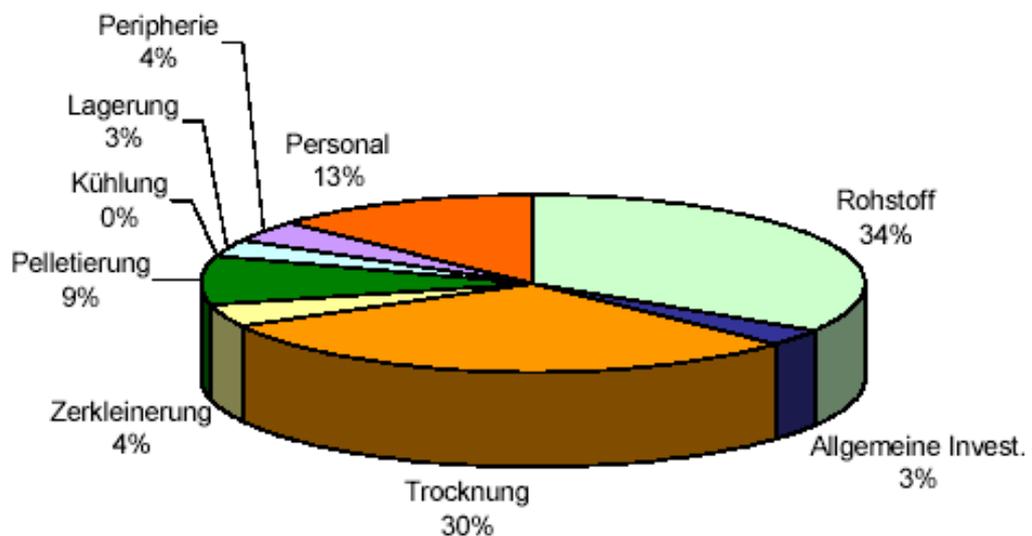


Abb. 6: Zusammensetzung der Produktionskosten von Holzpellets

1.4.3 Herstellungsverfahren

1.4.3.1 Prozesse, Verfahren und Vergasungs-Typen

Einteilung nach Feststofftransport		
Typ	Vorteile	Nachteile
Festbett	Einfach	Verteilprobleme im Querschnitt, gleiche Stückgröße
Drehrohr	Robust, relativ einfach	Anlagenvolumen Verweilzeitspektrum
Wirbelschicht	Temperaturkonstanz, guter Wärme- und Stofftransport	Fluidisierungsmedium, Bettmaterial, Regelungsaufwand,
Flugstrom	Hohe Temperatur, guter Wärme- / Stofftransport	Aufwand, Trägergas, nur fein gemahlene Einsatzgut
Einteilung nach Vergasungsmittel		
Medium	Vorteile	Nachteile
Wasserdampf	Heizwert des Gases hoch, kostenneutrales Medium Wasser, Brennstoffspektrum groß	Energiezufuhr für stark endothermen Prozess ist aufwendig, ggf. Dampferzeugung mit Wasseraufbereitung erforderlich
Luft	Einfaches Verfahren, kostenneutrales Medium	Heizwert des Holzgases niedrig, hohes Gasvolumen Brennstoffspektrum eingeschränkt
Sauerstoff	Heizwert des Holzgases hoch, Energiezufuhr verteilt über der Oxidationszone	Luftzerlegung erforderlich, Brennstoffspektrum eingeschränkt

Tab. 7: Übersicht über die Holzvergasungsprozesse [H15]

	Teergehalt im Gas	Staubgehalt im Gas	Gleichmäßigkeit der Gaserzeugung (Heizwert + Men- ge)	Scale-up-Möglichkeit	typ. Leistung [MW _a] min. max.	
Festbett Gleichstrom	sehr gering	mäßig	u. U. schlecht (Anlagengröße!)	schlecht	0,05	0,5
Festbett Gegenstrom	sehr hoch	mäßig	mäßig	mäßig	0,5	10
Wirbelschicht, stationär	mäßig	hoch	sehr gut	gut	0,5	20
Wirbelschicht, zirkulierend	gering	sehr hoch	sehr gut	sehr gut	1	100

Tab. 8: Verschiedene Vergasertypen [H16]

1.4.3.2 Carbo-V-Verfahren, respektive CarboCompact

Carbo-V-Verfahren [H17]

Vergasungsprozess, der Kohle, Biomasse oder vorbehandelte Siedlungsabfälle in absolut teerfreies Rohgas umwandelt. Marktsegment: 5 MW_e - 20 Mwe. Die Verfahrensstufen sind:

1. Niedertemperaturvergaser (NTV, Holzkohlenmeiler-Technik)

Getrocknete Biomasse (Wassergehalt 15 bis 25 Masse-%) wird durch partielle Oxidation (Verschmelzung) mit Luft oder Sauerstoff bei Temperaturen zwischen 400°C und 600°C in Biokoks und Schwelgas zerlegt (karbonisiert).

2. Hochtemperaturvergasung

Teerhaltiges Schwelgas wird in der Brennkammer des Carbo-V-Vergasers bei 1'300°C bis 1'500°C oberhalb der Ascheschmelztemperatur mit Luft und/oder Sauerstoff unterstöchiometrisch verbrannt. Langkettigen Kohlenwasserstoffe (Teere) werden vollständig in CO, H₂, CO₂ und Wasserdampf umgewandelt.

3. Endotherme Flugstromvergasung

Biokoks aus dem NTV in den Carbo-V-Reaktor wird unterhalb der Brennkammer eingeblasen und reagiert dort mit dem Gas aus der Brennkammer. Dabei sinkt die Temperatur durch endotherme Reaktionen in Sekunden von mehr als 1'300°C auf ca. 800°C.

Betriebserfahrungen wurden während 3 Jahren über insgesamt 5'000 Betriebsstunden, mit unterschiedlichen Brennstoffen gemacht:

- Naturbelassenes Holz
- Stein- und Braunkohle
- Klärschlamm
- Trockenstabilat
- Altholz
- Tiermehl.

Vorteile gegenüber dem Stand der Technik bei der Vergasung und Verbrennung fester Brennstoffe, Müll und Biomasse:

- **teerfreies Gas aus allen Brennstoffen ohne katalytische Nachbehandlung**
- hohe Brennstoffausnutzung

- wahlweise Brenn- oder Synthesegas
- höherer elektrischer Wirkungsgrad durch Umwandlung in Motoren oder Gasturbinen
- große Produktpalette von Strom und Wärme, bis Kraftstoffe und Methanol
- niedrige Emissionswerte
- baustoffgeeignete Schlacke
- Überlegenheit des Verfahrens in Bezug auf Wirkungsgrad und Gasqualität
- apparatetechnische Aufteilung ergibt optimale Anpassung der Verfahrensführung (Temperatur, Verweildauer, Stoffströme, Geometrie, etc.) an die spezifischen Erfordernisse der Teilprozesse
- Möglichkeit des "Scaledown" der Technologie auf kleine Leistungseinheiten für Land-, Forst- und Holzwirtschaft

CarboCompact

Die thermische Leistung von Anlagen beträgt 0,5 bis 1 MW, ausreichend für Motorkraftwerke im Leistungsbereich von 150 - 250 kWel.

Marktreife:

- Demonstrationsprojekte in Planung
- Vertriebs- und Servicenetz befindet sich im Aufbau
- semi-mobile Ausführung der Anlage stellt keine hohen Ansprüche an den Einsatzstandort
- Die Anlage ist für den Inselbetrieb geeignet.

Eckdaten:

- Brennstoff: Biomasse (TS 85% 125 kg/h, 500 kW, 900 t/a)
- Elektrische Leistung: 125 kW
- Thermische Leistung: (90/50°C) 200 kW
- Personaleinsatz: max. 2 h/d für Biomassehandling

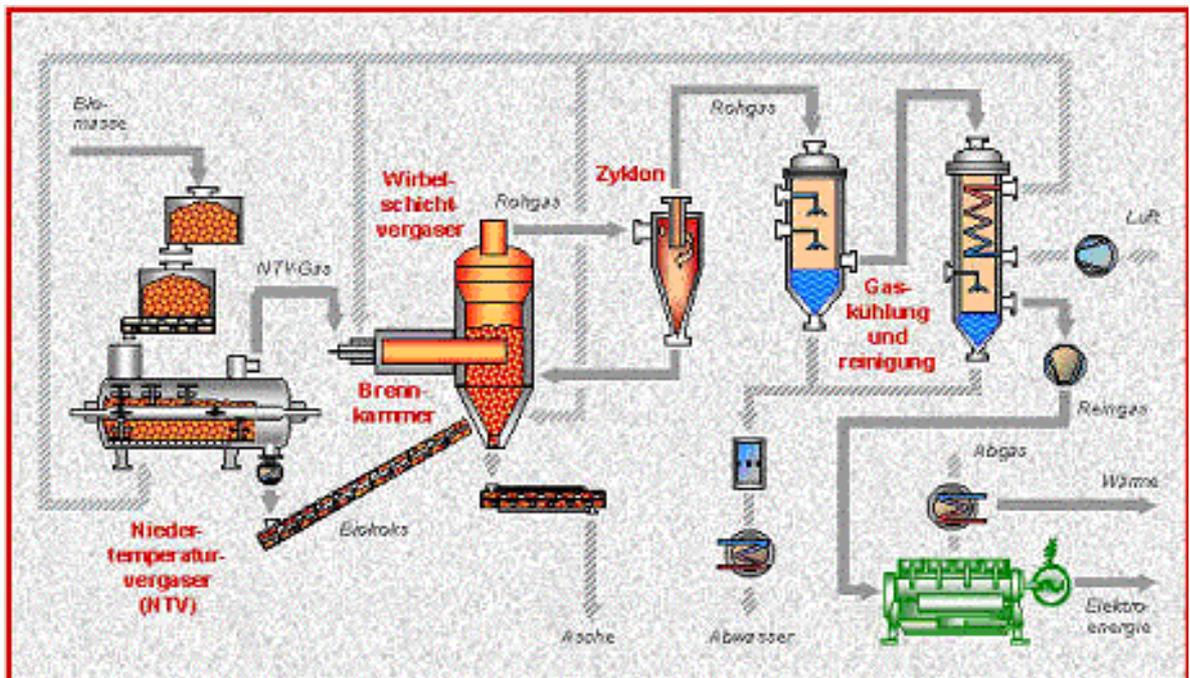


Abb. 7: CarboCompact-Verfahren [H17]

1.4.3.3 Fließbett – Wirbelschicht: FICFB-gasification

[H12, He2] divide the fluidised bed into two zones, a gasification zone and a combustion zone. Between these two zones is a circulation loop

Cleaning and Cooling of the product gas (Test phase, no results published)

- a. **Heat Exchanger** with continuous cleaning system
cool product gas from 850°C to 150°C, after about 500 operating hours no deposits of tar, only fly coke
- b. **Sand Bed Filter** for the FICFB-gasifier
separate the particles (99%) and heavy tars (20-80%), at 150-250°C, medium 6 regenerated, dp=20mbar
- c. **commercial Bag Filter** (Schlauchfilter)
particulates (99%), tars (20-90%),, at 140 and 200°C, ev. with additives
- d. **Scrubber** (Entschwefelungsanlage)
For gas engine, packing with organic solvents

Advantages of this gasification system compared with an air blown gasifier

1. product gas nearly **free of nitrogen** (N₂)
2. calorific value higher than **13 MJ/Nm³** (instead of 4.5 - 5.7)
3. very **low tar** content due to steam gasification
4. gas quality is **independent of water** content in biomass feed
5. the apparatus is very **compact**
6. a wide **range of feedstock** can be gasified
7. possibility to use a **catalyst as bed material** (regeneration of catalyst in combustion zone) to influence the gas composition and gasification kinetic in a more positive way

Spezifikation	Anlage 1	Anlage 2	Einheit
thermal output	100	100	kWth
fuel	wood chips	wood pellets, wood chips, biomass residues	-
reactor	80x12	Ø30	Cm
riser	7.5x12	Ø10	Cm
riser height	250	425	Cm
bed material	quartz	quartz, natural catalyst, catalyst	-
bed mass	37.5	70.0	Kg
mean diameter	0.6	0.5	mm
Operation Parameter	Anlage 1	Anlage 2	Einheit
type of fuel		wood pellets	-
feed		10-40	kg/h
steam		2-15	kg/h
steam-fuel ratio		0.15-1	-
gasif. temp		750-900	°C
comb. temp		850-950	°C
circulation rate		40-50	kg/kg fuel

Tab. 9: ICFB-gasification+cleaning ([H12], Wirbelschicht)

Table 1. main results of the 2nd pilot plant

hydrogen	30-45 vol%		raw gas	clean gas
carbon monoxide	20-30 vol%		tar	0,5-1,5 g/Nm ³
carbon dioxide	15-25 vol%		particles	10-20 g/Nm ³
methane	8-12 vol%		ammonia	500-1000 ppm
nitrogen	1-5 vol%		hydrogen sulfide	20-50 ppm

Fuel analysis (DIN)	Dry wood pellets		Product gas Anlage 2	
water	7.3	w.-%	H ₂	37.7
ash	0.6	w.-%	O ₂	0
volatile matter	73.3	w.-%	N ₂	3.2
fixed carbon	14.0	w.-%	CO	26.2
C	51.5	w.-%, dm	CH	49.9
H	6.3	w.-%, dm	CO ₂	20.3
O	41.3	w.-%, dm	Ethene	2.5
N	0.22	w.-%, dm	Ethane	0.2
S	< 0.05	w.-%, dm		100.0
calorific value	15.6	MJ/kg	calorific value	12.6 [MJ/Nm³]

Tab. 10: Bestandteile von Holzgas [H12]

1.4.3.4 Hersteller [H1, H15]

Unter www.gasifiers.org/manufacturers/index.php?oder=name befindet sich folgende Liste von registrierten Vergaser Hersteller. Auf dem Netz sind mit den Namen auch deren Produkte und Produktspezifikationen verlinkt. Die Detaildaten sind aber sehr unvollständig.

Registrierte Vergaser Hersteller	Land
Martezo	France
Battelle Columbus Laboratories, BCL	United States
Ventec Waste to Energy Ltd	United Kingdom
Xylowatt SA	Switzerland
KARA Energy Systems BV	Netherlands
Rural Generation Ltd	United Kingdom
Foster Wheeler Energia Oy	Finland
Babcock Wilcox Vølund	Denmark
MELIMA	Switzerland
B9 Energy Biomass Ltd	United Kingdom
BG Technologies, LLC	United States
Brightstar Synfuels Co.	United States
Carbona Corp. USA	United States
Chiptec Wood Energy Systems	United States
CLEW- Thermal Technologies, Inc.	United States
Cratech	United States
PRIMENERGY, Inc	United States
Thermochem Inc (MTCI)	United States
Thermogenics Inc.	United States
Third Generation, Ltd	United Kingdom
Wellman Process Engineering Ltd	United Kingdom
Chevet	France
Sur-Lite corporation	United States
Heuristic Engineering INC.	Canada

Kemestrie's Inc - BIOSYN	Canada
Kvaerner Pulping AB Power Division	Sweden
TPS Termiska Processer AB	Sweden
Lurgi Energie und Umwelt GmbH	Germany
AHT Pyrogas Vertriebs GmbH	Germany
Easymod Energiesysteme GmbH	Germany
Imbert GmbH für Energie und Umwelt	Germany
Costich Company	United States
VER GmbH	Germany
Krupp Uhde GmbH	Germany
Carbona Inc.	Finland
Condens Oy	Finland
C.C.T. SPA	Italy
Danieli Ambiente S.R.L.	Italy
Ensofor SA	Switzerland
NOELL-KRC Energie- und Umwelttechnik GmbH	Germany
Rheinbraun	Germany
Gas Energietechnik	Germany
Umwelt- und Energietechnik GmbH	Germany
Babcock Borsig Power, Austrian Energy	Austria
PPS Pipeline Systems GmbH	Germany
Procone Vergasungssysteme GmbH	Switzerland
Grubl	Austria
PRM Energy Systems, Inc.	United States
Babcock Borsig Power, Austrian Energy	Austria
Biomass Engineering Limited	United Kingdom
rgr ambiente srl	Italy
TK Energi AS	Denmark
Vidir Machine Inc	Canada
Robb Walt	United States
XYLOWATT®	Belgium
KN Consult ApS	Denmark
FLS miljø a/s	Denmark
FERCO	United States
Radhe Renewable Energy Development Associate	India
Danish Technical University	Denmark
Puhdas Energia Oy	Finland
COSMO POWERTECH PVT. LTD.	India
Bioflame Ltd	United Kingdom

Tab. 11: Registrierte Vergaser Hersteller

In der folgenden Aufzählung sind gewisse Hersteller nach Vergasertechnologie geordnet.

1. Festbett

- a) Querstrom
 - VER GmbH
- b) Gleichstrom
 - British Gas Lurgi Gaserzeuger (http://www.mg-lee.de/lurgi_ee/deutsch/nbsp/menu/technologien/abfallbehandlung/gaserzeugung/festbett/index.html)
 - Pyroforce (--> Jenbacher, PSI, TU Wien) Anlagen: Spiez (Pyroforce Festbett), Güssing (TU-Wien-FICB, Wirbelschicht) [H12]

- Xylowatt (--> Menag, ETH) Anlagen ??
- Jaccar (Tessin)
- OMEGA-Verfahren der Fa. Oxytec Energy GmbH
- c) Zweistrom, Zweizonen
 - Jäckel GmbH
- d) Mehrstufige Vergaser
 - TU Dänemark, EASYMOD-Vergaser (3-stufig)

2. Fließbett - Wirbelschicht

- ZWS-Gaserzeuger von Lurgi, Ahlström, Kvaerner, TPS (http://www.mg-lee.de/lurgi_ee/deutsch/nbsp/menu/technologien/abfallbehandlung/gaserzeugung/wirbelschicht/index.html)
- HPR-Verfahren, TU München, indirekt beheizt mit Natrium- oder Kaliumgefüllten Wärmerohren [H15]
- MTCI-Verfahren, indirekt beheizt mit Gas-Pulsbrennern, USA, Spot-AG in Lizenz [H15]
- FICFB-gasification Wirbelschicht, Umsicht, TU Wien (siehe Anhang "Holzgas: Herstellungsverfahren: Fließbett – Wirbelschicht: FICFB-gasification")
- SilvaGas- Verfahren der Fa. FERCO, USA
- HTW
- UHDE
- IPV-Verfahren [H15], Universität Siegen Gegenstrom-Pyrolyse-Festbett, Holzkohle zusammen mit allem Kondensat in einer Wirbelschicht verbrannt

3. Flugstrom

- BTG (Biomass Technology Group) Niederlanden, Arbeitsgruppe im Forschungszentrum Karlsruhe, Suspension aus Pyrolyseöl und Holzkohle als Sekundärbrennstoff zum Einsatz in zentralen Flugstromvergasungsanlagen, Forschungsstadium [H15]

1.4.3.5 Pilotanlagen mit Festbettvergasung

Ort	System, Lieferant	Leistung MWe	Status
Høgild, Dänemark	Martezo, Gleichstrom, mit Mercedes Gasmotor	0.13	Anlage und Gasreinigung mehrmals umgebaut
Harboøre, Dänemark	Babcock & Wilcox, Vølund Gegenstromvergaser; seit 2000 mit Gasreinigung und 2 Jenbacher Motoren	1.5	Seit 2000: 3000 Stunden Stromproduktion, Motorwirkungsgrad 36%
Gazel, Belgien	Xylowatt sa, Gleichstromvergaser und Zündstrahlmotor	0.15	In Betrieb seit Sept. 2000
Regal, Belgien	Xylowatt sa, Gleichstromvergaser und Zündstrahlmotor	0.3	Kontinuierlicher Betrieb ab November 2002
Viking gasifier, DTU, Dänemark	2-stufiger Vergaser, entwickelt von DTU, vorgesehen für Langzeitversuche	0.017	In Betrieb seit Juni 2002
Eckenförde, EVN, Domsland, Deutschland	Gleichstromvergaser basierend auf AHT Technologie	0.18	Betriebsaufnahme 2001, Weiterentwicklung des Vergasers geplant
Siebenlehn, Deutschland	Gleichstromvergaser Procone	3	Nach Konkurs von Babcock Borsig stillgelegt
UET, Freiberg, Deutschland	Carbo V Verfahren	0.25	1000 h Dauerbetrieb, Kompakteinheit im Bau
Österreich	Grübl, Holzvergaser	0.05	Mehrere Anlagen auf Bauernhöfen in Betrieb
Londonderry, Nordirland, UK	Gleichstromvergaser	0.1	Tagesbetrieb, 15'000 Betriebsstunden
Blackwater Valley Museum, Nordirland	Gleichstromvergaser	0.2	Kontinuierlicher Betrieb, 1'000 Betriebsstunden
Spiez, Schweiz	Pyroforce Vergaser, Doppelfeuervergaser	0.2	In Betrieb seit 2001 Mehr als 1'500 Betriebsstunden mit Motor
Bulle, Schweiz	Xylowatt, Open Top Vergaser	0.2	In Betrieb seit Juni 2002 600 Betriebsstunden mit Motor

Tab. 12: Festbettvergaser zur Stromerzeugung [H2O]

Die aktuelle Beurteilung ist wie folgt [H2O]:

- a) Allgemein: Die kommerziellen Rahmenbedingungen (tiefe Energiepreise) verhindern den kommerziellen Erfolg der Stromerzeugung mittels Biomasse-Vergasung

1.4.4 Zusammensetzung, Eigenschaften

Komponenten		Heizwert	Vol% (Vergasungsmittel, [4])		
Brennbar	Abk.	H _u [MJ/m ³]	Luft		Sauerstoff
Wasserstoff	H ₂	10.8	5 - 25 17**	12 - 16 16*	30 - 45
Kohlenmonoxyd	CO	12.6	10 - 25 12.8**	18 - 22 19*	30 - 40
Methan	CH ₄	35.9	1 - 5 2.1**	1.8 - 2.2 2.0*	0.5 - 3
Kohlenwasserstoff	C ₂ +		0.5 - 5.5		
Total (Schwachgas)		4.5 - 5.7			
Unbrennbar					
Kohlendioxyd	CO ₂		5 - 15	12*	15 - 30
Stickstoff	N ₂		45 - 55	51*	0.5 - 32
Wasserdampf	H ₂ O				
Verunreinigungen (vor allem problematisch bei GT, Methanolsynthese, Brennstoffzelle)					
Schwefelverbindungen	H ₂ S, COS		Typischer Schwefelanteil 0.3 0.1-2.2		
Alkalimetalle (Kalium, Natrium)			<p>Ascheanalyse von reinem Waldhackgut [18]</p>		
Stickstoffverbindungen	NH ₃ , HCN				
Halogenverbindungen	HCl, HF				
Schwermetalle	Zn, Pb, K				
(Naphthalin, Phenol)					
		Zielwert [mg/Nm³]	Anforderungen [mg/Nm³]	[mg/Nm³]	
Russ, Staub, Asche, Bettmaterial, Koks	0 - 5 0.3***	0 - 50* (<10 mm)	100 - 500 (0.05-0.2 µm [H5] 1 - 10 µm [Au3])		
Teer ²	0 - 50	0 - 100 330*	100 - 1'000		

Tab. 13: Heizwert H_u [MJ/m³] und Gasanteile in Vol% (nach Gasaufbereitung)

- * Xylowatt Anlage, nach Auswaschen, aus Brennholz mit Atro-Feuchte 20% [H8]
- ** Pyroforce Anlage [H4, H22]
- *** Gleichstromvergaser inkl. Gasaufbereitung von Martezo [H1]

¹ [Au3] ... Wirbelschichtvergaser haben Partikelgrößen von **1-40 µm**, aber Konzentrationen von bis zu **1'500 mg/m³** pro Partikelgruppe, d.h. total etwa **6'000 mg/m³**. Im Bereich **< 1µm** sind es etwa **150 mg/m³**.

² [B1] Vergasung und andere Kraft/Wärmetechniken

In herkömmlichen Typen verlassen alle bei der Erhitzung des Brenngutes entstehenden Stoffe, darunter Teer und Essigsäure, den Gasgenerator ohne vorherige Aufspaltung. Bis zu **20-40% der Energie** können in diesen Fällen **im Teer gebunden** sein. Erst nach **intensiver Reinigung** eignet sich das Gas zum Antrieb von Motoren, die Holzvergasung im **Gegenstromverfahren** stellt daher **hohe Anforderungen** an die Gasreinigungsanlage.

Betreiber / Organisation	Verfahren	%H ₂	%CO	%CO ₂	%N ₂	%CH ₄	%C ₂ +
Free University of Brussels	Fließbett	30-35	15-21	30-37	5-10	6-8,5	3-4
Free University of Brussel	Fließbett	9-11	15-17	18	--	5-7	3
University of Zaragoza, Spain	Fließbett mit sekundären Cracker	55	20-25	16-20	--	4-8	2-4
TNEE	Fließbett	22,7	43,0	15,7	--	17,0	1,4
National Taiwan University	Fließbett	18,0-64,8	47,4-8,9	17,5-26,0	0,0	11,0-0,2	0,0
TU-Wien	Fließbett mit Zirkulation (FICFB)	31,5	22,7	27,4	2,8	11,2	4,0
Department of chemical engineering, Stockholm	Druck-Blasen Fließbett	9,2	41,3	32,8	--	12,2	2,6
University of Zaragoza, Spain	Fließbett	30-55	25-40	15-20	--	5-10	1,8-2,2
University of Waterloo, Ontario, Kanada	Fließbett	--	7-8	8-10	--	42-50	--

Tab. 14: http://www.forstschule.at/up/holzgas_end.pdf

Betreiber / Organisation	Verfahren	SO ₃ [%w/w trockenes Gas]
University of Zaragota, Spain	Fließbett mit sekundärem Cracker	1,95
National Taiwan University	Fließbett	0,1-1,13
TU – Wien	Fließbett mit Zirkulation (FICFB)	1,5
Department of chemical engineering Stockholm	Fließbett	2,2
University of Zaragota, Spain	Fließbett	1,95

Tabelle6: Schwefelverbindungen im Holzgas in Massenprozent des trockenen Gases

Selbstverständlich sind wir auch der Frage nachgegangen, ob es im Vergasungsverhalten Unterschiede zwischen Laub- und nadelholz gibt. So weit uns bekannt ist, wurde diese Frage bisher nicht untersucht, sondern nur das Vergasungsverhalten von Pellets – verpresste Sägespäne aus Nadelholz- studiert.

Tab. 15: Schwefelverbindungen bei der Holzvergasung, http://www.forstschule.at/up/holzgas_end.pdf

In [H21] sind weitere Messwerte eines artefact-Vergaser in Glücksburg aufgeführt.

Verfahren	Teergehalt [g/Nm ³ trockenes Produkt]
Festbett-Gegenstromvergaser	10 – 100
Festbett-Gleichstromvergaser	0,1 – 1
Wirbelschichtvergaser (ohne Kat.)	1 - 100
Versuchsanlage (FICFB ohne Kat.)	1 – 5
Versuchsanlage (FICFB mit Kat.)	0,2 - 0,8

Tab. 16: http://www.umweltamt.hagen.de/eu-holz/pdf/tag3_Hisch_lange_Fassung.pdf

[H15] Holzgaszusammensetzung, experimentelle Daten verschiedener Versuchsanlagen mit verschiedenem Vergasungsmittel. Wird Sauerstoff als Vergasungsmittel eingesetzt, bleibt die Zusammensetzung des Gases ähnlich der Luftvergasung

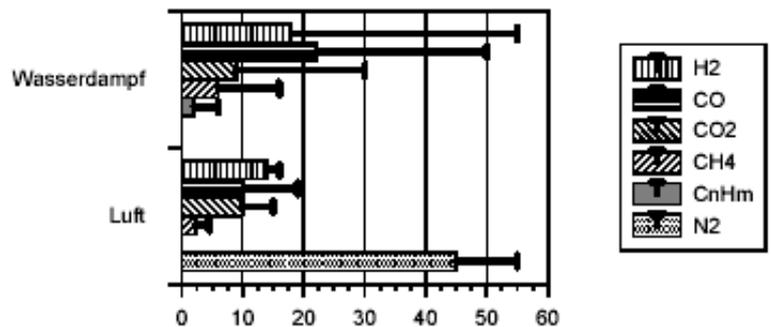


Abb. 9: Holzgaszusammensetzung für verschiedene Vergasungsmittel

Wasserdampfvergasung hat einen wesentlich **höheren Brennwert** als Holzgas aus Luftvergasung. Der Anteil an Kohlenwasserstoffen ist signifikant höher als bei Luftvergasung. Der Grund hierfür ist, dass in diesen indirekt beheizten Prozessen keine Spitzentemperaturen auftreten wie in autothermen Prozessen, in denen immer zumindest lokal in der Oxidationszone hohe Temperaturen auftreten, bei denen Kohlenwasserstoffe zersetzt werden, allerdings werden **über 800°C auch verstärkt PAK (Teer) gebildet**, die sehr stabil und schwer abzuscheiden sind. Auffällig ist die **große Bandbreite** der Angaben zur Zusammensetzung der Wasserdampf-Holzgase.

Waschwasser und Ausstoss: Bei Verwendung von naturbelassenem Holz zeigen Analysen von ausgestossenem Wasser folgende, normerfüllende Werte:

Wasserausstoss zwischen 5 und 25 l/h bei pH zwischen 8 und 9			
Kohlenwasserstoffe Total	<10 mg/l	Stickstoff (NTK)	<1.5 g/l
Cyanide	<0.5 mg/l	Eisen	<0.5 mg/l
Phenole	<5 mg/l	Zink	<2 mg/l
Sulfide	<1 mg/l	Blei	<0.5 mg/l

Tab. 17: Xylowatt [H8] Quecksilber im Wasser aus NOx-Wäsche: http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/mercury/posters/Hammack-Dilmore_2.pdf

1.4.5 Partikelfilter

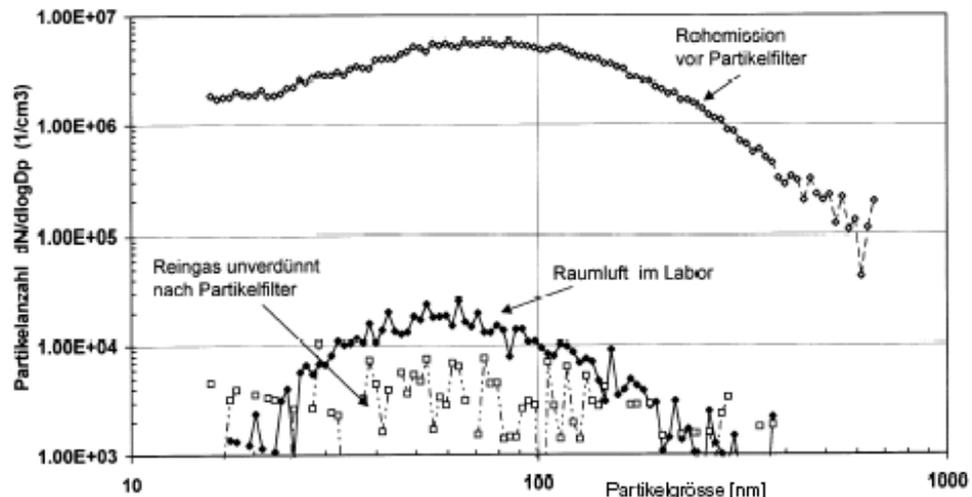


Abb. 10: Beispiel für die Wirkungsweise von Partikelfiltern: Partikelgrößenverteilung eines Liebherrmotors mit und ohne Partikelfilter bei Vollast. [Au6]

Prinzipiell werden folgende **Typen** von Filtern unterschieden:

- Oberflächenfilter
Abgelagerte Partikel erhöhen die innere Oberfläche und damit den Abscheidegrad ("Russ filtert Russ"), aber auch der Druckverlust steigt an.
- Tiefenfilter
Bestwerte werden nur bei kleiner Beladung erreicht (Druckgrenzniveau, Blow-off).
- Mischfilter (a+b gemischt, häufig)

Die **Wirkungsweise** von Partikelfiltern ist wie folgt [Vs2]:

- Abscheidung**
Aufgrund der minimalen Partikelgröße funktionieren die Filter nicht mehr durch Sperreffekte (Siebeffekte), sondern durch **Bindung der Partikel an den Oberflächen** (Waal'sche Kräfte).
- Trägheitsabscheidung** (Impaktion)
Abfangen aus einer Grenzpartikelbahn und Diffusion
- Rückhaltung** der abgeschiedenen Partikel (Unterbindung von Blow-off-Effekten).

Die zur Zeit bekannten **Filtermedien** sind in der folgenden Tabelle beschrieben.

Filtermedien	Beschreibung
Keramisch-monolithischer Zellenfilter ("wall flow"-Filter)	grosse Oberfläche (1-3 m ² /l) bei kleinem Bauraum, damit geringer Gegendruck und hohe Abscheiderate bei kleinen Gasgeschwindigkeiten durch die Wände (einige cm/s), besteht aus Cordierith, Siliciumcarbid, dank intensiver Weiterentwicklung thermoschockresistent
Metall-Sinterfilter	relativ schwer , aber sehr robust , gute Wärmeleitung, auch in Form von balgartigen Strukturen aus Filterplatten mit reduziertem Gewicht
Faser-Wickelfilter	Garne aus Hochtemperaturfasern (Mullit), rhombischer Kanalstrukturen auf ein perforiertes Trägerrohr
Faser-Flechtfilter	Hochtemperaturfasern als Geflechte über metallische Trägerstrukturen fixiert
Faser-Strickfilter	Keramische Garne durch Plissierung in Form von rundgestrickten Tiefenstrukturen, (200 m ² /l) mit katalytischer Beschichtung und elektrischer Innenbeheizung , Durchströmung bevorzugt von innen nach aussen, damit verzögerte Strömung und verbesserte Tiefenwirkung .
Filterpapiere/Filterfilze	Papierfilter, wie Ansaugluftfilter , nur wenn die Abgastemperaturen zuverlässig niedrig (ca. < 300°C), Faserfilter mit Kurzfasern in regelloser Form durch Binder fixiert sind, für höhere Temperaturen Filze aus keramischen Fasern
weitere Filtersysteme	Vliese aus keramischen oder metallischen Fasern, keramische und metallische Schaumstrukturen mit elektrostatischen Effekte (verbessern oder übernehmen die Filterwirkung)

Tab. 18: Aktuell bekannte Filtermedien

1.4.6 Gasqualitätsanforderungen bei Gasmotoren vs Turbinen

Designation	Dimens.	Gas Turbine	Gas Engine
Temperature	°C	150 - 200	40
Alkali-Metals (Na, K) and salts	mg/Nm ³	depends on turbine (e.g. <3)	~50
Halogens (HCl)	mg/Nm ³	depends on turbine (e.g. <2)	100
Compounds of sulphur (H ₂ S, COS, CS ₂)	mg/Nm ³	150	500
Ammonia (NH ₃)	mg/Nm ³	10 - 30	50
HCN	mg/Nm ³	1 - 2	
Dust (d _{max} = 10 µm)	mg/Nm ³	10	50

Tab. 19: Gasqualitätsanforderungen bei Gasmotoren vs Turbinen [Vs3]³

³ [Vs3] Für Anwendungen von thermisch erzeugten Gasen (z.B. Holzgas) ist klar ersichtlich, dass die **Gasturbinen** im Vergleich zu den Gasmotoren wesentlich **höhere Anforderungen** haben. Dieser Effekt ist durch sich an der Turbine

1.4.7 Zündstrahlmotor

Die Probleme durch eine "russende" Verbrennung des Zündstrahlmotors sind ähnlich wie beim Dieselmotor (siehe dazu <http://images.energieportal24.de/dateien/downloads/gasmotoren-analyse.pdf>)

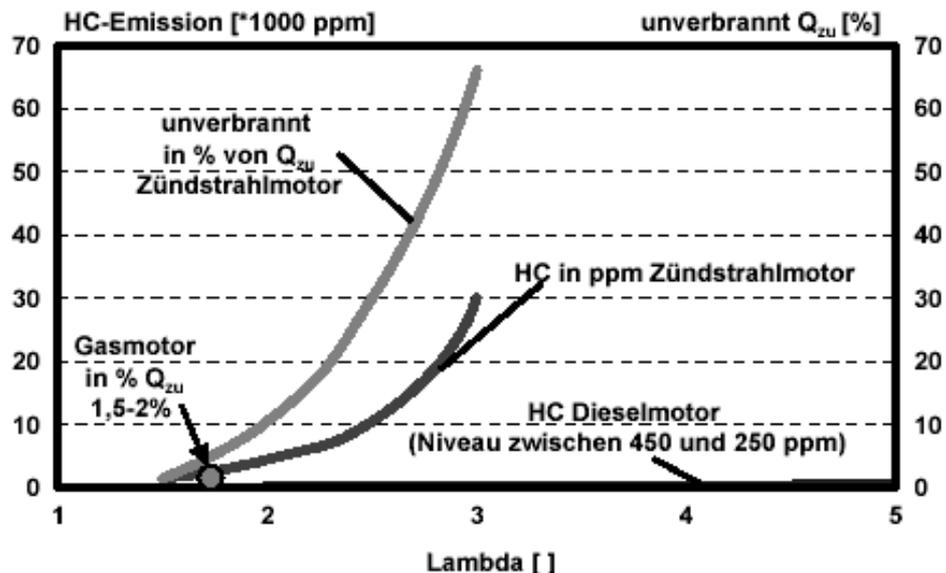


Abb. 11: Ausbrandverhalten bei dem Zündstrahlmotor [Vs3]

1.4.8 Emissionen von WKK Anlagen

	Holz WKK-Anlage, mit Multi-Zyklon	Holz WKK-Anlage, mit weitergehender Abgasreinigung	Altholz WKK, mit weitergehender Abgasreinigung
Holzverbrauch (Sm ³ /a)	15296	15296	15296
Elektrische Leistung (kW _{el} berechnet)	110	107	107
Thermische Leistung (kW _{th} berechnet)	4671	4671	4671
Elektrizitätsproduktion (MWh/a)	964	935	935
Wärmeproduktion (MWh/a)	11367	11367	11367
Gesamtwirkungsgrad berechnet	78.4%	78.2%	78.2%
Staub (mg/Nm ³)	121	10	10
NO _x (mg/Nm ³)	200	100	100
CO (mg/Nm ³)	100	100	100
Blei (mg/Nm ³)	0.049	0.049	2
Cadmium (mg/Nm ³)	0.0002	0.0002	0.069
Zink (mg/Nm ³)	0.5	0.5	2

Tab. 20: Wichtige Kenngrößen der drei Standardanlagen. Emissionen in die Luft bezogen auf 11% O₂ im Abgasstrom [Gs5]

aufbauende Schichten mit daraus folgenden **Unwuchten** begründet. Solche Erscheinungen führen dann in kurzer Zeit zu Totalzerstörungen der Turbine.

1.4.9 Nachbehandlung: SCRT-Verfahren

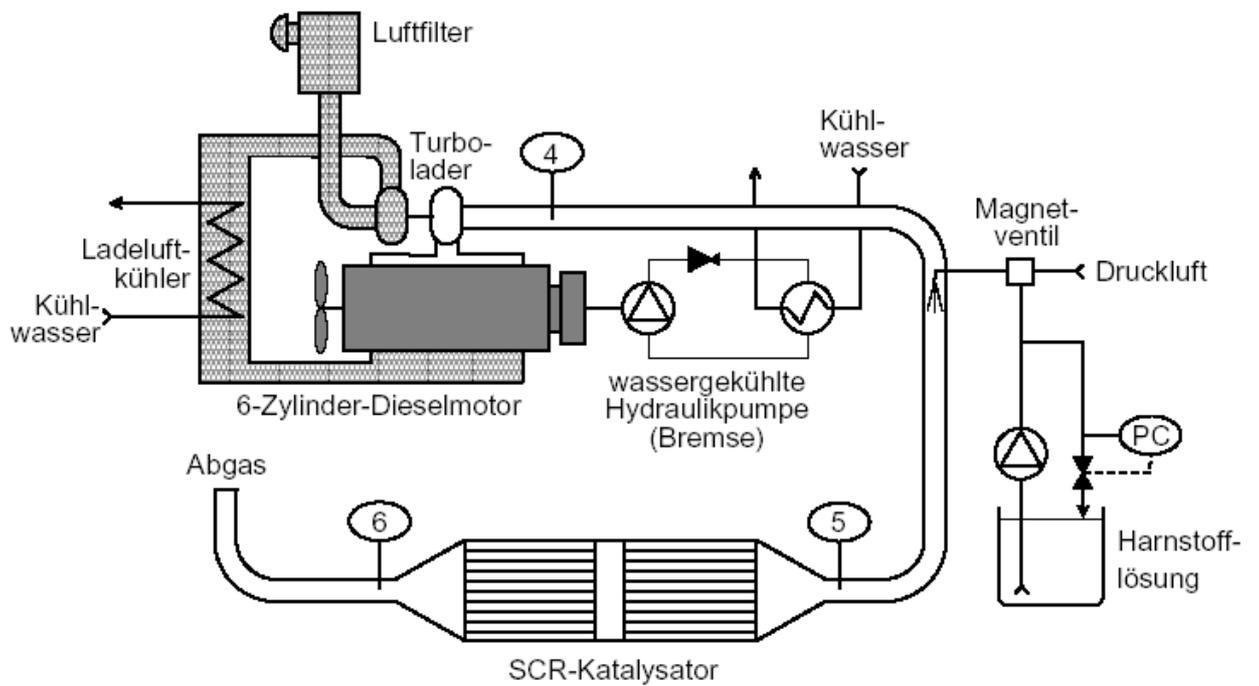


Abb. 12: Prüfstand "Beule" bei Leibherr Machines Bulle SA

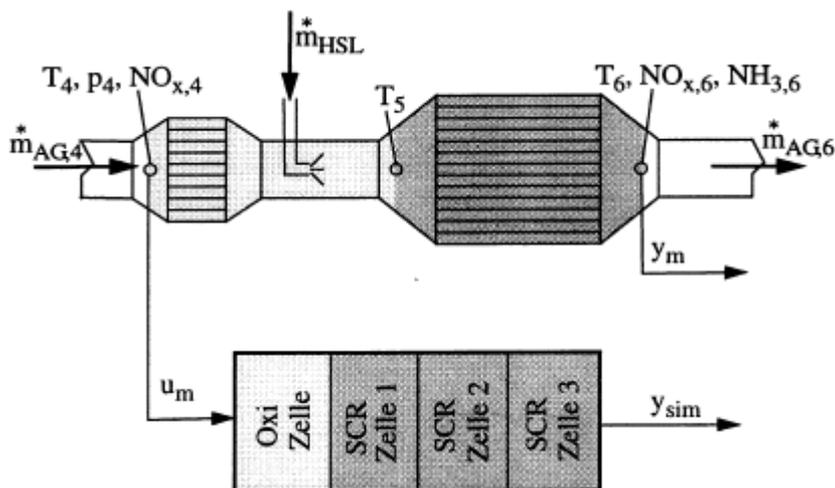


Abb. 13: SCR-Verfahren [En3]

1.5 Biogas (Vergärung)

1.5.1 Verfahrensablauf

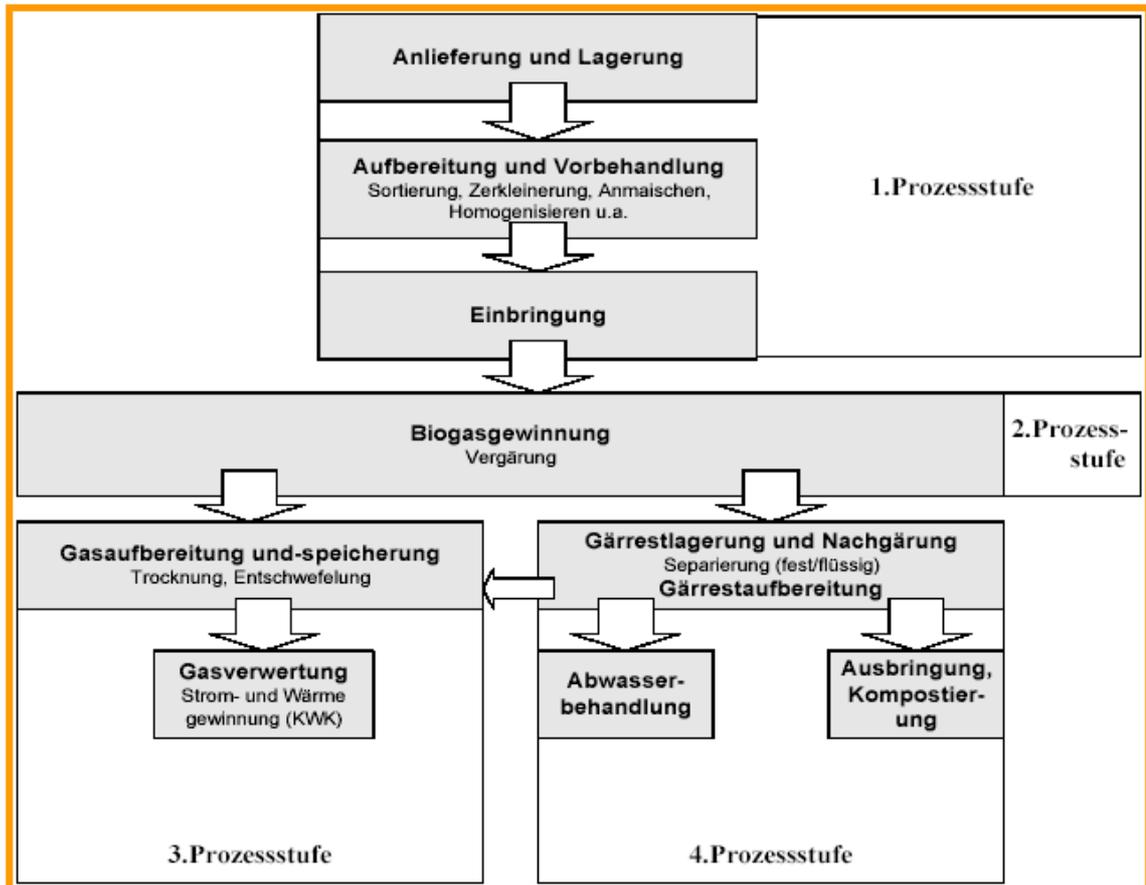


Abb. 14: Allgemeiner Verfahrensablauf bei der Verstromung von Biogas aus dem Vergärungsprozess [17]

1.5.2 Herstellung

1.5.2.1 Anlagen in Betrieb

Name	Adresse	PLZ	Ort	Kanton	Energie MWh/a	Seit
Grossenbacher				LU		99
Grass				GR		99
Wartmann				TG		99
Schmid Jakob	Paradiesweg 7	9403	Goldach	SG	+	98
Renfer H.P.	Gfellerhof	8051	Dübendorf	ZH	209.68	97
Sulser Kaspar	Bündt	9479	Oberschan	SG	263.30	96
Burgdorfer	Erzenholz	8500	Frauenfeld	TG	427.74	96
Neukomm		8240	Thayngen	SH	829.2	96
Harnisch	Unterdorf 10	5245	Habsburg	AG	151.5	94
Gebr. Wittwer		3618	Süderen	BE	840.0	94

Günthardt	Brüederhof	8108	Dällikon	ZH	584.0	93
Chabloz, P.	La maison blanche	1132	Lully	VD	104.8	92
Häfliger	Leidenberg	6022	Grosswangen	LU	240.0	91
Kaufmann, P	Haldenhof	4323	Wallbach	AG	146.3	89
Oettli	Käserei	8574	Illighausen	TG	160.0	89
Aarg. Arbeitskolonie	Muri-Moos	5630	Muri	AG	78.0	86
Deutsch H.J.		9315	Neukirch	TG	438.0	86
Schwab AG		9325	Roggwil	TG	179.4	85
Varone		1967	Bramois	VS	181.3	84
Götschi	Krümpel	3555	Trubschachen	BE	161.2	84
Kressibucher	Im Sulz	8506	Lanzenneunforn	TG	201.6	84
Sprenger	Anetswil	9545	Wängi	TG	0.0	84
Juchhof	Bernerstr. 301,	8010	Zürich	ZH	248.4	84
Chevalley	Le Tilleu	1501	Palezieux-Village	VD	33.6	83
Boschung	Schloss Watt	9402	Mörschwil	SG	365.4	82
Luder	Neuhof 12	3422	Kirchberg	BE	308.9	81
Kuratli	Amselweg	3053	Münchenbuchsee	BE	38.3	81
Siegenthaler	Steindlerstr. 1	8116	Würenlos	AG	120.0	80
Thomet	Riedbachstr. 350	3020	Riedbach	BE	120.0	80
Schnyder	Uttewil	3178	Bösingen	FR	140.2	80
Schnyder	Rohrigmoos	6173	Flühli	LU	128.7	80
Wyser	Moos	6017	Ruswil	LU	133.0	80
Graf AG	Lärchrnhof	9325	Roggwil	TG	106.0	80
Höpli		8585	Zuben	TG	49.7	80
Meier K.		5305	Unterendingen	AG	92.0	78
Karlen		1445	Vuiteboeuf	VD	624.0	77

Tab. 21: Landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Elektrizitätsgewinnung in einem Blockheizkraftwerk in der Schweiz (nach Inbetriebnahmedatum), Kurt Egger i.A. E2000/BFE, Stand 1999, [B18]

Schweiz

- 1995 standen 85 landwirtschaftliche Biogasanlagen in Betrieb, 35 davon mit Wärme-Kraft-Kopplung (feste Betriebsstoffe).
- 1997 standen in der CH total 18 Anlagen auf lebensmittelverarbeitenden Betrieben, sowie in der Papierindustrie im Einsatz (flüssige Betriebsstoffe). In zwei Fällen wird Strom produziert mit Wärme-Kraft-Kopplung, in allen anderen Betrieben wird Dampf erzeugt.

Deutschland (weltweit führend)

- 1999 sind ca. 580 Biogasanlagen in Betrieb [B2]

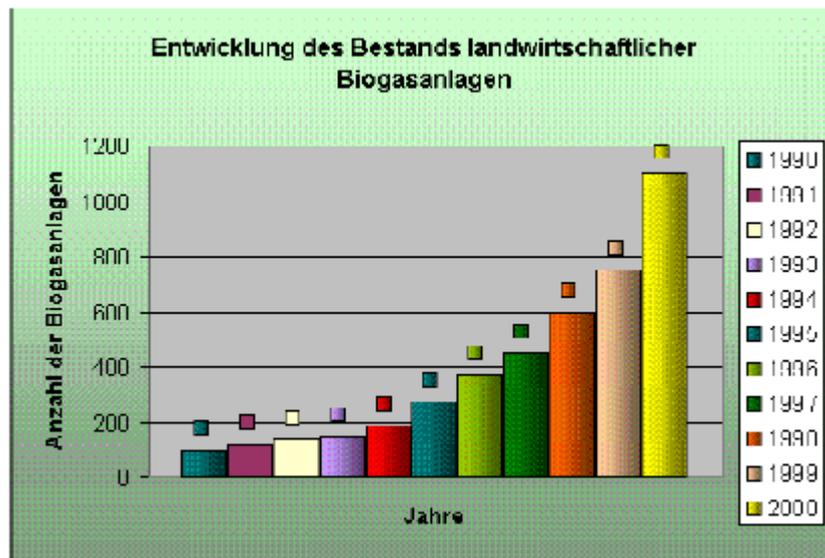


Abb. 15: Entwicklung der Zahl der Biogasanlagen in Deutschland [B32]

2003 sind über 1.500 Biogasanlagen in Betrieb. Etwa 65 davon sind Anlagen zur ausschliesslichen Vergärung von Bioabfällen aus Kommunen und organischen Reststoffen z. B. aus der Lebensmittelindustrie [B12, 17].

1.5.2.2 Firmen im Biogassektor [B18]

Company (Email contact)	Activities
2B AG, CH-8600 Dübendorf info@2bio.ch	Biorefinery:Biogas, protein and fibres from grass
AABio GmbH, CH-4450 Sissach engeli@biogas.ch	Waste water treatment, Codigestion
ALPHA Umwelttechnik, CH-2560 Nidau info@alphaut.ch	Waste water treatment, Solid waste digestion
aqua-System AG, CH-8400 Winterthur info@aquasystem.ch	Waste water treatment
Biotechnische Abfallverwertung GmbH(München, Germany) post@bta-technologie.de	Solid waste digestion, Waste water treatment
energie und umwelt, CH-8600 Frauenfeld energie-umwelt@econophone.ch	agricultural biogas plants, cogeneration, solar energy
KOMPOGAS AG, CH-8152 Glattbrugg info@kompogas.ch	Solid waste digestion
R.O.M. AG, CH-8502 Frauenfeld info.rom@zucker.ch	Solid waste digestion
Ecosolve GmbH, CH-4105 Biel-Benken ecosolve@datanetworks.ch	Solid waste digestion, codigestion, agricultural biogas
VA TECH WABAG contact@vatech.ch	Waste water treatment

Tab. 22: CH-Firmen, welche im Biogassektor tätig sind

1.5.2.3 Aufbereitung

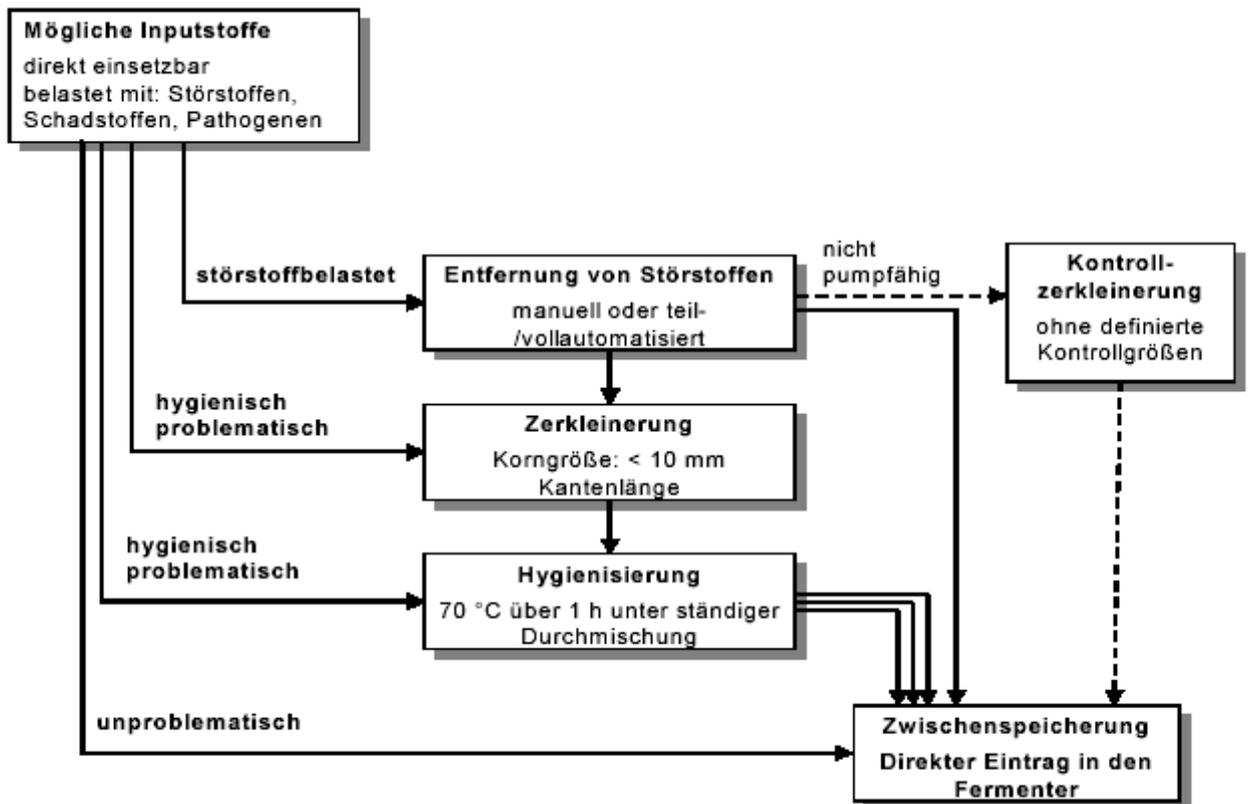


Abb. 16: Aufbereitung organischer Substrate [17]

Kofermente	Vorbehandlung
Ernterückstände	keine Hygienisierung
Lagerungsreste und Verarbeitungsabfälle nicht Tierischen Ursprungs	keine Sortierung
Abfallfette aus Fettschmelze	keine Sortierung
Abfälle aus der Pflanzenöl- Gewinnung	keine Sortierung
Grüngutabfälle	keine Hygienisierung
Handelsabfälle (Obst, etc.)	Sortierung erforderlich
Abfälle aus Schlachtung und Zerlegung	Hygienisierungspflicht
Flotatfette, Fettabscheiderin- halte	i.d.R. keine Sortierung
Kollagene und Abfälle aus Wurstereien	i.d.R. keine Sortierung
Magen- und Darminhalte	Hygienisierungspflicht
Speiseabfälle	Sortierung erforderlich
Biotonne	Hygienisierungspflicht
	Sortierung erforderlich

Abb. 17: Vorbehandlung der Kofermente [B32]

1.5.2.4 Prozessschritte

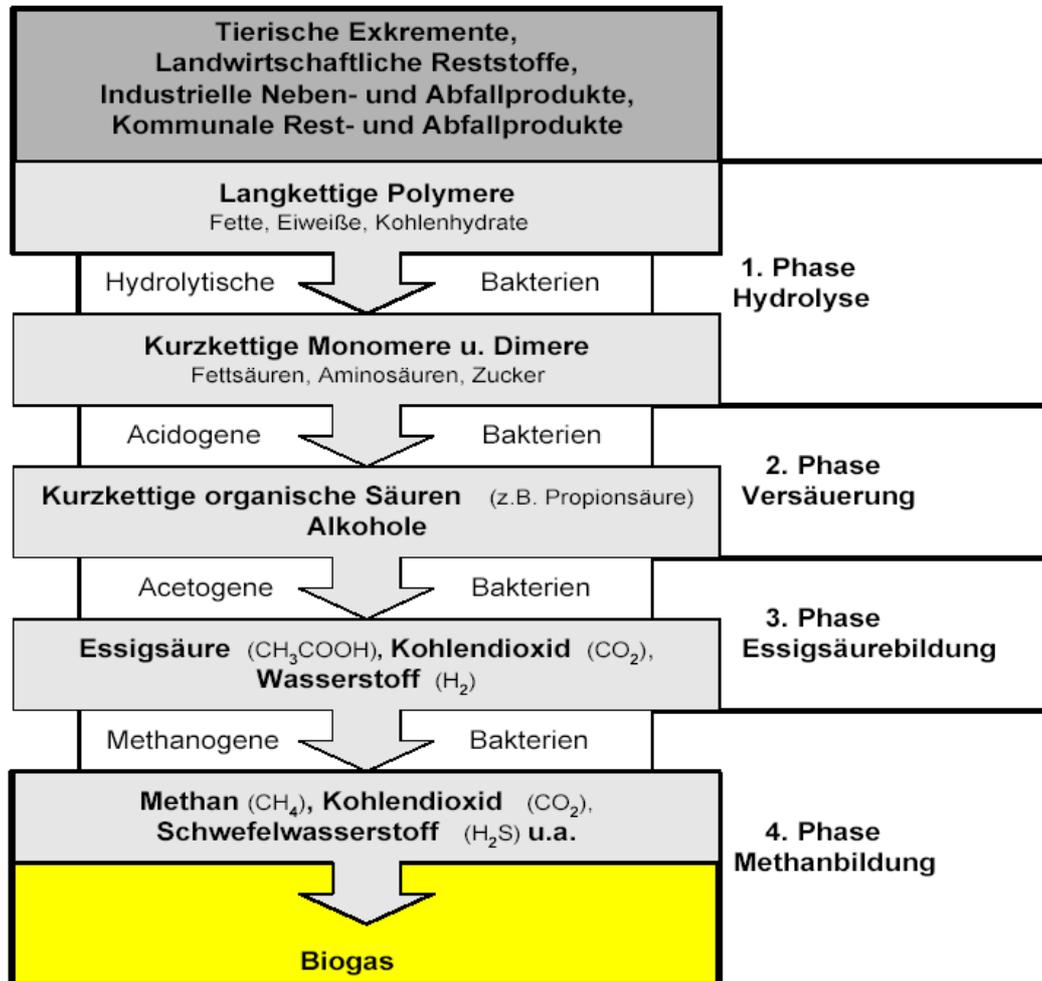


Abb. 18: Schematischer Ablauf der anaeroben Vergärung [17]

Bei einstufigen Verfahren laufen alle Phasen in einem Behälter ab.

Bei mehrstufigen Verfahren, läuft Phase 1-3 in einem oder zwei separaten Behälter und Phase 4 in einem separaten Behälter ab [B29].

1.5.2.5 Grundstoffe und Leistungsbereiche

Substrat	Biogasausbeute ($\text{m}^3/\text{kg oTS}$)
Treber aus Brauereien	0,42 - 0,5
Obst- und Weintrester aus Keltereien	0,45
Schlachthofabfälle	0,34 - 0,71
Abfälle aus der Fischverarbeitung	ca. 0,5
Grüngut (Landwirtschaft und Gartenbaubetriebe)	0,35 - 0,46
Produktionsabfälle aus Lebensmittel- und Futtermittelindustrie	0,32 - 0,8
unvergorener, frischer Schlamm aus kommunalen Kläranlagen	0,39 - 0,41
pflanzliche Extraktionsrückstände aus der Pharmaindustrie	0,2 - 0,75

biologisch abbaubare Verpackungskunststoffe (z.B. Polyhydroxy-Buttersäure PHB)	0,64
biologische Öle und Schmiermittel	>0,5
Biomüll aus dem Haushalt ca.	0,40 - 0,58
Abfälle aus der Papier und Kartonagenproduktion	0,2- 0,3
Fettabscheiderreste , Fettreste aus Großküchen	0,7 -1,3
Gülle und Festmist aus der Landwirtschaft	0,22 - 0, 55
Kartoffelschlempe aus Brennereien	ca. 0,48

Tab. 23: Geeignete Substrate für Bioreaktoren zur Biogaszeugung [B2]⁴.
Die hier angegebenen Werte sind nur als Durchschnittswerte zu sehen.

Die immer wieder gepriesene Vergärung von **Gülle** spielt auf Grund ihres geringen Energiewertes in der gesamten Biogaszeugung eine untergeordnete Rolle. Nur energiereiche Stoffe mit guter einfacher Logistik, umweltfreundlich produziert, haben zukünftig einen Platz in unserer alternativen Energieversorgung aus Biomasse [B30]. Um die Biogausbeute zu erhöhen, werden der Gülle verschiedene Substanzen zugegeben (Co-Fermentation). Die Gasausbeute dieser Inputmaterialien ist in der folgenden Abbildung gezeigt.

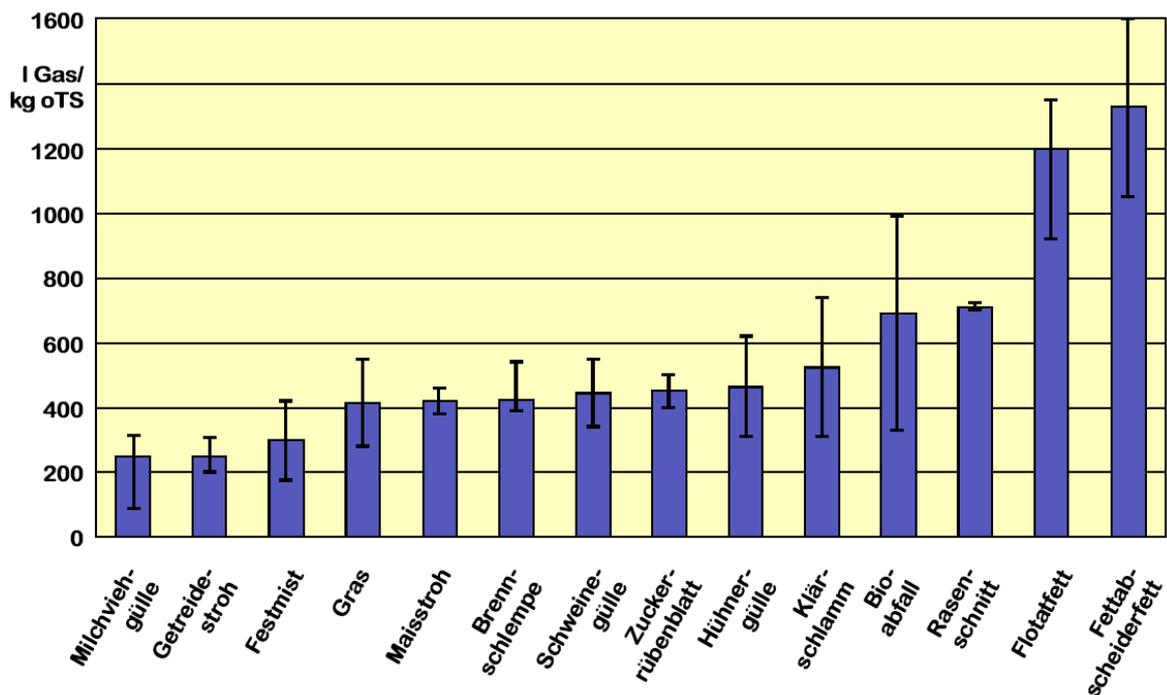


Abb. 19: Gasausbeute unterschiedlicher Inputmaterialien [B29]

⁴ [B2]: Die hier angegebenen Werte sind aus zahlreichen Quellen sowie eigenen Messreihen entnommen und nur als Durchschnittswerte zu sehen

Rindergülle	200 m ³ Methan/t oTS	20 m ³ Biogas/ m ³ Gülle
Schweinegülle	300 m ³ Methan/t oTS	30 m ³ Biogas/ m ³ Gülle
Hühnermist	250 m ³ Methan/t oTS	40 m ³ Biogas/ m ³ Mist
Klärschlamm	300 m ³ Methan/t oTS	5 m ³ Biogas/ m ³ Klärschlamm
Bioabfall	250 m ³ Methan/t oTS	100 m ³ Biogas/ t Bioabfall
Altfett	720 m ³ Methan/t oTS	550 m ³ Biogas/ t Altfett
Grasschnitt	480 m ³ Methan/t oTS	125 m ³ Biogas/ t Grasschnitt

Tab. 24: Basiswerte der Biogaspotenziale [B32]

1.5.2.6 Unterscheidung der Gärverfahren

Kriterium	System	Merkmale
<u>Trockensubstanzgehalt</u>	Nassvergärung	bis ca. 15 % TS-Gehalt
	Trockenvergärung	von 25-35 % TS-Gehalt
<u>Stufigkeit</u>	einstufig	alle Abbaustufen gleichzeitig nebeneinander
	zweistufig	Trennung von Hydrolyse und Methanbildung
	mehrstufig	Trennung von Hydrolyse, Säurebildung und Methanbildung
<u>Beschickung</u>	kontinuierlich	täglich gleiche Substratmengen werden aus- und eingetragen
	Batch-Betrieb	Komplettbefüllung und Komplettentleerung, Wechselbehälter erforderlich
<u>Fermenterform</u>	Gärkanal	langgestreckt, eckig, Beton
	liegender Tank	Stahlbehälter, z.B. gebrauchter Öltank
<u>Durchmischung</u>	vertikaler Rundbehälter	Silo aus Beton oder Stahl
	mechanisch	langsam laufendes zentrales Rührwerk
		schnell laufendes seitliches Rührwerk
		Paddelrührwerk (bei liegenden Fermentern)
	hydraulisch	externe Pumpe
	pneumatisch	Einblasung von Biogas
	hydraulisch	Nutzung des Gasdrucks zur Erzeugung von hydraulischem Gefälle
<u>Substrate</u>	Landwirtschaftliche Anlagen	Gülle, Mist, Gras, Mais, Agrarprodukte
	Co-Fermentationsanlagen	Gülle, Mist, Grünschnitt + gew. Abfallstoffe (z.B. Fett)
	Industrielle Anlagen	nur gew. Abfallstoffe (z.B. "Grüne Tonne")

Tab. 25: Biogasanlagensysteme und Verfahren [B32]

1.5.2.7 Kontinuierliche Trockenvergärungsverfahren

Die nachfolgenden Verfahren sind Pilotanlagen oder werden mit stapelbaren Bioabfällen aus der getrennten Sammlung betrieben. Die Substrate haben einem TS-Gehalt zwischen 25-45% [B22]

a. Gärkanal-Verfahren (Schlauch-Verfahren, Einstufig)

Feststoff in Gitterboxen wird durch den mit flüssigem Substrat gefüllten Fermenter (Gärkanal) gezogen. Substrat um- bzw. durchströmt diese Feststoff Boxen und wird am Ende herausgehoben und abgetropft.

b. DRANCO-Verfahren (Dry Anaerobic Composting, Belgien)

Der Fermenter ist ein stehender Zylinder. Das Substrat wird von oben mit Gärflüssigkeit vermischt. Eine externe Pumpe rezirkuliert die Gärflüssigkeit und vergorenes Material wird unten mit einem Schneckenförderer ausgetragen.

c. Kompogas-Verfahren

Der Bioabfall wird zuerst mit Schneckenscheibenmühlen zerkleinert. Bei der anschließenden Zwischenlagerung im Bunker setzt bereits eine Erwärmung ein. Die Biogas-Gewinnung geschieht im thermophilen Temperaturbereich. Das Substrat durchwandert den liegenden Fermenter, der ein horizontales Rührwerk besitzt, kontinuierlich in Form einer Kolbenströmung.

Auf www.compogas.com sind 27 Anlagen als Referenzen zu finden (davon 7 in Planung). Die Kapazität der Anlagen liegt zwischen 100 - 4'000 - 26'000 t/a.

d. Anacom-Verfahren (Anaerobic composting of manure, einstufig)

Das Substrat kommt von oben durch den beheizten Presskanal (Maulwurfprinzip) in den Fermenter und wandert nach unten. Die Perkulationsanlage zur Befeuchtung rezirkuliert einmal am Tag die Flüssigkeit mit einer Kreiselpumpe. Vergorenes Material wird mit einem Kratzboden und einer Austragsschnecke entnommen. Die Entnahme des Biogases geschieht in der Nähe des Deckels.

e. ATF-Verfahren (Anaerobe Trocken-Fermentation)

Ist der Ersatz für die Intensivrotte einer Kompostierung und funktioniert ähnlich wie die Anacom-Anlage. Substrat mit einem TS-Gehalt von 35-50% geht ohne Zugabe von Wasser von oben nach unten durch den Fermenter als kontinuierlicher Pfropfenstrom. Die Verweilzeit ist 15-25 Tage, danach erfolgt eine ein- bis zweimonatige Nachrotte.

f. 3-A-Verfahren (Aerob-Anaerob-Aerob, mehrstufig)

Das Substrat ist in Mietenform oder in einem Flachlager offen abgelegt (einfach und somit billiger, aber es entstehen Emissionen (Geruch, klimarelevant). Das Biogas wird mit Unterdruck angesaugt. Eine Vorerwärmung ist nötig (exotherm). Die Perkolatzufuhr dient auch der Impfmateriazufuhr. Die Verweilzeit beträgt 60-70 Tage, danach erfolgt eine aeroben Nachkompostierung (Nachrotte).

1.5.2.8 Nassvergärungsverfahren (Landwirtschaft)

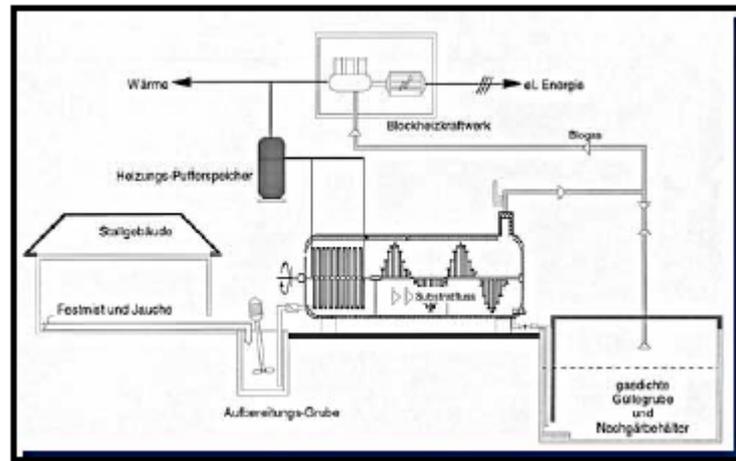


Abb. 20: Kontinuierliche Nassvergärung, Durchflussanlage [B32]

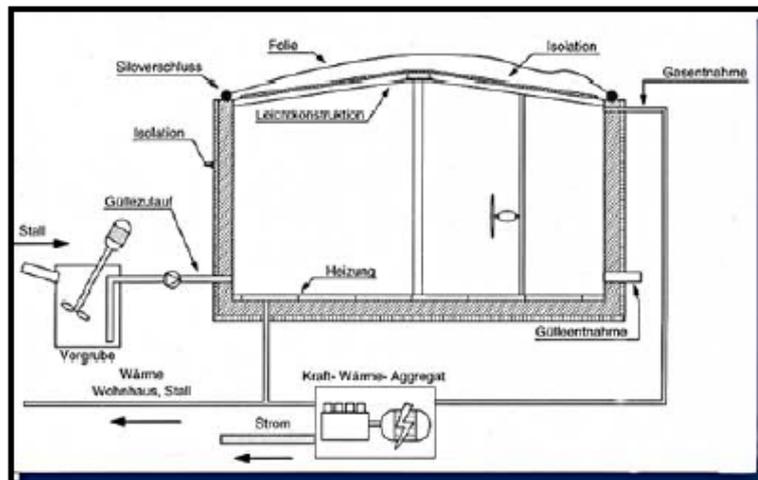


Abb. 21: Diskontinuierliche Nassvergärung, Speicheranlage [B32]

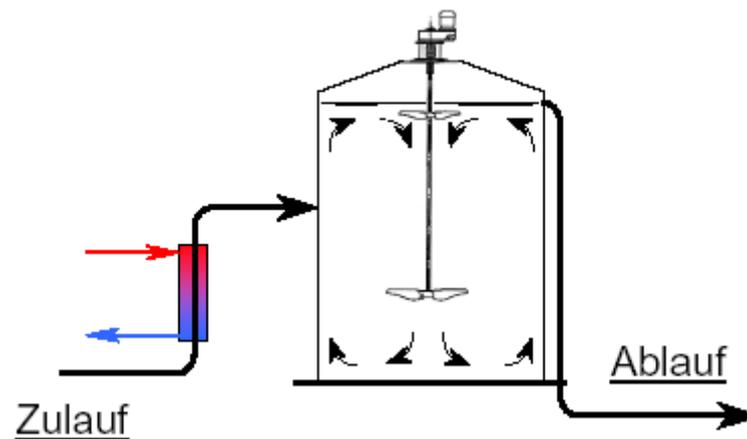


Abb. 22: Dänische Fermentertechnik [B23]

	dänische Technik	landwirtschaftliche Fermenter
Behälter	Stahl	Beton
Rührwerk Durchmischung	zentral auf dem Dach kontinuierlich	Tauchmotorrührwerk(e) nach Bedarf
Wärmeeintrag Inputtemperatur Substrat	externe Wärmetauscher 37/55°C	innenliegende Heizungsrohre Umgebungstemperatur
Biogasproduktion Abbaugrad Prozessstabilität		identisch identisch identisch
Verweilzeit (typisch)	20 Tage	40 Tage

Tab. 26: Vergleich der Fermentertechnik: Dänische Technik – Landwirtschaftliche Technik (Deutschland) [B23]

1.5.2.9 BIOREK-Verfahren

Das von der dänischen BIOSCAN A/S entwickelte BIOREK®-Verfahren vereinigt bewährte, traditionelle dänische Biogastechnologie mit Hochleistungs-Reaktortechnik. Das Ergebnis ist ein kompaktes und gleichzeitig sehr robustes Design.

Das Herz der BIOREK®-Anlage ist ein von der südafrikanischen Firma MEMBRATEK entwickelter ADUF®-Membranreaktor. ADUF® steht für "Anaerobic Digestion with Ultra- Filtration" (Anaerobes Faulverfahren mit Ultrafiltration) und besteht aus einem äusserst kompakten Biogasreaktor, der mit einem Ultrafilter gekoppelt ist.

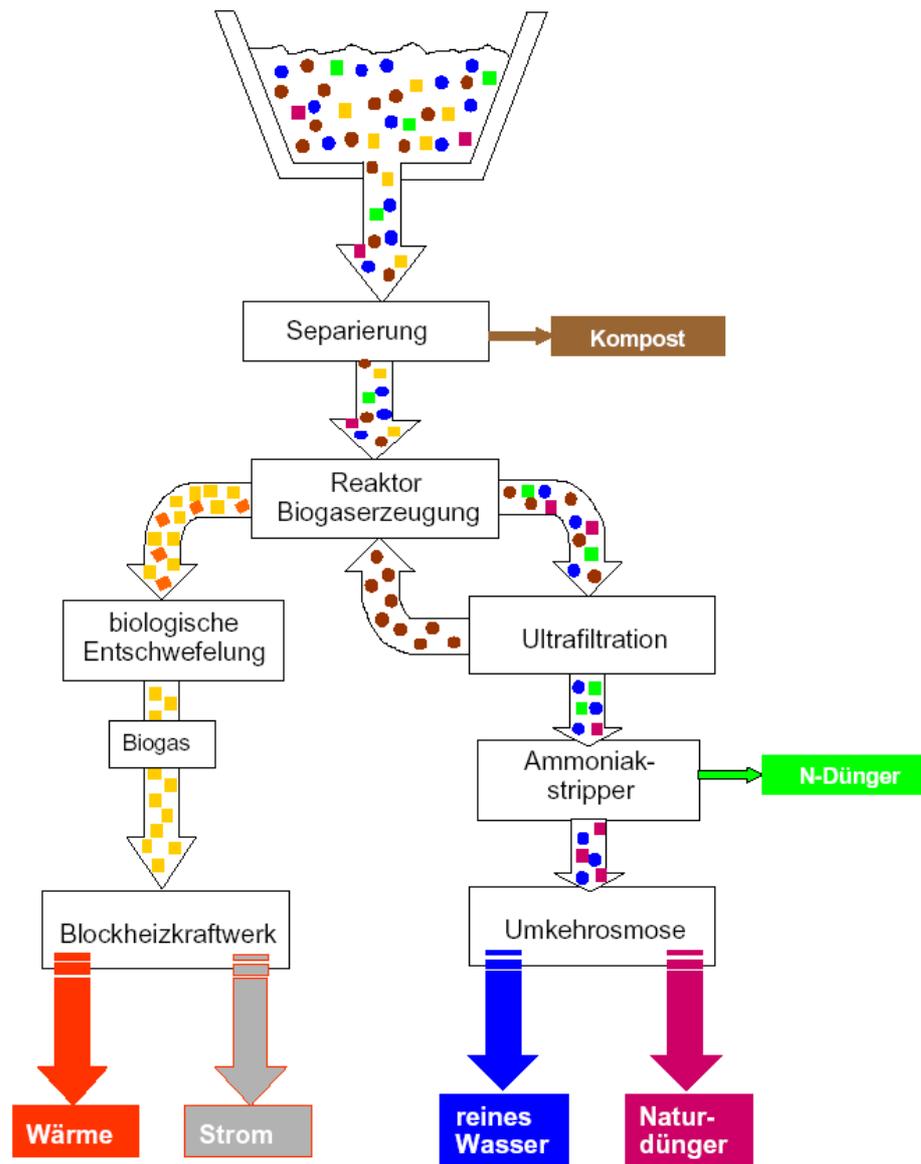


Abb. 23: BIOREK®-Verfahren: Anlagenschema [B33, B34] und http://www.bioscan.dk/BIOREK-from_waste_to_resource_Nov_2003.pdf

1.5.3 Zusammensetzung, Eigenschaften

	Werte für die Berechnung	Richtwerte	Richtwerte	Zum Vergleich. Erdgas H
Methan CH ₄	62,5 Vol %	60 – 70 Vol %	59.8 Vol %	89,2 - 95 Vol %
Kohlendioxid CO ₂	33,6 Vol %	30 - 40 Vol %	40 Vol %	0,6 -1,3 Vol %
Stickstoff N ₂	3,4 Vol %	< 4 Vol %	-	1,6 - 4,6 Vol %
Sauerstoff O ₂	-	< 1 Vol %	-	-
Schwefelwasserstoff H ₂ S	-	in Spuren	0.2 Vol %	0,05 Vol %
Chlor	-	in Spuren	-	-
Fluor	-	in Spuren	-	-
Dichte	1.164 kg/Nm ³	-	-	0.828 kg/Nm ³
Heizwert Hu	Hu = 6,4 kWh/Nm ³ (23 MJ/N m ³)	Hu = 6,4 kWh/Nm ³ (23 MJ/N m ³)	Hu = 6,46 kWh/N m ³ (23.24 MJ/N m ³)	Hu = 10,09 kWh/N m ³ (36.3 MJ/N m ³)
Quelle:	Merkblatt TISG 0137d ¹⁰⁾	Handbuch Energie in Kläranlagen ⁵⁾	Uni Osnabrück Studie Umberto ¹²⁾	Merkblatt TISG 0137d ¹⁰⁾

Tab. 27: Zusammensetzung Klärgas aus anaerober Stabilisierung [Vs1]

Chemische Hauptbestandteile und physikalische Kennziffern			Erdgas H ⁹⁾		Klärgas ⁵⁾ nicht aufbereitet		Klärgas ⁷⁾ aufbereitet
			1)	2)	3)	4)	4)
Methan	CH ₄	Vol.-%		89,2...95,0	62,5	65 ... 70	≥ 96,0
Ethan	C ₂ H ₆	↑ ↓ Vol.-%		2,0...4,6	-		
Propan	C ₃ H ₈			0,5...1,1	-		
Butan	C ₄ H ₁₀			0,2...0,3	-	... 10 mg/Nm ³	8)
Pentan	C ₅ H ₁₂			0,0...0,1	-		
Kohlendioxid	CO ₂			≤ 1,5	0,6...1,3	33,6	20 ... 35
Stickstoff	N ₂			1,6...4,6	3,4	Rest	Rest
Sauerstoff	O ₂			0	0,5	Rest	< 0,5
Wasserstoff	H ₂	Vol.-%		0			
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	mg/Nm ³	≤ 4,74	0...0,5	vorhanden	... 8'000	≤ 5,0
Mercaptan-Schwefel	S	↑ ↓ mg/Nm ³	≤ 15,3	7...8	0	0	0
Gesamtschwefel	S		≤ 142,2	8... 12			
Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoff	FCKW			0	0	0	0
Oelartige Bestandteile		mg/Nm ³	0	0	ev. vorhanden	ev. vorhanden	0
Oberer Heizwert ⁶⁾	H _{o,n}	kWh/m ³		10,86...11,59	6,9		
Dichteverhältnis ⁶⁾	d	-		0,56...0,64	0,9		
Wobbeindex ⁶⁾	W _{o,n}	kWh/m ³	13,14...14,53	13,79...14,71	7,3		
Methanzahl	MZ	-		(ca. 100)	(ca. 130)		
Feuchtigkeitsgehalt	φ	[%]		(trocken = 0)	voll gesättigt = 100	voll gesättigt = 100	(≤ 60)
Wasserdampf-Taupunkt	t _s	°C		(t _s < t _{mittel, Boden})	35	35	t _s < t _{mittel, Boden}
Gastemperatur	t	°C		(i.M. 12)	35 (... 60)	35 (... 60)	≤ 5
Überdruck ¹⁰⁾	p	mbar		(≥ 20)	20...40(...50)	20...50	≥ 20

Tab. 28: Vorhandene und gewünschte Gasqualität⁵ [B27]

⁵ Beispiele für Gasqualitäten gemäss:

- 1) Transitgas-Qualitätsanforderungen der SWISSGAS
- 2) eff. Transitgasqualität 1992, (gemäss GWA 3/93)
- 3) Interne SVGW-RL. G/TISG 203 über "Gasinstallationen in Abwasserreinigungsanlagen"
- 4) SVGW-Zirkular 91-11

Weitere Hinweise:

5) Klärgas-Gasqualitäten gemäss SUVA-MB 66'055/1993

- CH₄ = 59 ... 85 Vol.-%
- CO₂ = 14 ... 48 Vol.-%
- H₂S = 1 ... 6 Vol.-%
- d = 0,8 ... 1,2

Heizöläquivalent	0.60 bis 0.65 l Heizöl /m ³ Biogas
Zündtemperatur	650 - 750 °C
Explosionsgrenze	6 - 12 % Biogas in Luft

Tab. 29: Zusätzliche Eigenschaften von Biogas

Parameter	Einheit	Bioabfall		Speiseabfall	Panseninhalt
		Min.	Max.	Max.	Max.
	normiert auf 30 % oTS				
Cadmium	mg/kg	0,93	2,43	1,51	0,47
Chrom	mg/kg	33	106	10	7,3
Kupfer	mg/kg	72	169	53	33
Blei	mg/kg	21	149	10	2,8
Nickel	mg/kg	20	47	6,0	3,8
Zink	mg/kg	194	680	282	197
PCB	µg/kg	24	40	36	14
PCDD/F	ng I-TEQ/kg TS	1,1	5,9	1,5	1,2

Tab. 30: Konzentration ausgewählter Schadstoffe in den untersuchten Speiseabfällen und Panseninhalten im Vergleich zu typischen Bioabfällen [B21]

6) Grenzwerte für Erdgas H gemäss G1/1996:

- Ho,n = (10,5) 10,7 ... 13,1 kWh/m³

- d = 0,55 ... 0,70

- Wo,n = (13,0) 13,3 ... 15,7 kWh/m³

7) für die uneingeschränkte Einspeisung ins öffentliche Erdgas-Verteilnetz

8) keine Festlegung

9) Die DVGW-RL G260/1 gibt für die 2. Gasfamilie gegenüber den Gasleitsätzen z.T. erweiterte Grenzbereiche an.

10) Überdruck im Klärgas-Niederdruckgasspeicher (ohne vorgeschaltete Gasverdichtung)

Parameter	Einheit	Bioabfallvergärung Mai - Dez. 96	Co-Vergärung Jan - Okt. 97
Wassergehalt (WG)	% FS	68,9	68,9
Glühverlust (GV)	% TS	64,3	66,1
<i>Nährstoffe, gesamt</i>			
• Stickstoff (Kjeldahl-N)	% TS	2,76	2,76
• Phosphor (P ₂ O ₅)	% TS	1,23	1,34
• Kalium (K ₂ O)	% TS	1,35	1,43
• Magnesium (MgO)	% TS	1,14	1,14
• Calcium (CaO)	% TS	4,80	4,90
<i>Nährstoffe, löslich</i>			
• Stickstoff (NH ₄ -N)	mg/L FS	521	531
• Phosphor (P ₂ O ₅)	mg/L FS	1250	1145
• Kalium (K ₂ O)	mg/L FS	2270	2000
• Salzgehalt als KCl	mg/100 g FS	755	858
	g/L FS	5,4	5,7
pH-Wert		8,5	8,3
Rohdichte	g/L	765	665
<i>Schwermetalle</i>			
• Blei (Pb)	mg/kg TS	26,2	24,5
• Cadmium (Cd)	mg/kg TS	0,33	0,29
• Chrom (Cr)	mg/kg TS	22,4	21,4
• Kupfer (Cu)	mg/kg TS	49,2	52,5
• Nickel (Ni)	mg/kg TS	11,9	11,8
• Quecksilber (Hg)	mg/kg TS	0,17	0,17
• Zink (Zn)	mg/kg TS	179	179

Tab. 31: Zusammensetzung fester Gärprodukte [B21]

1.5.4 Entschwefelung mit Eisenoxidmasse

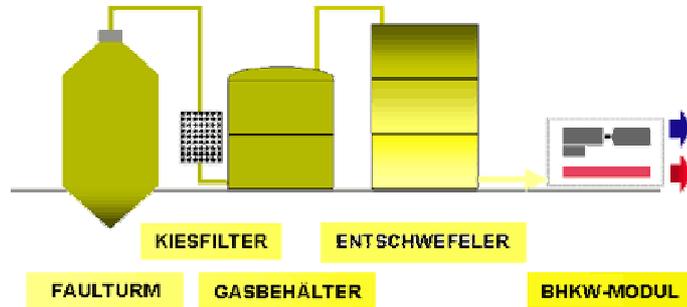


Abb. 24: Entschwefelungsanlage mit Eisenoxidmasse (www.koehler-ziegler.de)

Technische Daten - Entschwefler			Verbrauchszahlen		
Kapazität:	10 - 300 m ³ /h		Entschwefelungs- masse:	ca. 2,2 m ³ /anno	
Betriebsdaten einer Anlage			Prozessluft:	ca. 1,0 Nm ³ /h	
Klärgasanfall:	ca. 1.000 m ³ /Tag		Vollentschwefelung:	H ₂ S-Gehalt 2 g/m ³ - 10 mg/m ³	
Analyse:	CH ₄ :	ca. 65 Vol. %	Betriebskosten: (Ohne Kapitaldienst für Investitionskosten)	ca. DM 25,- pro 1.000 Nm ³ Klärgas	
	CO:	35 Vol. %			
	H ₂ S:	1 - 2 g/m ³			
Klärgas- Eintritt:	Druck:	ca. 50 mbar	Wartung		
	Temperatur:	ca. 25°C			
	Feuchte:	ca. 80% rel.F.			
Klärgas- Austritt:	Druck:	25 mbar	Normalbetrieb:	wartungsfrei	
	Temperatur:	25 - 35°C	H ₂ S-Analyse:	1 x monatlich, in ersten 8 Monaten, dann 1 x wöchentlich	
H ₂ S-Endreinheit:	0 - 20 mg/m ³ h		Massewechsel:	12 Monate oder länger, je nach Schwefelgehalt im Gas	
Innenaufbau:	1.4571				
			Abmessungen		
			Schutzgehäuse:	ca. 2 x	3 x 3 m
			Durchmesser:	ca.	1 - 3 m
			Turmhöhe:	ca.	2 - 3 m

Tab. 32: Daten einer Entschwefelungsanlage mit Eisenoxidmasse (www.koehler-ziegler.de)

1.6 TA-Luft und LRV für stationäre Gasmotoren

Siehe auch: <http://www.fischer-imz.de/neuheiten/pdf/ta-luft.pdf>, [17]

TA-Luft alt (bis Oktober 2002):		CO	650 mg/m ³	
		NO _x	500 mg/m ³	
TA-Luft neu (ab Oktober 2002):			Erdgas:	Klärgas/Biogas:
Magermotor	CO	300 mg/m ³		1'000 mg/m ³
	NO _x	500 mg/m ³		500 mg/m ³
Zündstrahlmotor	CO			1'000 mg/m ³
	NO _x			2'000 mg/m ³
andere Motoren	CO	300 mg/m ³		
	NO _x	250 mg/m ³		
Nicht-Methan-HC	HC	150 mg/m ³		
Schwefeldioxid	SO ₂			350 mg/m ³
Gesamtstaub				20 mg/m ³
Formaldehyd	SO ₂			60 mg/m ³

Die neue TA-Luft begünstigt den Magermotor und den ökologisch schlechten Zündstrahlmotor.

LRV:		Erdgas:	Klärgas/Biogas⁶:
	CO	650 mg/m ³	650 mg/m ³
	NO _x	250 mg/m ³	400 mg/m ³
	Staub		50 mg/m ³
	Partikel ⁷ (krebserreg.)		5 mg/m ³ (generell)
Zürich:	NO _x	50 mg/m ³	
Basel:	NO _x	70 mg/m ³	

Die LRV bewirkt somit, dass Magermotoren mit reduzierter Leistung (weniger heiss = weniger NO_x) verkauft werden.

Mit "**Swissmotor**" (Variante mit AGR) erreichbare Werte:

CO	~30 mg/m ³
NO _x	~10 mg/m ³

⁶Brennstoff **Definition** (Anhang Nr. 5, Ziff. 41.1.d):

Klärgas gilt im Sinne der LRV als Gasbrennstoff bzw. Gastreibstoff

Mischgasbetrieb

Sowohl bei Feuerungs-, als auch bei Gasmotoren- und Gasturbinenanlagen mit Mischgasbetrieb, sind die Emissionsanforderungen und die energetischen **Anforderungen** der LRV für den **reinen Erdgasbetrieb** zu erfüllen. Detailinformationen zu den einschlägigen Bestimmungen der LRV '97: Siehe Anhang Nr. 3

⁷Stationäre **Gasmotoren** und Gasturbinen (Anhang Nr. 2, Ziff. 82 + 83)

Für alle im Anhang 5 definierten Brenngase sind explizite, **undifferenzierte Emissionsgrenzwerte** für **staubförmige Partikel**, CO-, NO₂- und SO₂-Emissionen definiert. Eine Differenzierung nach Gasarten wird nicht gemacht.

2 Bezeichnungen und Abkürzungen

Siehe auch Lexikon Verbrennungsmotor, Partikel [Vs2] und
<http://www.bhkwi-infozentrum.de/service/glossar.html>

AGR	Abgasrückführung
ARTFUEL	"artificial fuels" = künstliche Hochleistungstreibstoffe aus Biomasse (für ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der CUTEC, Niedersachsen finanziert den Aufbau und Betrieb einer 1 Megawatt-Anlage im Rahmen eines zweijährigen Projekts mit insgesamt 1,24 Mio. EURO. [B13, B15])
Atro-Feuchte	Wassergehalt bei Holz: Wassergewicht / Gewicht des trockenen Holzes
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
Co-Vergärung	gemeinsame Vergärung von festen biogenen Abfällen (z.B. Speisereste und Rüstabfälle aus Grossküchen, gewerbliche Lebensmittelabfälle etc.) zusammen mit flüssigen Substraten wie Klärschlamm oder Gülle
CRT	Continuously Regenerating Technology (Abgasfiltertechnik, selbstreinigend)
CSF	Catalysed Sool Filter
DPF	Dieselpartikelfilter
FS	Fuchtsubstanz = Trockensubstanz + Wassergehalt (FS = TS + WG = oTS + MS +WG)
Fulleren	früher nur: Kohlenstoff Modifikationen: Diamant Graphit neu: Kohlenstoffmolekül C60 (nach Architekten Buckminster Fuller) Kohlenstoffagglomerat mit stark unterschiedliches Lösungsverhalten . Molekülform wie Fußball mit Ecken des Ikosaederstumpfes. Jedes Kohlenstoffatom drei Nachbarn, mit zweien ist es anderthalbfach verbunden (wie im Benzol mit seinen C-Nachbarn) und mit dem jeweils dritten einfach (wie in Alkanen). Der Ikosaederstumpf hat 60 Ecken, 90 Kanten (gleicher Länge) und 32 Flächen, von denen 20 Sechsecke und 12 Fünfecke sind. (www.ifw-dresden.de/iff/14/forschg/fulleren/wassindfullerene/index.htm , eddy.uni-duisburg.de/treitz/demo_cd/auto/krist/full/full_m.htm)
Gasertrag	Bei Biogasreaktoren: Innerhalb der jeweiligen Verweilzeit (max = 100% z.B. nach 15 Tagen) insgesamt aus dem Substrat gewonnene Gasmenge. (m ³ bzw. l / 1 kg zugeführter oTS)
GV-Schlüssel	Grossvieheinheitenschlüssel (http://www.smul.sachsen.de/BPSPlan/231.htm)
Lambda	Luftüberschusszahl, $\lambda < 1$ bedeutet fette, $\lambda = 1$ bedeutet stöchiometrische und $\lambda > 1$ bedeutet magere Verbrennung (Luftüberschuss)
LLK	Ladeluftkühler
Lungengängigkeit (LRV 98)	(siehe PM10) alle Partikel, die kleiner sind als 0.01 mm = 10 μ m [H5]
MS	mineralische Substanz (MS = TS – oTS)

Nanopartikel	Bezeichnet die Partikel im Grössenbereich, wie sie üblicherweise im Abgas von Verbrennungsmotoren gefunden werden (Beweglichkeitsdurchmesser 10 - 500 nm). Zuweilen werden diese Partikel auch als " ultrafeine Partikel " bezeichnet. Es besteht die Tendenz, die ultrafeinen Partikel nicht länger nach ihrem Gewicht zu bewerten, sondern nach ihrer Anzahlkonzentration in bestimmten, fein unterteilten Grössenklassen. Die Nanopartikel-Messtechnik ist Gegenstand einer jährlichen internationalen Konferenz an der ETH/Zürich: "ETH Nanoparticle Measurement", deren Proceedings öffentlich zugänglich sind.
oTS	organische Trockensubstanz = Trockensubstanz - mineralische Substanz (oTS = TS - MS)
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (Teer-/ Bitumenprodukte, Holzbehandlung)
Perkolat	mit Mikroorganismen angereichertes Wasser, Perkulationsanlage zur Befeuchtung, Berieselung und Impfung der Substratoberfläche bei der Vergärung
PM	Partikuläre Materie - Particulate Matter
PM10	alle Partikel, die kleiner sind als 0.01 mm = 10 µm [H5] (lungengängig)
Partikel aus der motorischen Verbrennung [13]	Partikel sind Schwebestoffe, die in der Regel im Verbrennungsprozess erzeugt werden und normalerweise mit dem Abgas in die Umgebung gelangen. Ein solches mit Partikeln belastetes Gas wird als Aerosol bezeichnet. Im Oberbegriff "Partikel" können feste und flüssige (kondensierte) Anteile enthalten sein. Für die Beurteilung der Lungengängigkeit werden Partikel in grobe Grössenklassen eingeteilt: Im Umwelt-Aerosol ist z.B. gemäss LRV 98 für die Schweiz PM10 definiert, d.h. alle Partikel, die kleiner sind als 10 µm (genauer: die einer Abscheide-Charakteristik mit 50% Abscheidung bei aerodynamischem Durchmesser 10 µm entsprechen.. damit werden kleinere Partikel, welche bis in die Lunge dringen und dort abgeschieden werden , stärker gewichtet). Weitere Definitionen von Grössenklassen, die zunehmend verwendet werden: PM2.5 / PM1/ PM0.1 . Wegen unterschiedlicher Wirkungen im Organismus sollten Partikel auch bezüglich ihrer Substanz und ihrer Phase (fest/flüssig) unterschieden werden. Dies wird durch die bisher vorgeschriebenen Messverfahren noch nicht berücksichtigt. Es sind jedoch Bemühungen im Gang, diese Methoden entsprechend zu ergänzen oder zu ersetzen, was sich auch auf die Auswahl und Bewertungs-Kriterien von Partikelfiltern auswirken wird.
RME	Biodieselherstellung aus Raps
Rottegrad	Kompostqualität: Rottegrad: Frisch- (II-III) und Fertigkomposte (IV-V)
SCR	Selective Catalytic Reduction – Verfahren zur Stickoxidverminderung
SCRT + Urea	SCR + CRT + Urea
Syngas	Synthese-Gas, Zusammensetzung: ca. die Hälfte ist CO, ca. 30% H ₂ , ca. 15+% CO ₂ ; der Methangehalt liegt meist unter 0.1%; das Gas ist praktisch teerfrei.
TAN	Total Acid Number (Kennwert für Motorenöl)
TBN	Total Base Number (Kennwert für Motorenöl)

Teer	Alle bei Zimmertemperatur kondensierbaren organischen Verbindungen aus Gasen von Pyrolyse- oder Verbrennungsprozessen
TL	Turbolader
TS	Trockensubstanz = Feuchtsubstanz – Wassergehalt ($TS = FS - WG = oTS + MS$)
Turn Down Ratio	The lowest load at which a system will operate efficiently as compared to the system 's maximum design load.
Urea	Harnstoff
WG	Wassergehalt [Gew.-%]
ZWS	Zirkulierende Wirbelschicht

3 Links und Literaturverzeichnis

3.1 Links

- Biomasse-Infozentrums (BIZ), <http://www.biomasse-info.net/index2.htm> [H10]
- Bundesverband BioEnergie e.V. (BBE), <http://www.bioenergie.de/home.htm>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), <http://www.fnr.de/>
- BHKW-Infozentrums Rastatt, www.bhkwi-infozentrum.de
- IEA Bioenergy, www.ieabioenergy.com
 - Task 32, Biomass combustion and co-firing, www.ieabioenergy-task32.com
 - Task 33, Thermal gasification of biomass, www0.gastechnology.org/pub/iea
 - Task 37, Energy from biomass and landfill gas www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37
- EU Biomass Gasification Network, www.gasnet.uk.net
- Gasifier installations/manufacturers: <http://www.gasifiers.org>, <http://www.woodgas.com>
- Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Österreich), www.fwf.ac.at
- ENERGIE AUS BIOMASSE, Biogas, Flüssigkraftstoffe, Festbrennstoffe, ZWÖLFTES SYMPOSIUM, Nov 2003, Kloster Banz, Staffelstein, OTTI ENERGIE-KOLLEG, Regensburg, <http://www.otti.de/fuchssteiner/buh1802.html>
- AEE Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, www.aee.at, www.aee.at/aee/index.htm

3.2 Allgemeine Literatur

- [1] Aus Energie wird Elektrizität (Energiebilanzen für Kraftwerke), Bundesamt für Wasserwirtschaft, Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern 1997
- [2] Stirlingmotoren zur dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse, E. Podesser, H. Dermouz, T. Wenzel, JOANNEUM RESEARCH, Institut für Energieforschung, Graz Seminar "Stirlingmaschinen", 1998, Gleisdorf (www.aee.at/verz/artikel/stirl01.html)
- [3] Comuna-Metall BHKW, www.comuna-metall.de
- [4] Bundesanstalt Landtechnik (BLT) Wieselburg, <http://www.blt.bmlf.gv.at>
- [5] Brennstoffbörse, <http://www.abex.at>
- [6] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, <http://www.lebensministerium.at/>
- [7] Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing und Entwicklungs-Netzwerk: <http://www.carmen-ev.de>
- [8] ETSF 4 Energy Technologies for a Sustainable Future, 4. conference: Fuels and Electricity from Biomass: Integration of Technical Systems into the Natural Carbon Cycle, December 5, 2003, PSI, <http://etsf.web.psi.ch/>
- [9] CO₂-Minderungspotenziale durch Ausbau der Blockheizkraftwerke in Deutschland, Markus Gailfuß, Armin Ardone, Peter Lang Verlag Frankfurt a. M., 1998, ISBN: 3-631-32390-5

- [10] Nanotechnology helps solve the world's energy problems, European Nanotechnology Gateway, Aug. 2003, www.Nanoforum.org, http://dbs.cordis.lu/cordis-cgi/srchidadb?ACTION=D&SESSION=293922003-11-5&DOC=1&TBL=EN_PROJ&RCN=EP_RCN:60145&CALLER=EISIMPLE_EN_PROJ
- [11] Biomasse: Überblick zum Forschungsprogramm 2002, Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele, Daniel Binggeli, Bruno Guggisberg, BFE, <http://www.energieschweiz.ch/imperia/md/content/forschung/jahresbericht2002/1.pdf>
- [12] Kraft-Wärme-Kopplung auf der Basis von Bioenergie, M. Pogoreutz, B. Reetz, Inst. F. Wärmetechnik, TU Graz, IWT KWK Bioenergie Okt. 2000, http://www.herzagenda21.de/_PDF/BHKW_1000.pdf
- [13] Mit Bioenergie ins 21. Jahrhundert, Dr.-Ing. Ingo Rickert Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V., +49, (030) 6576 2706, FEE-eV@t-online.de, Vortrag zum 4. Glücksburger Biomasse-Forum, März 2002, http://www.wie-energie.de/pdf/skript_rickert.pdf
- [14] Verbrennungsmotoren contra Brennstoffzellen, Zwei Technologien für die dezentrale Energieversorgung der Zukunft, NZZ, Ressort Forschung und Technik, 18. Dezember 2002, Nr. 294, http://www.syz.net/docs/auto_verbrennungsmotor.pdf
- [15] Liste der Rechtsvorschriften, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Deutschland, http://www.bmu.de/de/1024/js/sachthemen/gesetzestexte/rechtsvorschriften/?id=419&nav_id=4626&page=1
- [16] Technologie-Monitoring, Reto Rigassi, Walter Ott, Hanspeter Eicher, BFE Projekt Nr. 01.1.019, Okt 2003
- [17] BMU-Leitfaden, "Nutzung von Biomasse in Kommunen", Informationsteil, 2003, www.bmu.de/files/leitfaden_informationsteil.pdf
- [18] Studie zur Errichtung einer Pilotanlage zur Trockenvergärung oder Thermolyse landwirtschaftlicher, forstwirtschaftlicher und gewerblicher Biomasse zur Energiegewinnung als Beispielsobjekt für die Landkreise Barnim und Uckermark, Philipp Grundmann, Forschungsberichte des ATB, LEIBNIZ INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK BORNIM e. V. ATB, 2003, www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/Institut/Abteilungen/Abt2/Mitarbeiter/jhellebrand/jhellebrand/Publikat/Studie.pdf

3.3 Gesamtsysteme (Gs)

- [Gs1] Dezentrale Stromversorgung Optimierungschancen, Vertrieb: BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern · www.bbl.admin.ch/bundespublikationen, Bestellnummer 805.552.d, www.ecoplan.ch
- [Gs2] Bauen und Umwelt: Klimaschutzkonzepte für Kommunen – Das Beispiel Riedstadt, F. Staiß, <http://www.zit.tu-darmstadt.de/lehre/umweltwissenschaften/Energie/KWK/Kraft%20W%84rme%20Kopplung.pdf>
- [Gs3] Innovative Biomasse-Nutzung in Blockheizkraftwerken, Konferenz/Tagung 21./22. Oktober 2003 in Frankfurt-Eschborn, http://www.bhkw-konferenz.de/konferenz/konferenz_bhkw1003.pdf
- [Gs4] Biomassenvergaser - Technische Dokumentation, Andreas Dreisiebner, Hans-Peter Jander, enerec ag, www.enerec.ch, http://ds1.dreifels.ch/enerec/images/3_Tech_Doku_02.pdf)

- [Gs5] Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz, Niels Jungbluth, Rolf Frischknecht, Mireille Faist, 2002, ENET No. 210119

3.4 Gasherstellung (He)

- [He1] Bundesverband Bioenergie (BBE), <http://www.bioenergie.de>
[He2] RENET Austria, Träger: ARGE Kompetenznetzwerk Energie aus Biomasse, www.renet.at

3.4.1 Holzgas (H), respektive Gas aus dem Vergasungsprozess

- [H1] Marktübersicht dezentrale Holzvergasung, Marktanalyse 2000 für Holzvergasersysteme bis 5 MW, N., Steinbrecher, J., Walter Ökoinstitut (Institut für angewandte Ökologie e. V.), Darmstadt, April 2001 (www.oeko.de/service/bio/dateien/de/bio-marktuebersicht-2001.pdf, www.oeko.de/bereiche/energie/documents/holzverg.pdf, siehe [H14])
- [H2] Brennstoffeigenschaften und Anforderungen an Feuerungstechnik und Abgasreinigung für die Nutzung von Industrierest- und Altholz, Philipp Hasler und Thomas Nussbaumer, Ingenieurbüro Verenum, Zürich, Schweiz (www.fnr.de/veroff/nrband6/teil10.pdf)
- [H3] Luftreinhaltung und Explosionsschutz bei Holzfeuerungen und Stand der Technik in der Holzvergasung, Thomas Nussbaumer, 7. Holzenergie-Symposium, 2002, ETH Zürich, ENET, BFE
- a) Verfahren und Potenzial der Biomassen-Vergasung, Thomas Nussbaumer
 - b) Verfahren zur Staubabscheidung bei Biomassefeuerung ab 100 kW, Chr. Jirkowsky
 - c) Blockheizkraftwerk mit Festbettvergaser mit 55 kWe/120kWt in einer Sägerei: Praxiserfahrung und Wirtschaftlichkeit, Pasquale Giordano
- [H4] Luftreinhaltung, Haus-Systeme und Stromerzeugung, Thomas Nussbaumer, 6. Holzenergie-Symposium, 2000, ETH Zürich, ENET, BFE
- a) Einsatz von Holzgas in Verbrennungsmotoren, Michael Wagner
- [H5] Innovationen bei Holzfeuerungen und Wärmekraftkopplungen, Thomas Nussbaumer, 5. Holzenergie-Symposium, 1998, ETH Zürich, ENET, BFE
- a) Aerosole aus Biomassenfeuerungen: Grundlagen, Eigenschaften und Abscheidung, Philipp Hasler, Thomas Nussbaumer
- [H6] Holz als Energieträger, Dr. Ernst Kürsten www.holz.uni-goettingen.de/pdf-dateien/energiebach.pdf
- [H7] Gürtner GmbH, <http://www.stern-musik.de/start-guertner/bhkw-holzgas.htm>
- [H8] Technischer Beschrieb, XYLOWATT SA, <http://www.menag-group.ch/downloads/Technischer%20Beschrieb.pdf>
- [H9] Energiebilanzen nachwachsender Rohstoffe, Gegenüberstellung von Fichte, Pappel, Winterweizen und RME, M. Kraleman, U. Jakobs, Niedersächsische Energie-Agentur (<http://www.nds-energie-agentur.de/>), http://www.ben-online.de/download/359/Energiebilanzen_nachw_Rohstoffe.pdf
- [H10] Biomasse-Infozentrums (BIZ), <http://www.biomasse-info.net>
- [H11] Qualitätsbrennstoff Energieholz, Michael Kraleman, Dr. Gerd Höher, <http://www.ben-online.de/download/360/Artikel-Seminar-Ligna03.pdf>

- [H12] Five years experience with the FICFB -gasification process, 2001, H.Hofbauer, R.Rauch, S.Kaiser, <http://bioproducts-bioenergy.gov/pdfs/bcota/abstracts/9/z358.pdf>, <http://www.vt.tuwien.ac.at/>, <http://www.ficfb.at/>
- [H13] Economic and Risk Evaluation of the Brazil Biomass Integrated Gasification - Gas Turbine Demonstration Project, Draft Report, 1998, Electric Power Research Institute Palo Alto, California, Charles R. McGowin, Evan Hughes, Neville Holt, http://www.worldbank.org/html/fpd/em/biomass/intro_biomass.htm
- [H14] siehe [H1] Marktübersicht dezentrale Holzvergasung, Öko-Institut e.V., 2000, <http://www.gasnet.uk.net/files/277.pdf>
- [H15] Energetische Verwertung von Holz durch Vergasung, W. Wiest, W. Klose, 2002, <http://www.vt.uni-paderborn.de/aktuelles/Seminar%20Biomasse/PDF/Text%20Wiest.pdf>
- [H16] Vergasung fester Biomasse - Bereits Stand der Technik? Gülzower Fachgespräch »Energetische Nutzung von Biomasse durch Kraft-Wärme-Kopplung: Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum«, Gülzow, 16.-17. Mai 2000, Dipl.-Ing. Markus Ising Fraunhofer-Institut für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen, http://www.umsicht.fhg.de/WWW/UMSICHT/Produkte/ET/pdf/fnr-fachgespraech_mai2000.pdf
- [H17] Carbo-V-Verfahren, Vergasungsprozess, der Kohle, Biomasse oder vorbehandelte Siedlungsabfälle in absolut teerfreies Rohgas umwandelt, http://www.choren.de/html/unter_10.htm und TAF Thermische Apparate Freiberg GmbH (TAF), <http://www.taf-freiberg.de/>
- [H18] Wood gas as engine fuel, Mechanical Wood Products Branch, Forest Industries Division, FAO Forestry Department, M-38 ISBN 92-5-102436-7, FAO 1986, <http://www.fao.org/DOCREP/T0512E/T0512e00.htm>
- [H19] Ecoinvent 2000 Überarbeitung und Ergänzung der Ökoinventare für Energiesysteme; Technische Ergänzungen zum Jahresbericht 2001, ENET Publikation Nr. 210290
- [H20] International Energy Agency (IEA), Bioenergy Task 33: Thermal Gasification, Jahresbericht 2002, Ruedi Bühler, ENET Publikation Nr. 220314, www.gastechnology.org/pub/iea/
- [H21] Vergasung unbelasteter Reststoffe, Ergebnisse eines Messprogramms mit der Bundesstiftung Umwelt in Glücksburg, Dipl.-Ing. (FH) Rainer Behrends, www.wie-energie.de/pdf/vergasung.pdf
- [H22] Einsatz von Holzgas in Verbrennungsmotoren, Michael Wagner, Jenbacher AG, 2002
- [H23] Secondary reactions of tar during thermochemical biomass conversion by Philipp Oliver Morf, Diss., Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 14341, 2001, <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=14341>
- [H24] Mechanismen und Bedeutung der Teerbildung und Teerbeseitigung bei der thermochemischen Umwandlung fester Kohlenstoffträger, Dr. rer. nat. Christoph Unger, Dr.-Ing. Markus Ising, Fraunhofer-Institut für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, D-Oberhausen, http://www.umsicht.fhg.de/WWW/UMSICHT/Produkte/ET/pdf/uebersichtsbeitrag_teere_unger_ising.pdf
- [H25] Gas cleaning for staged gasifiers, GasNET meeting October 2. 2002, Claus Hindsgaul, Benny Gøbel, Biomass Gasification Group, Energy Section of Dept. Mechanical Engineering, Technical University of Denmark (DTU), bgg.mek.dtu.dk
- [H26] Teerbildung und -konversion bei Holzvergasung, Philipp Oliver Morf, Ph. Hasler, Th. Nussbaumer, Institut für Energietechnik ETH Z, Verenum Zürich, 2002

- [H27] Studie zum Stand der Technik der Biomassevergasung, M. Kaltschmitt, A. Vogel, Institut für Energetik und Umwelt, Gemeinnützige GmbH Uni Leipzig, Auftraggeber Bundesinnenministerium, voraussichtliche April 04 verfügbar
- [H28] Hochwertige Biomassenutzung durch Flugstrom-Druckvergasung von Pyrolyseprodukten, E. Henrich, E. Dinjus; Forschungszentrum Karlsruhe, ITC-CPV, D. Meier; BFH-Institut für Holzchemie Hamburg-Bergedorf, 13. Internationales Sonnenforum, Berlin 12. - 14. September 2002, www.bfafh.de/bfh-pers/pdf/pub_meier_1_02.pdf

3.4.2 Biogas (B), respektive Gas aus dem Vergärungsprozess

- [B1] 10. Vergasung und andere Kraft/Wärmetechniken, Centre for Biomass Technology (www.videncenter.dk/uk/index.htm)
- [B2] Erzeugung von regenerativer Energie aus organischen Industrieabfallstoffen in Biogasanlagen, Dr. Kurt Frunzke bioteg GmbH, Kulmbach, Vortrag anlässlich der "Oberfränkischen Energietage" 1999 Kulmbach, http://www.bioteg.de/txt/txt_vortrag_jan99.php, http://www.bioteg.de/txt/txt_vortrag_mrz01.php
- [B3] Biogas – Brennstoffzellensysteme, Symposium über Stand der Entwicklung und Perspektiven, bmvit, 2001, Steyr (www.eva.wsr.ac.at/publ/pdf/fuelcell_steyr.pdf)
- [B4] Biogas - Die regenerative Energie der Zukunft ?, Irina Lucke, Hochschule Vechta, Fachbereich Umweltwissenschaften, Institut für Strukturforschung und Planung in agrarischen, Intensivgebieten, 2002 (www.carmen-ev.de/deutsch/info/DiplomarbeitBiogas.pdf)
- [B5] Pflanzenöl-Initiative Markteinführungsprogramm, www.pflanzenoelinitiative.de
- [B6] FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, fnr.zadi.de/de/index.htm
- [B7] Das unterschätzte Potenzial der Biomasse und deren Rolle im künftigen Energiemix von Dr. Hermann Scheer, www.eurosolar.org/new/de/downloads/Memorandum_LaWi.pdf
- [B8] Energetische Nutzung von Biomasse durch Kraft-Wärme-Kopplung Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, www.fnr.de/veroff/gfg14_kwk.pdf
- [B9] Biomasse-Infozentrum, <http://www.biomasse-info.net>
- [B10] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, <http://www.dainet.de/fnr/>
- [B11] Biogas - eine natürliche Energiequelle, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Referat 519), Juni 2002, http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/pdf_13biogas.pdf
- [B12] Grundlagen zu Biogasanlagen, Krieg & Fischer Ingenieure GmbH, 2001, http://www.kriegfischer.de/basics_inhalt_d.html#3
- [B13] Bioenergienetzwerk, Festbrennstoffe Infostelle Bioenergie Niedersachsen – BEN, <http://www.ben-online.de>
- [B14] Biogas, "Untersuchung und Optimierung der Co – Fermentation in zweistufigen Biogasanlagen" und "Entwicklung des Geschäftsfeldes Optimierung von Biogasanlagen", Fakultät für Ressourcenmanagement der Fachhochschule Göttingen, <http://www.fh-goettingen.de/>, www.fu.fh-goettingen.de/fgtus
- [B15] Biogene Treibstoffe, CUTEC in Clausthal-Zellerfeld, www.cutec.de
- [B16] ARCHEA GmbH, <http://www.archea.de/>

- [B17] Gasification of Wet Biomass and Organic Wastes in Hot Compressed Water, Pilot Plant VERENA, FZK Karlsruhe Technische Chemie,, <http://hikwww1.fzk.de/itc-cpv/inhalt/processd/superprocess/biomass/ebiomass.htm>
- [B18] Biogas Forum, www.biogas.ch
- [B19] Ecologic,energetic and economic comparison of treating biogenic wastes by digesting, composting or incineratin, Werner Edelmann, arbi, Baar, 1999, <http://www.arbi.ch/ecobalan.htm>
- [B20] CO-DIGESTION OF ORGANIC SOLID WASTES AND WASTE AND WASTE WATERS, Werner Edelmann, Hans Engeli, Marco Gradenecker, Baar, <http://www.biogas.ch/f+e/covede.htm>
- [B21] Co-Vergärung von Bioabfällen und organischen Gewerbeabfällen, Ergebnisse eines grosstechnischen Pilotvorhaben, K. Hoppenheidt, P. Hirsch, et al., Bayrisches Institut für Abfallforschung, VDI-Seminar " Biogene Abfälle/Holz/Klärschlamm - Verwertung/Behandlung/Beseitigung - " 2000, Bamberg, <http://www.bifa.de/download/coverg2.pdf>
- [B22] Übersicht über die Verfahren der Trockenvergärung, Michael Köttner, Achim Kaiser, IBBK Internationales Biogas & Bioenergie Kompetenzzentrum, Nov. 2001, <http://www.graskraft.de/seminar4/feststoff.html>
- [B23] Warum bauen wir eigentlich so schlechte Biogasanlagen ?, FISCHER, T. und A. KRIEG; 2002, Biogas - die universelle Energie von morgen, 11. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V., 29-31. Januar 2002, Borken bei Kassel, <http://www.kriegfischer.de/texte/warum%20bauen%20wir%20eigentlich%20so.pdf>
- [B24] Wie rechnet sich Biogas?, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökonomie, Mai 2002, http://www.stmlf.bayern.de/lba/sg_23/biogas/BG_Wirtschaftlichkeit.pdf
- [B25] Kompakt-Biogasanlagen 1,2,3 und 4; Zusammenfassung und Betriebsauswertung der Anlagen: J. Schmid, R. Grossenbacher, F. Grass und G. Martin, 18. Programm Biomasse (ohne Holz), Thomas Böhni, BFE Schlussbericht, 2001, ENET Publikation Nr: 210229, www.energieundumwelt.ch
- [B26] Vergleich von Energieumwandlungsverfahren für Gülle (ENKON), J.-L. Hersener, U. Meier, BFE Schlussbericht, 2002, ENET Publikation Nr: 220205
- [B27] Einspeisung von Klärgas ins öffentliche Erdgas-Verteilnetz, Merkblatt TISG 013/d, Technisches Inspektorat des Schweiz. Gasfaches, www.svgw.ch/deutsch/filesPR/MB_TISG_013.pdf
- [B28] Stand der Technik bei Biogasanlagen, Johann Mitterleitner, Bayrische Landesanstalt für Landtechnik, Mai 2000, www.regierung.niederbayern.bayern.de/wirfuersie/biogas/Mitterleitner01.pdf
- [B29] Einsatz von Abfällen zur Cofermentation, Silvia Schattner, Bayrische Landesanstalt für Landtechnik, 2000, <http://www.regierung.niederbayern.bayern.de/wirfuersie/biogas/SilviaSchattner.pdf>
- [B30] Biogastechnik: Planen – Bauen – Service, www.tewe.com
- [B31] Biogasanlagen in der Landwirtschaft, Vom Landwirt zum Energiewirt, Wolfgang Schoepe, Arbeitskreis Energie, Agenda 21, 3003, http://www.herzo-agenda21.de/_PDF/Biogas.pdf
- [B32] Biogas - Die regenerative Energie der Zukunft ?, Irina Lucke, Hochschule Vechta, April 2002, www.carmen-ev.de/dt/hintergrund/biogas/DiplomarbeitBiogas.pdf

- [B33] Stand der Technik von Membranverfahren, Einsatzmöglichkeiten bei der Vergärung von Abwässern, Hans Engeli, Werner Edelmann, Projekt 23770 Vertrag 63369, Bundesamtes für Energie, Schlussbericht 2001, [www.energieforschung.ch/ENET/Publication/ENETProj.nsf/06131CDC159D0F31C1256B19003A5330/\\$FILE/210133.pdf](http://www.energieforschung.ch/ENET/Publication/ENETProj.nsf/06131CDC159D0F31C1256B19003A5330/$FILE/210133.pdf)
- [B34] Biogasanlagen – Anforderungen zur Luftreinhaltung, Fachtagung Augsburg, 2002, Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, ISBN 3-936385-13-0, www.bayern.de/lfu/bestell/biogasanlagen.pdf
- [B35] THE BIOREK® CONCEPT, CONCEPT FOR THE CONVERSION OF ORGANIC EFFLUENT TO ENERGY, CONCENTRATED FERTILISER AND POTABLE WATER, B. Norddahl and L. Rohold, Bioscan Engineering A/S, May 2000, http://www.bioscan.dk/The_BIOREK_Concept_May_2000.pdf

3.5 Gasaufbereitung (Au)

- [Au1] Geprüfte Partikelfilter-Systeme für Dieselmotoren "Filterliste", A. Mayer, SUVAPro, BUWAL, 1999 und VERT-FILTERLISTE Geprüfte und erprobte Partikelfilter-Systeme für die Nachrüstung von Dieselmotoren, BUWAL, A. Mayer Technik Thermische Maschinen TTM, Juni 2003, http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/luft/fachgebiet/d/industrie/filterliste_01_06_03_d.pdf
- [Au2] Nanopartikel Measurement, 4. Internationale ETH-Conference on, A. Mayer, Festkörperphysik, ETH Zürich, BUWAL, 2000
- [Au3] Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse, BFE, 18. Programm Biomasse, Schlussbericht, Philipp Hasler, Thomas Nussbaumer, 1997
- [Au4] Biofilter, Biofilteranlagen, Abluftreinigung von der bioteg GmbH, Kulmbach, <http://www.bioteg.de/>
- [Au5] Köhler & Ziegler GmbH Anlagentechnik, Gasreinigungseinrichtung, <http://www.koehler-ziegler.de/>
- [Au6] Technische Grundlagen zur Nachrüstung grosser Fahrzeugflotten, BUWAL, A. Mayer Technik Thermische Maschinen TTM, 2000, <http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/luft/fachgebiet/d/226.2.pdf>
- [Au7] Stand der Technik bei der Rauchgasreinigung, Christian Jirkowsky, Heft: Wasser Boden Luft Umwelttechnik 10/03, www.scheuch.com
- [Au8] Erzeugung eines teerfreien Brenngases durch katalytische Nachbehandlung bei der Vergasung von Durchforstungs- und Waldrestholz, Prof. Dr. Frank Behrendt, Dr. Karen Tönnies TU Berlin, Prof. Dr. Wladimir Reschetilowski, TU Dresden, 2002, http://www.ezur.tu-berlin.de/RDH_deu/Akt_projekte/Holzteer.pdf
- [Au9] Das Aus für Siloxane, Harald Köhler, 1999, Beitrag-Nr.: 1015707 Etikett: 62-99-009-08-500, www.koehler-ziegler.de/de/programm/zugehoerige_links/pdf/siloxanentfernung.pdf

3.6 Verstromung (Vs)

- [Vs1] Ökobilanz Klärgasverstromung, Projekt 41863 Verfügung 83688, Claudio Ronchetti, Peter, Bienz, Roland Pridal, BFE, November 2002
- [Vs2] Lexikon Verbrennungsmotor, Partikel, Vorschlag TTM, 3.3.2000 (www.akpf.org/pub/lexicon10-3-2000.pdf)

- [Vs3] Standesanalyse des Gasmotors im Vergleich zu den Zukunftstechniken (Brennstoffzellen und Mikroturbine) bei der Nutzung von aus Biomasse gewonnenen Kraftstoffen, Jenbacher AG, Dr. G.R. Herdin (www.herzo-agenda21.de/_PDF/AnalyseGasmotorMitBiomasse.pdf, <http://images.energieportal24.de/dateien/downloads/gasmotoren-analyse.pdf>)
- [Vs4] Schmierung von Gasmotoren, Mobil, Industrial Experts, www.mobiloil.de/business/industrial/pdf/industrie_report_gas.pdf
- [Vs5] Blockheizkraftwerke, Mehr Leistung, weniger Emissionen, energie.ch, Themen, Ohmar Humm, Oerlikon Journalisten, <http://www.energie.ch/themen/haustechnik/blockheizkraftwerke/>

3.7 Emissionsnachbehandlung (En)

- [En1] Mehr Leistung, weniger Emissionen, Othmar Humm (www.energie.ch/themen/haustechnik/blockheizkraftwerke/#Schlechter%20als%20Gasturbine)
- [En2] Weiterentwicklung des SCR-Verfahrens dank neuer Steuer- und Regelstrategie, Heft: Wasser Boden Luft Umwelttechnik 10/03, www.enwa.ch
- [En3] NOx-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR, Manfred Koebel, Martin Elsener, Christoph Schär, Schlussbericht Dezember 2002, ENET Publikation Nr. 220335
- [En4] Möglichkeiten der Minderung von Schadstoffen bei Bussen, Referat 33 - Luftqualität, Lärm, Verkehr, Sabina Drechsler (Dipl.-Ing. FH), Dr. Werner Scholz, Dr. Dieter Ahrens, Karlsruhe, im November 2000, http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/luft/verkehr/berichte_und_links/Bericht-Busse-Teil1.pdf