

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

Worblentalstrasse 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. 240005

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	6
2	Ziel und Vorgehen	7
3	Analyseumfang.....	7
3.1	Anwendung	7
3.2	Gasarten, Umwandlungstechnologien	7
3.3	Gesamtheitlicher Ansatz - Prozessorientierung.....	8
3.4	Untersuchungsgrenzen	9
3.5	Terminologie	10
4	Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergasung (Holzgas).....	11
4.1	Zusammenfassung der Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergasung	11
4.2	Gasherstellung	12
4.2.1	Zusammenfassung der Aussagen über die Gasherstellung mit Vergasung	12
4.2.2	Prozessschritte bei der Gasherstellung mittels Vergasung.....	13
4.2.3	Prozess-Parameter	14
4.2.3.1	Eigenschaften des Brennstoffes	14
4.2.3.2	Eigenschaften des Vergasungsprozesses	16
4.2.4	Klassifizierung und Beurteilung der Vergasungsverfahren	17
4.2.4.1	Drehtrommel, Drehrohr (100kW – 5MW)	17
4.2.4.2	Festbett (für <100 kW, einfachste Bauweise)	18
4.2.4.2.1	<i>Querstrom (60 kW - 1'000 kW).....</i>	<i>18</i>
4.2.4.2.2	<i>Gegenstrom (500 kW-10'000 kW)</i>	<i>18</i>
4.2.4.2.3	<i>Gleichstrom (50 kW-500 kW).....</i>	<i>18</i>
4.2.4.2.4	<i>Zweistrom, Zweizonen (50 kW-2'500 kW).....</i>	<i>19</i>
4.2.4.2.5	<i>Mehrstufige Vergaser.....</i>	<i>19</i>
4.2.4.2.6	<i>Kombinierte Gegenstrom-Gleichstrom-Holzvergaser des IUTA</i>	<i>19</i>
4.2.4.3	Fliessbett – Wirbelschicht (>5 MW)	19
4.2.4.4	Flugstrom / Wanderbett.....	20
4.2.5	Gaszusammensetzung und Qualität	21
4.2.6	Nebenprodukte (zu entsorgen).....	22
4.2.7	Auswahl des Verfahrens.....	22
4.2.8	Bottlenecks und Entwicklungspotenziale bei der Vergasung	23
4.2.9	Handlungsbedarf	24
4.3	Gasaufbereitung	25
4.3.1	Realisierte Verfahren für die Gasaufbereitung.....	25
4.3.2	Teerbehandlung	26
4.3.2.1	Teerentstehung verhindern.....	26

4.3.2.2	Teerauflösung (Teerspaltung).....	27
4.3.2.3	Teerentfernung und Abscheidung	29
4.3.2.4	Handlungsbedarf.....	30
4.3.3	Partikelbehandlung	30
4.3.3.1	Partikelabbau mittels Katalysator	31
4.3.3.2	Partikelabscheidung mittels Filter	31
4.3.3.3	Zusammenfassung.....	33
4.3.3.4	Handlungsbedarf.....	33
4.3.4	Temperaturminderung (Kühlung)	34
4.3.5	Behandlung übriger Schadstoffe	34
4.4	Verstromung und Emissionsnachbehandlung.....	36
4.4.1	Motorsysteme mit Dieselmotortechnik.....	36
4.4.2	Motorsysteme mit Ottomotortechnik.....	38
4.4.3	Grenzwerte und problematische Holzgaseigenschaften	39
4.4.4	Entwicklungspotenziale (Verstromung, Emissionsnachbehandlung).....	41
4.4.5	Handlungsbedarf	42
4.5	Gesamtsysteme	43
4.5.1	Prozessvarianten	43
4.5.2	Handlungsbedarf Gesamtsystem - Vergasung.....	44
4.6	Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und die Teilsysteme	45
5	Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergärung (Klär-, Biogas).....	47
5.1	Zusammenfassung der Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergärung.....	47
5.2	Gasherstellung	48
5.2.1	Aufbereitung und Vorbehandlung.....	48
5.2.2	Prozessschritte bei der Gasherstellung mittels Vergärung.....	49
5.2.3	Prozess-Parameter	49
5.2.3.1	Eigenschaften der Betriebsstoffe.....	49
5.2.3.2	Eigenschaften des Vergasungsprozesses	49
5.2.4	Klassifizierung und Beurteilung der Vergärungsverfahren	51
5.2.4.1	Trockenvergärung	53
5.2.4.1.1	<i>Kontinuierliche Trockenvergärung</i>	<i>53</i>
5.2.4.1.2	<i>Diskontinuierliche Trockenvergärung.....</i>	<i>53</i>
5.2.4.2	Nassvergärung	54
5.2.4.2.1	<i>Kontinuierliche Nassvergärung</i>	<i>55</i>
5.2.4.2.2	<i>Diskontinuierliche Nassvergärung</i>	<i>55</i>
5.2.4.3	Stand der Technik	56
5.2.4.4	Neuere Entwicklungen.....	57
5.2.5	Gaszusammensetzung und Qualität	57
5.2.6	Nebenprodukte (zu entsorgen).....	58
5.2.7	Bottlenecks und Potenziale.....	58

5.2.8 Handlungsbedarf	59
5.3 Gasaufbereitung	60
5.3.1 Entschwefelung	60
5.3.2 Si- und Schadstoffentfernung.....	61
5.3.3 Schaum- und Partikelentfernung	62
5.3.4 Trocknung	62
5.3.5 Schwankender Biogasanfall, respektive Methangehalt	62
5.3.6 Bottlenecks und Potenziale.....	63
5.3.7 Handlungsbedarf	63
5.4 Verstromung und Emissionsnachbehandlung.....	64
5.4.1 Bottlenecks und Potenziale.....	65
5.4.2 Handlungsbedarf	65
5.5 Gesamtsysteme	65
5.5.1 Prozessvarianten	65
5.5.2 Handlungsbedarf Gesamtsystem - Vergärung	68
5.6 Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und die Teilsysteme	69

1 Executive Summary

Die Verstromung von biogenen Gasen aus Vergasungsprozessen (vorab Holzgas) und Vergärungsprozessen (Bio-, Klärgas) mit Gasmotoren (50-300 kWe) scheint eine vielversprechende Technologie zur Minderung des CO₂ Ausstosses zu sein. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit steht die Verbesserung des Gesamtsystems und abgestimmt der Teilsysteme (Gasherstellung, Aufbereitung, Verstromung und Nachbereitung) im Vordergrund.

Durch das Abklären verschiedener technischer Massnahmen wurden die Potenziale für die folgenden Verbesserungen aufgezeigt:

- Erhöhung des Gesamtwirkungsgrad
- Verbesserung der Robustheit
- Senkung der Emissionen

Die Hauptverbesserungspotenziale bei der Verstromung von biogenen Gasen aus Vergasungs- und Vergärungsprozessen sind in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 1) dargestellt.

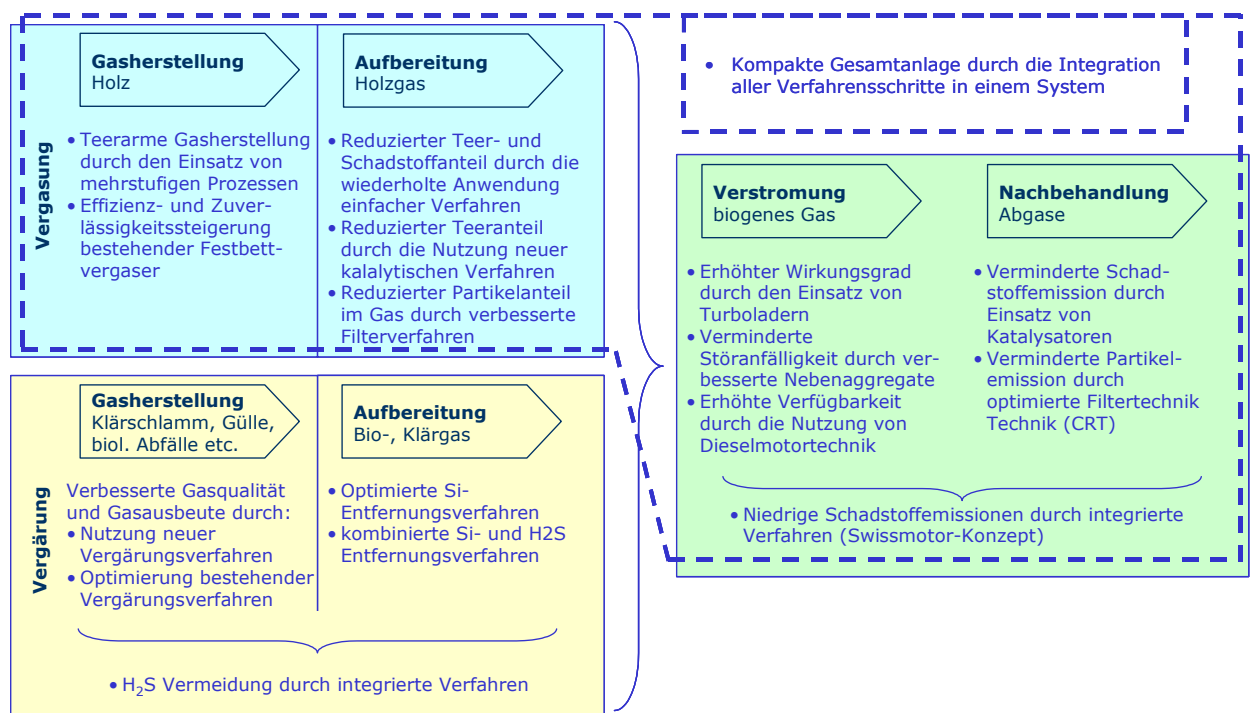


Abb. 1: Hauptverbesserungspotenziale bei der Verstromung von biogenen Gasen aus Vergasungs- und Vergärungsprozessen

Die Priorisierung der identifizierten Potenziale wird in einem Workshop mit den Kompetenzträgern festgelegt. Daraus leitet sich das weitere Vorgehen für das BFE ab.

2 Ziel und Vorgehen

Die Verstromung von biogenen Gasen, vorab Holz-, Bio- und Klärgas, mit dem Gasmotor scheint eine vielversprechende¹ und entwicklungsfähige Technologie zu sein. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit steht die Verbesserung der Teilsysteme und/oder des Gesamtsystems im Vordergrund.

Das Ziel ist die Abklärung der jeweiligen Potenziale, um daraus den zukünftigen Handlungsbedarf zu bestimmen.

Dieser Bericht ist nach dem folgenden Vorgehen je für die Vergasung (Holz) und für die Vergärung (Bio-, Klärgas) gegliedert:

- Analyse der Teilsysteme (Herstellung, Aufbereitung, Verstromung und Nachbereitung) mit Auflistung der Potenziale und Bottlenecks, sowie Ableitung des jeweiligen Handlungsbedarfs mit Fokus auf das entsprechende Teilsystem
- Analoge Analyse des Gesamtsystems und Ableitung des entsprechenden Handlungsbedarfs
- Vergleich des Handlungsbedarfs mit Fokus auf das Gesamtsystem und mit dem Handlungsbedarf mit Fokus auf die Teilsysteme.

3 Analyseumfang

3.1 Anwendung

Die Verstromung von biogenen Gasen ist eine wirtschaftlich kritische Angelegenheit. Es ist daher nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch wichtig den Energieinhalt des produzierten Gases optimal (Strom und Wärme) auszunutzen. **BHKW's** sind dafür besonders gut geeignet. Sie sind daher die häufigste System Anwendung² und die meisten Informationen sind in diesem Umfeld zu finden. Das BHKW-Infozentrum gibt eine Übersicht über die Hersteller und Anbieter von BHKW-Aggregaten (siehe Anhang: "BHKW", www.bhkw-infozentrum.de).

3.2 Gasarten, Umwandlungstechnologien

Folgende biogene Stoffe stehen gemäss BFE [11]³ in der CH im Vordergrund: Holz⁴, Klärschlamm, biogene Industrieabfälle, biogene Siedlungsabfälle, landwirtschaftliche Abfälle und Pflanzen aus landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen. Von den Umwandlungstechnologien wird die **Vergasung** und **Vergärung** abgeklärt. Die Vergasung wird vor allem für Holz und die Vergärung für Klärschlamm und die übrigen Stoffe angewendet. Der betrachtete Leistungsbereich liegt zwischen **50** und **300 kWe**.

¹ Holzvergasung und Solarchemie

sind zwei Verfahren, die in Zukunft die CO₂-neutrale, und damit umweltschonende Produktion von Wasserstoff möglich machen sollen (gabe.web.psi.ch/pdfs/Energiespiegel_Nr.5_November_2001.pdf).

² Deutschland: Im ersten Halbjahr 2003 sind nur rund 30 statt wie im Vergleichszeitraum des Vorjahres 75 Biogasanlagen ans Netz gegangen [B13].

³ In der CH wurden im Jahr 2001 873'000 TJ Energie verbraucht. 16.9% davon stammen aus erneuerbaren Energieträgern. Davon sind 23.3%, respektive 3.9% = 34'000 TJ aus Biomasse. Ziel des BFE in den nächsten Jahren ist eine Verdoppelung. Von der Energie aus Biomasse werden ca. 7% (=2'400TJ = 830 100kW Anlagen) verstromt [11].

⁴ Unter den festen Bioenergieträgern ist Holz aufgrund seines niedrigen Schwefel-, Stickstoff- und Chlorgehalts und seines hohen Ascheschmelzpunkts technisch und ökologisch der beste Brennstoff. Die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen wie Stroh, Getreide und Holz aus Kurzumtriebsplantagen ist noch nicht etabliert [H1].

Die nachfolgende Tabelle (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) zeigt für die verschiedenen biogenen⁵ Stoffe, respektive die resultierenden Gase, das erwartete Marktpotenzial⁶ und die abzuklärenden Prozesssteile.

	Gas	Holz	Klär	Bio	Gruben	Deponie	Bio-Ethanol
Marktpotenzial		Gross	Mittel	Nische	kl. Nische	kl. Nische	kl. Nische
Umwandlungstechnologie		Vergasung	Vergärung (anaerob)				
Gesamtprozess							
Gasherstellung							
Aufbereitung							
Filterung							
Kühlung							
Wäsche							
Verstromung							
Aufladung							
LLK							
Motor							
Katalysator							
Nachbereitung							
Reinigung							
Filterung							
Priorität		1	2				

Tab. 1: Brennstoffart (Gas), erwartetes Marktpotenzial, Umwandlungstechnologie, abzuklärenden Prozesssteile, Prioritäten

Mit 1. Priorität wird der Prozess für Holz von der Gasherstellung über die Vergasung bis zur Nachbereitung der Abgase untersucht. Mit 2. Priorität wird der Prozess der Verstromung von Klär- und Biogas aus der anaeroben Vergärung untersucht.

Für die Brennstoffe Deponiegas, Grubengas und Bio-Ethanol ist nur eine sehr kleine Nische⁷ zu erwarten. Diese werden im Rahmen dieses Berichtes nicht untersucht.

3.3 Gesamtheitlicher Ansatz - Prozessorientierung

In dieser Untersuchung ist die Betrachtungsweise unter dem gesamtheitlichen Aspekt der Prozesse wesentlich. Bezogen auf die Tab. 1 entspricht dies der **prozessorientierten Betrachtungsweise**,

⁵ Biogene Gase vs. Biogas

Unter biogenen Gasen werden im Folgenden alle aus nachwachsenden Stoffen produzierbaren Gase verstanden. Insbesondere sind dies Holzgas (Generatorgas), Klärgas, Biogas, etc..

In der Literatur wird dafür häufig der Begriff Biogas verwendet, welches zur Konfusion mit dem aus Vergärungsprozessen von z.B. Nahrungsmittelabfällen und Kadavern hergestelltem Gas führt.

⁶ Marktpotenzial für Holzgas

100 PJ=35'000 100kW Anlagen (Global market potential for renewable energies, Vahrenholt, F. 1998)


⁷ Die Nutzung speziell angebauter Energiepflanzen

befindet sich mit Ausnahme der Biodieselherstellung aus Raps (RME) noch in der Entwicklungsphase und ist unter ökonomischen Gesichtspunkten mit den fossilen Energieträgern noch nicht konkurrenzfähig. So zum Beispiel auch kerosinartige Treibstoffe wie ARTFUEL (künstliche Hochleistungstreibstoffe aus Biomasse, siehe Anhang "Bezeichnungen und Abkürzungen").

Die Ertüchtigung der anspruchsvollen Holz-Vergasungsverfahren für land- und forstwirtschaftliche Reststoffe und Energiepflanzen könnte langfristig eine verstärkte Anwendung ermöglichen [H15].

d.h. Prozesse für eine Gassorte z.B. Holzgas, Klärgas, Biogas, respektive für eine Umwandlungstechnologie: Vergasung, respektive Vergärung.

Als prinzipielle Ansätze zur Beurteilung der Gesamtsysteme dienen die in Tab. 2 zusammengefassten Prozessvarianten:

Variante	1	2	3
Gasherstellung	Einfach, robust	Kompromiss zwischen Aufwand und wenig Problemstoffen, empfindlich	Hoch entwickelt, wenig Problemstoffe im Gas, ev. aufwendig
Gasaufbereitung	Aufwendig, sobald Abgas-Nachbehandlung erforderlich	Mittel aufwendig	Minimal, Brennstoff abhängig
Gasverstromung	Einfach, robust, hohe Emissionen	Ziemlich robust, mittel aufwendig	Hoch entwickelt, aufwendig, geringe Emissionen
Abgasnachbehandlung ⁸	Aufwendig (gesetzlich noch nicht vorgeschrieben)	Mittel aufwendig (gesetzlich noch nicht vorgeschrieben)	Integrierte Nachbehandlung (viel besser als vorgeschrieben)
Beispiel bezogen auf Holzgas	FB (Gegenstrom), Zündstrahl	FB (Gleichstrom), Magermotor TL, SCR	Mehrstufiger Vergaser, Swissmotor
Entwicklungstendenz			
	Stand der Technik als Gesamtsysteme	Zur Zeit in Entwicklung für Gesamtsysteme	Stand der Technik der Teilsysteme

Tab. 2: Prinzipielle Prozessvarianten (bezüglich Beispiele siehe Abschnitt "Analyse Vergasung: Gesamtsysteme")

3.4 Untersuchungsgrenzen

Nicht untersucht oder nur soweit erforderlich werden die folgenden Komponenten und Prozesselemente:

- Brennstoff
 - Vorkommen und Eigenschaften (Qualität und Zusammensetzung, die für den Prozess wesentlichen Parameter werden untersucht)
 - Logistik: Beschaffung, Lagerung, Zufuhr (Bestückung)
- Anlage
 - Steuerung
 - Details für den Betrieb und die Wartung
- Stromproduktion⁹

⁸ Die TA-Luft und die LRV begünstigt den Magermotor und den bezüglich Emissionen schlechten Zündstrahlmotor (siehe Anhang "Gesetze: TA-Luft und LRV").

⁹ Da die Stromproduktion nicht betrachtet wird, ist die Systemgrenze bei der mechanischen Wellenarbeit. Somit wäre der Ausdruck "Verstromung" korrekterweise durch den Ausdruck "Umwandlung in mechanische Wellenarbeit" zu ersetzen. De facto wird aber der Generator teil als Blackbox, welche auf alle Systeme passt, betrachtet.

- Generator, Umrichter
 - Stromabgabe und Verteilung
- Entsorgung
 - Logistik
 - Rückstände (Filterasche, Abwasser, etc.)
 - Anlage

3.5 Terminologie

Im Anhang "Bezeichnungen und Abkürzungen" sind die wichtigsten Definitionen, Bezeichnungen und Abkürzungen zusammengestellt.

4 Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergasung (Holzgas)

4.1 Zusammenfassung der Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergasung

Die nachfolgende Liste ist eine Zusammenfassung der Analyse der Verstromung von Gas aus der Vergasung. Detaillierte Angaben finden sich in den anschliessenden Kapiteln.

- Die Teerbildung und Teerverarbeitung (Umwandlung, Entfernung, Verbrennung) wurde als eigentliches Bottleneck eruiert. Eine vollständige Teerentfernung ist insbesondere mit wirkungsgradoptimierten Aggregaten kaum zu erreichen. Eine Kumulation von Ablagerungen in den Motornebenaggregaten wie Turboladern, Ladeluftkühlern und Katalysatoren und somit betriebliche Probleme sind die Folge. Mehrstufige Vergasungsprozesse, welche ein extrem teearmes Gas produzieren, haben ein hohes Entwicklungspotenzial, sind aber apparativ aufwendiger als einstufige Verfahren.
- Bei teerfreien Vergaserprozessen sind im Gas immer noch viele Partikel und Schadstoffe zu erwarten, sodass eine Gasaufbereitung (Filterung, Waschung) für motorische Zwecke erforderlich ist. Um gute thermodynamische Wirkungsgrade erreichen zu können, ist eine Gaskühlung vor dem Motor nötig.

Bei der Gasaufbereitung mit Filtern stehen keramische oder metallische Sinterfilter im Vordergrund. Potenziale bestehen bei einer, auf Holzgas fokussierten Weiterentwicklung zur Erhöhung der Filterrobustheit, zur Vereinfachung der Regeneration (kontinuierliche Verfahren) und der Systeme.

Bei der Schadstoffentfernung liegt das Potenzial ebenfalls in der holzgasspezifischen Entwicklung und in einer Kombination mit der Gaskühlung (Wäscher).

- Bei den Motoren zeichnet sich der Trend ab, den etwas empfindlicheren, jedoch saubersten Systemen den Vorrang zu geben. Bis die gesetzlichen Limiten angepasst sind, liegt der Handlungsbedarf bei der wirtschaftlichen Optimierung der Zwischen- und Übergangslösungen. In der Dieselmotortechnik zeichnen sich noch ungenutzte Potenziale bezüglich Co-Combustion verschiedener Brennstoffe (biogenes Gas, Biodiesel) ab.
- Der Vergleich des Handlungsbedarfes mit Fokus auf das Gesamt-, respektive auf die Teilsysteme ergibt Unterschiede bezüglich der Priorität bei:
 - Der Vergasung und der Teerabscheidung (Optimierung Gleichstrom Festbettvergaser vs. Teerfreie Systeme)
 - Der Verstromung (Adaptation des Swissmotors vs. integriertes Gesamtsystem).

Der Handlungsbedarf bei der Partikel- und Schadstoffentfernung sowie der Temperaturminderung sind vergleichbar (holzgasspezifische Verbesserung). Beim Gesamtsystem besteht zusätzlich ein Bedarf zur Integration und Kombination der Verfahrensschritte.

4.2 Gasherstellung

Am Anfang des Verstromungsprozesses steht die Vergasung. Bei der Vergasung wird die Biomasse in Gas und Nebenprodukte umgewandelt. Die resultierende Gaszusammensetzung hängt von vielen Parametern ab und der Prozess an sich ist sehr komplex. In den folgenden Abschnitten ist dies im Detail aufgezeigt

Eine Übersicht der registrierten Vergaser Hersteller und deren Produkte und Produktspezifikationen ist im Anhang "Holzgas: Herstellungsverfahren: Hersteller" ersichtlich. Zusammenfassend ist zu bemerken:

- Die Anzahl verschiedener Anlagen ist mit 120 Anlagen hoch.
- Die verfügbaren Daten sind unvollständig.
- Mehrere Anlagen sind nur für eine kurze Zeit im Versuchsbetrieb gelaufen und anschliessend still gelegt worden.

Dies zeigt, dass bei der Herstellung einer technisch einwandfreien, wirtschaftlichen Anlage noch kein Durchbruch erreicht ist.

4.2.1 Zusammenfassung der Aussagen über die Gasherstellung mit Vergasung

In der nachfolgenden Liste ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Aussagen der Kapitel über die Gasherstellung mittels Vergasung gegeben.

- Obwohl heute einige Vergaseranlagen in Betrieb sind, gibt es **kaum verlässliche und vergleichbare Daten**. Einerseits liegt dies an der schwierigen (Gas-)Messtechnik und der Komplexität der Anlagen und des Prozesses. Andererseits zeigt dies den noch tiefen Entwicklungsstand und den Mangel an Koordination.
- Wichtigstes Kriterium bei der Wahl des Vergasers und des Vergasungsmittels bei anschliessender Verstromung ist der **Teer- und Staubgehalt** des Gases. Die meisten Vergasungsverfahren brauchen dafür eine entsprechende Gasaufbereitung.

Als weitere Kriterien sind zu nennen:

- Der **H₂-Gehalt**, welcher einen positiven Einfluss auf die motorische Verbrennung (Flammgeschwindigkeit) haben kann.
- Der **CO-Anteil**, welcher den Motor unverbrannt durchströmen kann (Schlupf) und damit Emissionen über dem Grenzwert von 650 mg/Nm³ erzeugt.
- **Schwefel-** und andere **Schadstoffanteile**, welche besonders die Katalysatoren deaktivieren und zu Korrosion führen können. Zur Verminderung muss in der Regel eine Waschanlage eingesetzt werden.
- **Schwankungen** der brennbaren Anteile im Gas, welche zu einem ungleichmässigen Heizwert und damit zu Verbrennungsproblemen, respektive Schadstoffemissionen (**CH_x**, **NO_x**, Partikel, etc.) führen. Die Gasqualität und deren Schwankungen hängen stark von den Brennstoffparametern: Wassergehalt und Korngrößenverteilung ab.
- Der **Gegenstrom-Festbestvergaser** ist robust, braucht aber anschliessend eine aufwendige **Aufbereitungsanlage**, besonders aufgrund des relativ hohen Teergehalts.
- Am häufigsten angewendet wird der **Gleichstrom-Festbettvergaser** mit Luft (geringe Anlagegrösse, keine Luftzerlegungsanlage nötig, mässig viel Teer)

- Die Möglichkeiten der **Quer-, Zweistrom-Festbettvergaser** und der **mehrstufigen Vergasern** sind noch wenig entwickelt. Zur Zeit werden diese als kompliziert und teuer eingeschätzt. Es sind aber Vorteile bezüglich Regelbarkeit und **Gasqualität** zu erwarten.
- **Wirbelstromvergaser** sind komplex und aufwendig. Sie werden heute erst ab **5 MW** eingesetzt. Diese Vergaserart hat höhere Teergehalte und viel höhere Staubgehalte als der Gleichstrom-Festbettvergaser und bedingt somit eine **aufwendige Aufbereitungsanlage**.
- Mit **mehrstufigen Vergasern**, wie die Klein-Anlage der Technical University of Denmark (DTU) und das Carbo-V-Verfahren lässt sich brennstoffunabhängig ein **teearmes Gas** herstellen. Das Carbo-V-Verfahren ist scaledown fähig. **CarboCompact** ist ein Produkt in der Leistungsklasse um 125 kWe. Der Richtpreis inklusive Verstromungsmodul bewegt sich um 550 kEUR (ca. 6'600 CHF/kWe).
- Die **Flugstrom-Druckvergasung** von Pyrolyseprodukten aus einer (dezentralen) Schnellvergasung ergibt ebenfalls ein teearmes Gas ist aber aufgrund der aufwendigen Technologie eher für grosse Anlagen geeignet (50 MWth bis 1GWth).

4.2.2 Prozessschritte bei der Gasherstellung mittels Vergasung

Bei der Vergasung wird die Biomasse, in der Regel Holz, in 4 thermochemischen Prozessschritten in brennbares Gas und zu entsorgende Nebenprodukte umgewandelt. Die Prozessschritte sind:

1. Trocknung bei $<200^{\circ}\text{C}$, Verdampfung des Wassergehaltes
2. Pyrolyse bei $200-800^{\circ}\text{C}$, ab 280°C Teerbildung (max. bei $350-400^{\circ}\text{C}$), langsam (1K/s), schnell (5-100K/s, kl. Holzpartikel, endotherm), Produkte: Schwelgas (Teere, C_nH_m , CO_2 , Methanol, org. Säuren, Kohle, Kondensat)
3. Oxidation bei $500-2000^{\circ}\text{C}$, endotherm, Oxidation von C und H, Aufspaltung von C_nH_m
4. Reduktion bei 500°C von CO_2 , H_2O an glühender Holzkohle (allenfalls cracken von Teer bei hohen Temperaturen)

Die genauen Abläufe beim Übergang zwischen den einzelnen Zonen, Entstehung und Zerfall einzelner Verbindungen, gegenseitige Beeinflussung der gebildeten Moleküle und ähnliches sind **nicht vollständig erforscht** [H1].

4.2.3 Prozess-Parameter

4.2.3.1 Eigenschaften des Brennstoffes

Die Anforderung an den Brennstoff ist das wichtigste Merkmal eines Vergasers. Der Brennstoff Holz wird wie in nachfolgender Abbildung (Abb. 2) charakterisiert (siehe Anhang: "Holzgas: Brennstoffparameter")

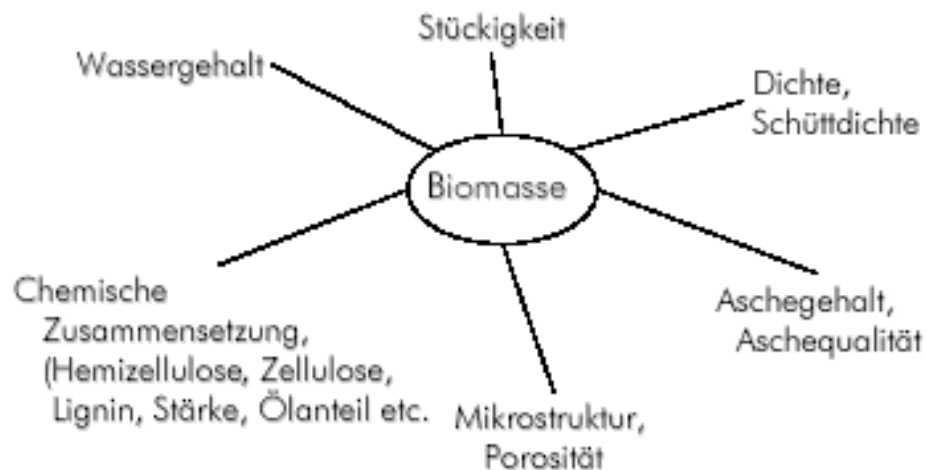


Abb. 2: Charakterisierung des Brennstoffes Holz (Biomasse) [H1]

Anmerkung:

Wassergehalt¹⁰ und Stückigkeit (Korngrößenverteilung) sind die wesentlichen Parameter zur Charakterisierung von Hölzern als Brennstoffe. Die Qualität (Teer, Heizwert) des resultierenden Gases hängt wesentlich davon ab.

Die folgende Abbildung (Abb. 3) gibt eine Übersicht über die Vergasungsverfahren als Funktion der Brennstoffleistung (Anlagengrösse) und der Brennstoffqualität [H1, H15]. Im Bild ist der betrachtete Brennstoffbereich von 100-1000 kW (entspricht 50-300 kWe) als Rechteck eingetragen. Es zeigt sich, dass als Brennstoffqualität Holz trocken mit konstanter Stückgrösse in Frage kommt. Als Verfahren werden diverse Festbett-(Gegenstrom)-Vergaser gebräuchlicherweise eingesetzt.

¹⁰ Wassergehalt: Ein Wert über 20% schränkt die Prozessauswahl ein oder aber bedingt einen zusätzlichen Trocknungsapparat. Auch die Transporteffizienz und die Lagerfähigkeit werden bei hohen Wassergehalten reduziert [H15].

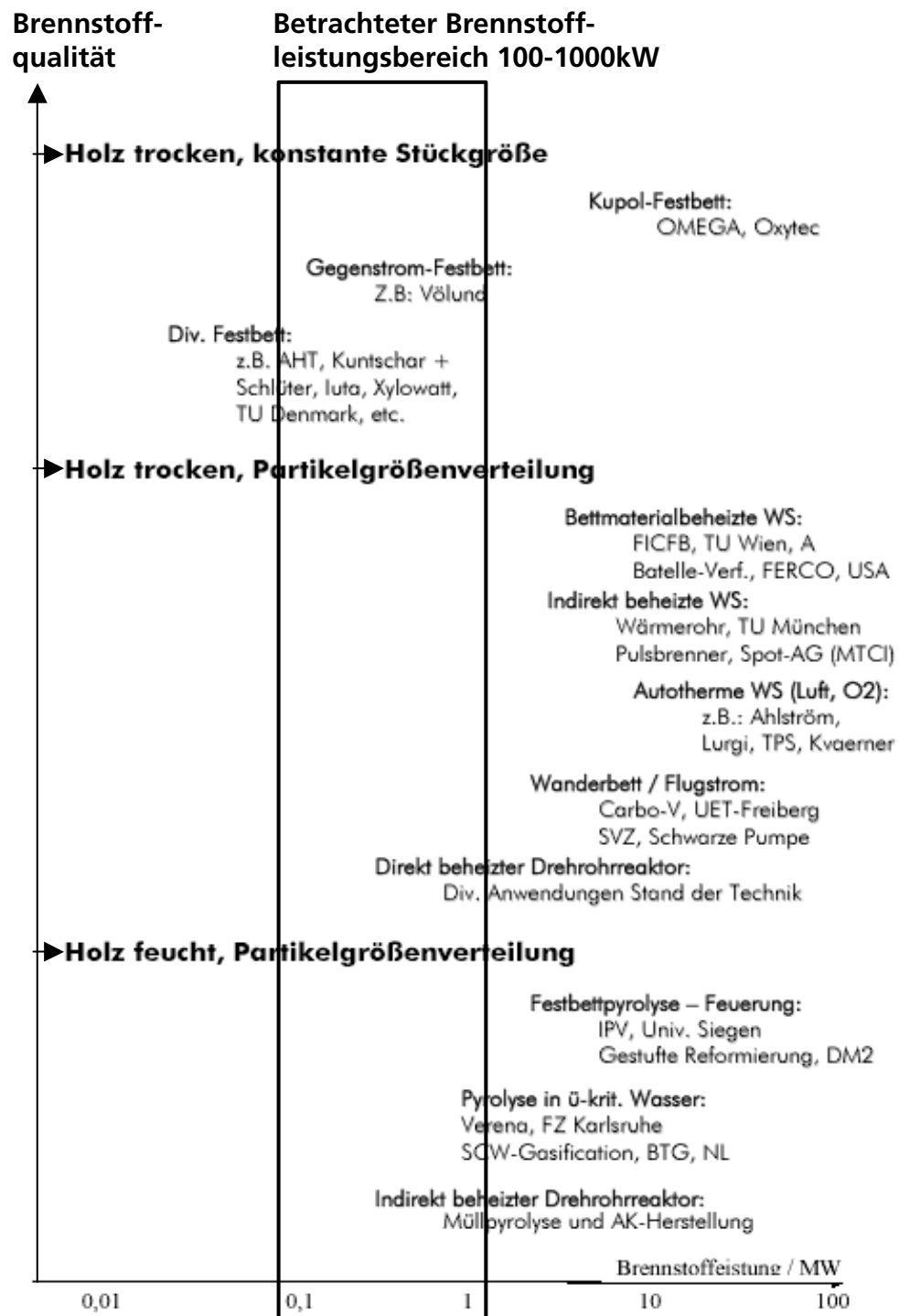


Abb. 3: Vergasungsverfahren als Funktion der Brennstoffleistung und Brennstoffqualität [H1, H15].

4.2.3.2 Eigenschaften des Vergasungsprozesses

Der Vergasungsprozess wird durch folgende Parameter charakterisiert:

1. Vergasungsmittel Kommentar
 - a) **Luft**¹¹ einfach, tiefer Heizwert wegen N₂
 - b) O₂ rein aufwendige Apparaturen, nur für grosse Anlagen
 - c) Luft – O₂Gemisch¹² analog O₂
 - d) Wasserdampf höherer Heizwert als bei Luftvergasung, mehr PAK
 - e) Wasserstoff analog O₂
 - f) Gemische mit O₂/Luft analog O₂
2. Luftverhältnis
Optimal: $\lambda = 0$
Erforderlich: **$\lambda = 0.2-0.3$** zur Aufrechterhaltung der Vergasertemperatur (exotherme Reaktionen)
3. Wasserdampfgehalt
Je höher, desto grösser ist:
 - a) der Heizwert
 - b) der Energieaufwand zur Vergasung
 - c) der **Teergehalt** (aufgrund der erforderlichen Kühlung)
4. Temperatur (400-1000°C)
Je höher, desto:
 - a) mehr CO, H₂
 - b) weniger Teer¹³ und CH₄
 - c) geringere Gefahr von Schlackebildung (siehe Emissionen)
 - d) Der Heizwert durchschreitet ein Minimum (Bei zunehmender Temperatur: Abnahme Teer und CH₄, dafür Zunahme CO, H₂, [H1]).
5. Druck (vs Temperatur)
Je höher,
 - a) desto mehr CH₄
 - b) desto weniger CO, H₂

¹¹ Da Biomasse eher ein regionales Thema ist und die Biobrennstoffe nicht über vergleichbar ausgebaute und zentralisierte Versorgungswege wie Kohle, Öl oder Erdgas bezogen werden können, werden Biomasseanlagen zwangsläufig **nicht in Kraftwerksdimensionen** vordringen können, wie sie bei fossil gefeuerten Großkraftwerken üblich sind. Damit sich die Technik auch bei **kleineren Anlagen** rechnet, muss sie **möglichst einfach aufgebaut** sein. Dies kann mit der Vergasung nur bei Einsatz des **Vergasungsmittels Luft** gewährleistet werden [H16].

¹² **Nanocatalysts** can be used to supply **separate oxygen from air under pressure** across thin film membranes (themselves products of nanotechnology). This pure enriched oxygen supply reduces noxious emissions and reduces the need for heat recovery systems [10].

¹³ Es können hohe Temperaturen auftreten, bei denen Kohlenwasserstoffe zersetzt werden, allerdings werden über 800 °C auch verstärkt PAK gebildet, die sehr stabil und schwer abzuscheiden sind [H15].

4.2.4 Klassifizierung und Beurteilung der Vergasungsverfahren

Die Vergasungsverfahren lassen sich wie im nachstehenden Schema (Abb. 4) gezeigt nach Brennstoffbewegung + Gasführung klassifizieren. Grau hinterlegt sind die Verfahren, bei welchen die grösste Anzahl von praktischen Anwendungen bekannt ist. Die Beschreibungen der verschiedenen Vergaserbauarten sind unter anderem auf <http://www.wka.tu-harburg.de/vergasung/wie/einleit.html> zu finden.

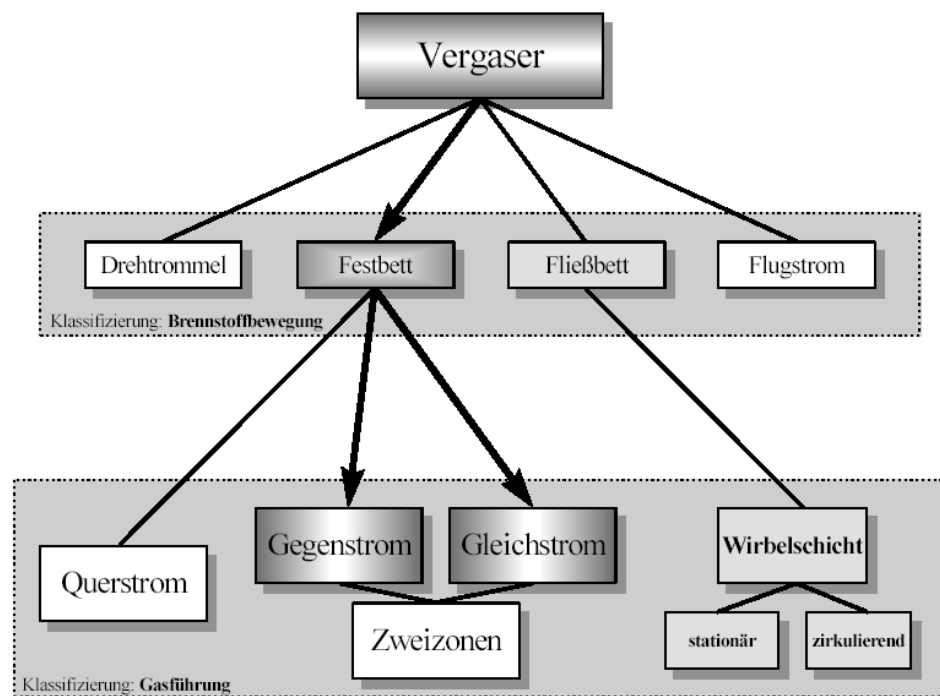


Abb. 4: Klassifizierung der Vergasungsverfahren nach:
Brennstoffbewegung + Gasführung [H1]

Nachfolgend sind die Verwendung, sowie die Vor- und Nachteile der Verfahren in der Reihenfolge der Klassifizierung nach dem Schema von Abb. 4 aufgelistet.

4.2.4.1 Drehtrommel, Drehrohr (100kW – 5MW)

Diese Anlagen werden in der Aktivkohleherstellung zur Vergasung von z.B. pyrolysefähigen Industrierückständen und Müll eingesetzt. Es entstehen aromatisierte Öle, die von der petrochemischen Industrie weiter verarbeitet werden können. Vor allem beim Einsatz mit Holzkohle besteht noch ein Entwicklungsbedarf [H15].

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Gering Wärmeverluste = hoher Wirkungsgrad + Kurze Verweilzeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Unvollständiger Feststoffumsatz - Der geringe Kontakt zwischen Gas und Feststoffen ergibt hohen Schadstoffgehalt auch bei Zugabe von Zusatzstoffen - nur für grob zerkleinertes Brennstoffmaterial • für Industrierückstände und Müll geeignet

Tab. 3: Vor- und Nachteile der Drehtrommel, respektive Drehrohr Vergaser

4.2.4.2 Festbett (für <100 kW, einfachste Bauweise)

4.2.4.2.1 Querstrom (60 kW - 1'000 kW)

Für diesen Typ von Vergaser gibt es kaum Erfahrung, da er bisher nur sehr selten eingesetzt wurde. Da die **Gasqualität nicht sehr gut** ist, muss für die motorische Gasnutzung ein erheblicher Reinigungsaufwand betrieben werden. Hersteller sind VER GmbH in Dresden (www.ver-gmbh.com) und Cratech Texas, USA.

4.2.4.2.2 Gegenstrom (500 kW-10'000 kW)

Die Brennstoffbewegung kann ab- oder aufsteigend sein. Das Gas ist aufsteigend, da die Luft von unten zugeführt wird. Unzersetzte Pyrolyseprodukte können vom Gas mitgerissen werden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Einfach und betriebssicher (geringe Fließprobleme, Brückenbildung unwahrscheinlich, Selbstentpfropfung) + Unempfindlich auf Brennstoffqualität + Gute Energiebilanz <ul style="list-style-type: none"> • Up-scaling bedingt möglich • Mässig konstante Gasqualität, -Menge 	<ul style="list-style-type: none"> - Starke Verunreinigung (Teer, Partikel), Reinigung vor Verstromung nötig, - Verunreinigtes Kondensat verursacht hohe Investitions- und Wartungskosten <ul style="list-style-type: none"> • Unterbrechungsfreie Laufzeit 1Mt (Finnland Torfvergasung)

Tab. 4: Vor- und Nachteile der Festbett-Gegenstrom Vergasung

4.2.4.2.3 Gleichstrom (50 kW-500 kW)

Die Brennstoffbewegung ist in der Regel absteigend.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Mässig viel Teer und Staub + Viel Erfahrung mit diesem Typ <ul style="list-style-type: none"> • Gut für stückiges Holz (Feuchte <20%) • Einfache Bauweise verglichen mit anderen Vergasern 	<ul style="list-style-type: none"> - Abhängig von hoher und konstanter Brennstoffqualität (Würfel, Kugel, konstante Härte und Verschmutzung) sonst Brücken-, Schacht-, Hohlraumbildung - Nicht so gute Energiebilanz (u.a. hohe Gastemperaturen ergeben einen schlechten Wirkungsgrad) - Upscaling ist schwierig - Nicht für Hackschnitzel, Sägemehl - Wenig konstante Gasqualität, -Menge <ul style="list-style-type: none"> • Halmgut hat hohes Sinterrisiko (Schlackebildung)

Tab. 5: Vor- und Nachteile der Festbett-Gleichstrom Vergasung

4.2.4.2.4 Zweistrom, Zweizonen (50 kW-2'500 kW)

Dieser Vergasertyp hat sich analog dem Querstromvergaser noch nicht durchgesetzt. Die Qualität des Gases verlangt ebenfalls eine gute Gasreinigung und die Prozessführung ist komplizierter und apparativ aufwendiger als beim Gleichstromvergaser.

4.2.4.2.5 Mehrstufige Vergaser

Dieser Vergasertyp baut auf obigen Prinzipien (Gegen- und Gleichstrom) auf. Die Vergasungszonen sind aber physisch getrennt. Es gibt jedoch nur wenige Anwendungen, da auch diese Vergaser prozesstechnisch kompliziert und somit apparativ aufwendig sind.

Eine 2-stufige Klein-Anlage (17 kWe) wird zur Zeit von der Technical University of Denmark (DTU) entwickelt und liefert sehr gute Gaswerte (siehe Anhang "Holzgas: Herstellungsverfahren: Pilotanlagen mit Festbettvergasung", [H25]).

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Teerabbau in der Oxidationszone (Teergehalt <25 mg/Nm³) + Relativ einfache Gasreinigung (Teergehalt <5 mg/Nm³) + Das Kondensat ist einfach zu entsorgen. 	<ul style="list-style-type: none"> - komplexer als der Gleichstromvergaser • im Entwicklungsstadium, geringe Betriebs- erfahrung

Tab. 6: Vor- und Nachteile der mehrstufigen Vergaser

4.2.4.2.6 Kombinierte Gegenstrom-Gleichstrom-Holzvergaser des IUTA

Ein Kombi-Holzvergaser des Instituts für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) mit einer Feuerungswärmeleistung von 100 kW vereint durch die Kombination von Gegen- und Gleichstromreaktor deren bauartbedingten Vorteile miteinander. Die Anlage ist unter http://www.iuta.de/PIUS_KRW/Biomasse/einleitung_biomasse.htm beschrieben.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Cracken von PAK im Gleichstromreaktor (Schwachgas wird durch das untere Glutbett geleitet (800-900 °C)) + geringe Empfindlichkeit hinsichtlich der Qualität des eingesetzten Brennstoffes 	<ul style="list-style-type: none"> - komplexer als der Gleichstromvergaser • im Entwicklungsstadium, geringe Betriebserfahrung (Ende 2002, 126h)

Tab. 7: Vor- und Nachteile der kombinierten Gegenstrom-Gleichstrom Vergaser

4.2.4.3 Fließbett – Wirbelschicht (>5 MW)

Feinkörnige Holzteile und/oder ein fluidisierendes Mittel (z.B. Sand) ergeben ein fließendes Brennstoffverhalten. Es ist zwischen stationärem SWS und zirkulierendem ZWS Wirbelschichtvergasern zu unterscheiden. Aufgrund des **grossen apparativen Aufwands**, werden solche Vergaser nur bei **grosser Leistung** eingesetzt. Das Potenzial für ein Scale-down ist kaum gegeben. Zudem ist das Gas für motorische Zwecke aufwendig aufzubereiten.

4.2.4.4 Flugstrom / Wanderbett

Dieser Vergasertyp befindet sich im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Anwendung sind das **Carbo-V-Verfahren** der Firma Choren [H17] die **Flugstrom-Druckvergasung** von Pyrolyseprodukten des Forschungszentrum Karlsruhe [H28].

Carbo-V ist ein 3-stufiger Vergasungsprozess, der Kohle, Biomasse oder vorbehandelte Siedlungsabfälle in absolut teerfreies Rohgas umwandelt. Die angestrebte Leistungsklasse ist 5 MWe - 20 MWe, wobei ein Scale-down auf 0,5 bis 1 MWth, respektive 150 - 250 kWel möglich ist. In diesem Bereich gibt es ein Produkt namens **CarboCompact**. Nach der Meinung von Experten ist das Verfahren und das **Konzept der Trennung** von Pyrolyse und Oxidation **sehr gut**.

Im Anhang "Holzgas: Herstellungsverfahren: Carbo-V-Verfahren, respektive CarboCompact" sind die drei Verfahrensstufen, die bisherige Betriebserfahrung, Marktreife, Eckdaten und die Vorteile des Verfahrens beschrieben. In der nachstehenden Abbildung (Abb. 5) sind die verfahrenstechnischen Unterschiede zur Gegenstrom-Festbettvergasung aufgezeigt.

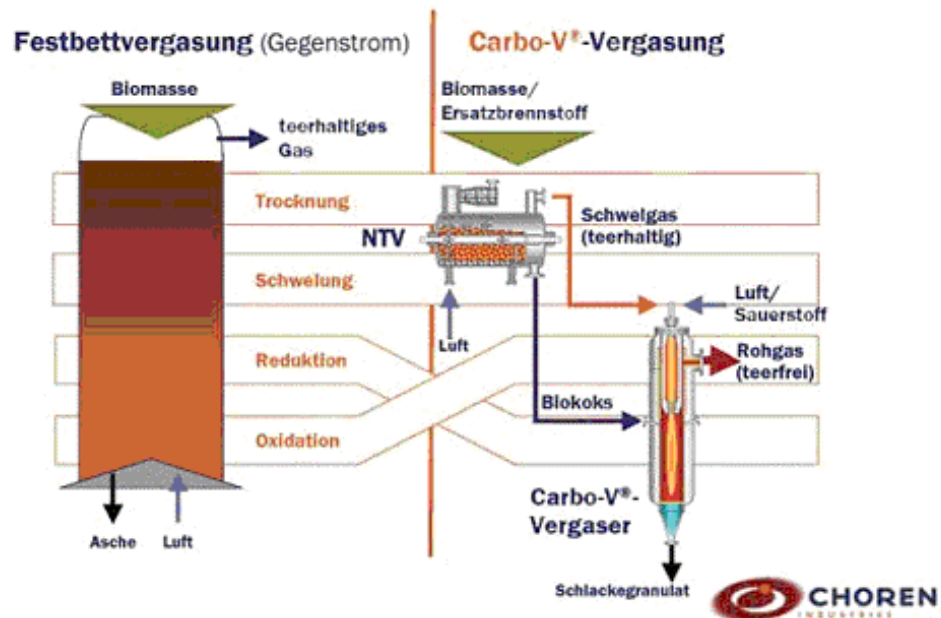


Abb. 5: Verfahrenstechnische Unterschiede zur Gegenstrom-Festbettvergasung

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Hoher Wirkungsgrad und hohe Gasqualität + Niedrige Emissionswerte (teerfreies Gas aus allen Brennstoffen ohne katalytische Nachbehandlung, baustoffgeeignete Schlacke) + Apparate-technische Aufteilung ergibt optimale Anpassung der Verfahrensführung + Scale-down ist möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwendig, da mehrere Reaktoren erforderlich sind - Erreichung einer vollständigen Pyrolyse (für Teerfreiheit) ist schwierig • Im Entwicklungsstadium¹⁴, Angaben über die Robustheit (bez. Brennstoff, Betrieb), effektive Gasqualität und die Kosten (Investition und Unterhalt) sind bisher nicht zugänglich.

Tab. 8: Vor- und Nachteile der Flugstrom oder Wanderbett Vergaser (Carbo-V, CarboCompact)

¹⁴ Die Firma Choren konzentriert sich zur Zeit auf die Herstellung von Brennstoffen und ist daher **im Bereich CarboCompact wenig aktiv**.

Bei der **Flugstrom-Druckvergasung** werden Pyrolyseprodukten (Pyrolyseöl/Koks-Slurries aus einer vorgängigen Schnellpyrolyse) bei ca. 26 bar Betriebsdruck mit λ -Werten zwischen 0.4 und 0.5 und Vergasertemperaturen zwischen ca. 1300°C und 1600°C vergast. Das resultierende Syngas enthält etwas über 50% CO, knapp 30% H₂ und 15 bis 20% CO₂. Das Rohgas ist praktisch teerfrei, die CH₄-Gehalte liegen bei $\leq 0.1\%$. Die Idee ist, dass die Schnellpyrolyse dezentral und die Druckvergasung zentral in Anlagen von 50 MWth bis 1GWth Leistung durchgeführt wird. Es sind Pilotanlagen mit ca. 2 MWth geplant.

4.2.5 Gaszusammensetzung und Qualität

Holzgas ist mit einem Heizwert von $H_u = 4.5 - 5.7 \text{ [MJ/m}^3\text{]}$ ein sogenanntes Schwachgas (klopffest). Es besteht aus brennbaren (H₂, CO, CH₄, C₂+) und unbrennbaren (CO₂, N₂, H₂O) Komponenten.

Besonders bei der Altholzvergasung sind im Holzgas auch **Verunreinigungen** wie **Schwefelverbindungen** (0.1-2.2%), Alkalimetalle (Kalium, Natrium), Stickstoffverbindungen, Halogenverbindungen und Schwermetalle nicht auszuschliessen. Für die motorische Weiterverarbeitung ist besonders H₂ wegen des positiven Einflusses auf die Verbrennung (Flammgeschwindigkeit) zu beachten. CH_x und CO (10-25%) sind kritisch, da Anteile davon aufgrund des sogenannten Motorschlupfes unverbrannt ins Abgas gelangen [H22]. Motorisch am heikelsten sind die in der folgenden Tabelle (Tab. 9) aufgelisteten Anteile:

Partikel / Teer ¹⁵ (Naphthalin, Phenol)	Zielwert [mg/Nm ³]	mind. Anforderungen [mg/Nm ³]	guter Gleichstrom Verg. [mg/Nm ³]	CarboCompact ¹⁶ [mg/Nm ³]
Russ, Staub, Asche, Bettmaterial, Koks	0 - 5	0 - 50* ($<10 \text{ mm}$)	100 - 500 (0.05-0.2 μm [H5] 1 - 10 μm [Au3])	?
Teer (PAK)	0 - 50	0 - 100 330*	100 - 1'000	keine

Tab. 9: Zielwert, Mindestanforderungen und typische Anteile von Partikel und Teer für verschiedene Vergaseranlagen. (*Xylowatt Anlage nach Auswaschen [H8])

Für die Dimensionierung der Aufbereitungsanlage ist die **Gastemperatur** vor dem Kühler (70-500°C), respektive vor dem Motor (50-120°C) sehr wesentlich.

Regeltechnisch schwierig zu beherrschen sind die brennstoffabhängigen **Schwankungen der Gasanteile**.

¹⁵**Teere:** [H15, H23, Au8]

primäre: Pyrolyseprodukte entstanden bei 200–500°C, zyklische aromatische und kondensierte Ringsysteme, reaktiv, Taupunkt bei 250-300°C, in polaren Solventien löslich, Hauptbestandteil an Teeren in Holzgas, in Schnellpyrolyseanlagen mit einem Massenanteil von bis zu 70% als Sekundärbrennstoff zu gewinnen

sekundäre: kondensierbare Produkte aus Reaktionen von primären Teeren (Sekundärdegradation, homogene Gasreaktionen, heterogen katalysierte Reaktionen), Mono- und Diaromaten

tertiäre: PAK, aus sekundären Teeren bei über 800°C durch Rekombination gebildet, z.B. Benzol und Naphthalin
Konzentration an Polyaromaten nimmt mit steigender Temperatur zu

¹⁶**CarboCompact**

Über die Gaszusammensetzung und Qualität des Carbo-V-, respektive CarboCompact-Verfahrens wurden bisher keine Messdaten gefunden. Gemäss Angaben sollte aber eine sehr hohe Gasqualität bei absoluter Teerfreiheit resultieren, welche eine katalytische Nachbehandlung unnötig macht.

Im Anhang "Holzgas: Zusammensetzung, Eigenschaften" befinden sich ergänzend weitere typische Werte und experimentell ermittelte Daten für den **Heizwert** H_u und die **Gaszusammensetzung**.

4.2.6 Nebenprodukte (zu entsorgen)

Als Nebenprodukt aus dem Vergasungsprozess resultiert Asche. Diese besteht je nach Brennstoffzusammensetzung aus: SiO_2 , Kaliumoxid K_2O und Calciumoxid CaO . Die Asche muss weiterverarbeitet, respektive entsorgt werden.

Betrieblich besteht die Gefahr der Schlackebildung. Schlacke kann z.B. die Luftzufuhr, die Brennstoffbewegung etc. behindern. Die Schmelzpunkte der Einzelstoffe liegen über 1400°C . Die Kombination der Stoffe kann aber Schmelztemperatur unter 800°C haben [H21].

4.2.7 Auswahl des Verfahrens

Die **gewünschte Anlagengrösse**, die **vorhandene Brennstoffqualität** und die **geforderte Gasqualität** definieren die möglichen Vergasungsverfahren und die entsprechende Gasaufbereitung. Dies wiederum definiert den Anfall von Nebenprodukten und die Emissionen (Holzkohle, Asche, Teer, Waschwasser, Schlacke).

4.2.8 Bottlenecks und Entwicklungspotenziale bei der Vergasung

In der folgenden Tabelle (Tab. 10) sind die Bottlenecks und Entwicklungspotenziale der Vergasung allgemein und der Vergasungsverfahren im Speziellen zusammengestellt.

Bottlenecks der Vergasung allgemein	Entwicklungspotenzial
Vergasungsprozess allgemein (inkl. Prozessführung: Gaseigenschaften als Funktion von Bettmaterial, Druck, Temperatur, Luftverhältnis, Vergasungsmittel, etc.)	Weitere Erforschung der chemischen Detailprozesse (Zerfall, Bindungen, gegenseitige Einflüsse), Strömungsverläufe (Temperatur, Druck, Geschwindigkeiten), etc.
Katalysatoren¹⁷ und Bettmaterial¹⁸ Diese haben einen grossen Einfluss auf den Temperatur-Zeit-Verlauf und damit auf die Gasqualität (Teerbildung). Neue Kat-Materialien¹⁹ (wie Metall-Oxid-Keramik, Biocatalystoren, Ni), neue Substrat-Materialien (speziell porös), neue Beschichtungstechniken (Nanotechniken, Coatings)	Es besteht ein grosses Entwicklungspotenzial auf diesem Gebiet mit grundlegenden Verbesserungen. Die spezifische Weiterentwicklung (Forschung) unter Einbezug der Erfahrungen von robusten, chemischen Grossanlagen ist erforderlich.
Vergasungsmittel (O ₂ , Wasserdampf) unter anderem zur Erhöhung des H₂-gehaltes und somit des Heizwertes	Die Möglichkeiten z.B. mittels Nanocatalysts [10] müssen genauer erforscht werden. Solche Untersuchungen haben einen grundlegenden, längerfristigen Charakter.
Allgemein Brennstoffqualität: u.a. Korngrößenverteilung und Wassergehalt (haben Einfluss auf Gasqualität, Heizwert, Energieaufwand zur Vergasung und Teergehalt)	Parameterstudie und Entwicklung von (selbst-) regulierenden Prozessen
Anlagen: Auslegung und Projektierung	Auslegungs-Software zur Verkürzung der Projektierung, verlangt aber zuerst entsprechende Messdaten und die Prozessbeherrschung
Bottlenecks der Vergasungsverfahren	Entwicklungspotenzial
Festbettvergaser Gegenstrom - Schlechte Gasqualität (Teer, Partikel) - Aufwendig zu entsorgendes Kondensat	Verbesserung der Gasqualität und Abstimmung mit der Aufbereitungsanlage. Sonst analog Gleichstrom.
Festbettvergaser Gleichstrom - variierende, ungenügende Gasqualität (Teer) - schlechter Wirkungsgrad - Brennstoffempfindlich	Bestehende Anlagen ausmessen, optimieren und automatisieren. Neue Anlagen bauen um (Auslegungs-) Erfahrung zu sammeln.

¹⁷ "Cat-Nat", a CORDIS RTD-PROJECT of European Communities, deals with the development of cost-effective and durable catalysts for natural gas combustion based on nano-sized perovskite oxides and limited amounts of Pd for vehicles engines and premix catalytic burners for household boilers [10].

¹⁸ Eine signifikante **Reduzierung des Teergehalts** lässt sich **durch katalytisches Bettmaterial** (i.d.R. Dolomit) sowie durch **geeigneten Temperatur-Zeit-Verlauf** der Gasphase im Kontakt mit dem Bettmaterial erzielen. Bei insgesamt mäßigen Temperaturen von unter 800°C werden noch wenig PAK gebildet, wird ein Temperaturniveau von über 1400°C erreicht, gelingt auch eine rein thermische Zersetzung.

¹⁹ 10 to 15 years nanostructured biocatalysts will have a profound impact on the petroleum and chemical processing industries [10].

Kombinierte Gegenstrom-Gleichstrom-Holzvergaser <ul style="list-style-type: none"> - wenig Erfahrung, da im Entwicklungsstadium 	Weiterentwicklungsmöglichkeit für obige, unkombinierte Anlagen um eine höhere Gasqualität bei robustem Prozess zu erhalten. Erfahrungen können teilweise übertragen werden.
Quer-, Zweistrom -Festbettvergaser <ul style="list-style-type: none"> - wenig Erfahrung, da im Entwicklungsstadium - Schlechte Gasqualität - Aufwendig 	Ein Einstieg in diese Technologie scheint zur Zeit nicht lohnenswert . Da wenig Erfahrung vorhanden ist müsste auch einiges investiert werden.
Mehrstufige -Festbettvergaser <ul style="list-style-type: none"> - wenig Erfahrung (Pilotanlagen) - Aufwendig 	Ein Einstieg in diese Technologie könnte vielversprechend sein. Für bessere Aussagen müssen die Resultate der Pilotanlagen abgewartet werden.
Mehrstufige Vergaser (Flugstrom-, Wanderbettvergaser, CarboCompact, dezentrale Schnellpyrolyse mit zentraler Flugstrom-Druckvergasung) <ul style="list-style-type: none"> - Mässig viel Erfahrung - Aufwendig 	Sehr vielversprechende Technologie (Wirkungsgrad, Gasqualität), welche aber noch wenig entwickelt ist. (Eine Zusammenarbeit mit dem Patentinhaber Choren müsste angestrebt werden.)
Drehtrommel, Drehrohr	In der CH besteht ein geringer Entwicklungsbedarf , da dieser Typ vor allem für Holzkohle geeignet ist. Übertragung auf Holz müsste untersucht werden.
Wirbelschichtvergaser <ul style="list-style-type: none"> - Aufwendig und daher für grosse Anlagen - Schlechte Gasqualität 	Es besteht kein Entwicklungsbedarf für Anwendungen im Bereich von 50-300 kWe.

Tab. 10: Bottlenecks bei der Vergasung und Entwicklungspotenzial

4.2.9 Handlungsbedarf

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Vergasung):

Aufgrund der guten Erfahrung mit realisierten Gleichstrom-Festbettvergasern, sind Entwicklungen für eine Optimierung und Automatisierung erstrangig. Speziell die Entwicklung von spezifischen Katalysatoren, welche die Vergasungsreaktionen verbessern (reaktiveres Bettmaterial, Zusätze) hat eine hohe Priorität. Zu klären sind Bestrebungen, das Vergasungsmittel (Luft) so zu verändern, damit bessere Heizwerte entstehen: z.B. Nanokatalysatoren für mehr O₂ und somit höherem H₂-Anteil im Brenngas.

Zweitrangig sind Entwicklungen für kombinierte Gegenstrom-Gleichstrom-Holzvergaser. Diese sind längerfristig eine Weiterentwicklungsmöglichkeit, um das Verfahren robuster zu machen und um die Gasqualität zu steigern.

Die Entwicklung der mehrstufigen Verfahren ist zu beobachten.

4.3 Gasaufbereitung

Für eine motorische Verarbeitung muss das Brenngas mit **minimalem Teergehalt** ($<50 \text{ mg/Nm}^3$) hergestellt werden. Staub und Partikel²⁰, sowie Schwefelverbindungen (H_2S) und andere Schadstoffe (Schwermetallverbindungen) sind bis zu einem minimalen Grenzwert ($<5 \text{ mg/Nm}^3$) zu entfernen.

Bei der heutigen Vergasertechnik ist eine **Gasaufbereitung immer erforderlich**. Besonders die Teerabscheidung bedeutet einen erheblichen apparativen und energetischen Aufwand. Bei Kleinanlagen ist dies wirtschaftlich problematisch [H15]. Die Auslegung der Gasaufbereitung muss daher sehr **spezifisch** die Anlagengrösse, die Brennstoffqualität und die erforderliche Gasqualität berücksichtigen. Um wirtschaftliche Lösungen für die Gasaufbereitung zu erreichen, sind auch Kombinationen der Verfahrensvarianten zu berücksichtigen.

4.3.1 Realisierte Verfahren für die Gasaufbereitung

In der folgenden Tabelle (Tab. 11) sind die realisierten Verfahren zur Minderung von zu hoher Temperatur, Partikel-, Staub-, Teergehalten und sonstigen Schadstoffen für die verschiedenen Vergasungstechnologien zusammengestellt. Die resultierende Gasqualität entspricht derjenigen, welche zur Umwandlung der Gase zumindest in einem Zündstrahl- oder Saugmotor nötig ist. Die Gesamtanlagen halten die aktuellen gesetzlichen Normen (ausser CO) ein (siehe Abschnitt Verstromung).

Vergaser	Temperatur	Partikel, Staub	Temperatur	Teer	Partikel, Staub, Schadstoffe
FB Gegenstrom [H1]		Keram. Filter		Katalysator	Wäscher
FB Gleichstrom (für Klärschlamm) [H1]		Zyklon	Kühler mit Zuluft	Nassreinigung	
FB Gleichstrom			3-facher Scrubber (Wäscher)		
Flugstrom endotherm [H1], CarboCompact	Kühler	Filter	Wäscher ²¹ und Kühler		
Zweistufen-vergaser [H1]	Kühler	Venturi Wäscher			Filter mit Fan
Wirbelstrom-vergasung ²²	Kühler	Filter	Wäscher		
ZWS	Kühler			Zyklon und Filter	
FICFB-gasification process [H12]	Kühler	Filter		Wäscher	

Tab. 11: Realisierte Verfahrensschritte für die Gasaufbereitung

²⁰ Probleme mit dem Heissgaskühler: Ablagerung von Partikeln machen eine automatische periodische Abreinigung nötig, allerdings kaum Teerablagerungen [H20].

²¹ Nebenprodukt der Waschung und Kühlung bei:

- unbelastetem Holz ist Wasser mit nur wenig Teer
- Altholz ist Wasser mit zusätzlichen Schadstoffen [H1]

²² Wirbelstromvergasung: [http://www.umweltamt.hagen.de/eu-holz/pdf/tag3_Hisch_lange_Fassung.pdf]

Ausser beim keramischen Filter und beim Zyklon befindet sich vor dem Partikelabbau zur Temperaturminderung immer ein Kühler, respektive Wärmetauscher. Je nach Verfahren werden die Temperaturminderung, der Teer- und Partikelabbau auch in zusammengelegten Schritten durchgeführt.

In der folgenden Tabelle (Tab. 12) ist die Reduzierung von verschiedenen Gaskomponenten mit Hilfe unterschiedlicher Gasreinigungsverfahren aufgelistet.

	Betriebs- temperatur in °C	Partikel- reduzierung in %	Teer- reduzierung in %	NH ₃ Reduzierung in %	HCl Reduzierung in %	H ₂ S Reduzierung in %
Katalytische Teerspaltung	900		> 95			
Gewebefilter	200	60-85	25-0			
Sandbett-Filter	10-20	70-95	60-95	> 95	90	80-95
Rotationswäscher	50-60	70-90	10-25			
Venturiwäscher			50-90			
Rotations Atomisierer	< 100	95-99			90	> 95
Feucht Elektrostatischer Filter	40-50	> 99	0-60			

Tab. 12: Gaskomponentenreduzierung von verschiedenen Gasreinigungsverfahren
[Au8]

Der Sandbettfilter hat für alle aufgelisteten Stoffe sehr gute Reduktionsgrade. Er hat eine sehr tiefe Betriebstemperatur von 10-20°C. Hauptnachteil sind die Abfallstoffe (verunreinigter Sand). Aktuell verwendet z.B. die Firma Xylowatt keine Sandbettfilter mehr, sondern drei nasse Gaswäscher (Scrubber) in Serie. Die beste Teerreduzierung wird mit der katalytischen Teerspaltung bei 900°C erreicht. Die anderen Schadstoffe werden dabei nicht reduziert. Im Gegenteil, sie können den Katalysator sogar deaktivieren (Verglasung) und damit die Teerspaltung verhindern. Der Rotations-Atomisierer hat für HCl und H₂S sehr gute Werte, nicht jedoch für NH₃.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Verfahrensschritte näher erläutert und beurteilt.

4.3.2 Teerbehandlung

Beim Teer sind 4 Behandlungsstufen möglich:

1. Entstehung verhindern²³ (siehe auch Abschnitt Gasherstellung)
2. Auflösung (cracken, spalten, umwandeln)
3. Entfernung und Abscheidung (filtern, waschen, reinigen der Ablagerungen)
4. Motorische Verarbeitung (siehe Abschnitt Verstromung)

4.3.2.1 Teerentstehung verhindern

Die Kondensationstemperatur der Kohlenwasserstoffe ist bei 250-300°C. Die motorisch verarbeitbare und vor allem thermodynamisch²⁴ noch sinnvolle Einlasstemperatur liegt bei 40-60°C.

²³ Teer aus der Holzvergasung ist eher ein Problemstoff, den es wenn möglich zu vermeiden gilt, als ein potenzieller Wertstoff [H24].

²⁴ Je höher die Einlasstemperatur ist, desto geringer ist die Ladung des Kolbenraumes und daher auch die Leistungsausbeute, respektive der Wirkungsgrad.

Zudem strömt das Gas durch kalte oder höchstens 80-100°C warme Leitungsrohre. Eine **Teerentstehung durch Kondensation** und Ablagerung ist somit **nicht zu verhindern**, es sei denn, die Vergasung liefert ein Gas, welches keine kondensierbaren (aromatischen) Kohlenwasserstoffe enthält (mehrstufige Verfahren).

Im Brenngas muss je nach Vergasungsverfahren und Betriebspunkt mit einem Teergehalt von mindestens 500 – 2'000 – 10'000 mg/Nm³ gerechnet werden (Gleichstromvergaser [H3a] – Wirbelschichtvergaser [H12] – Gegenstrom [H3a]). Für die Motoren ist ein Teergehalt von <50mg/Nm³ zu erreichen. Das heisst es sollte eine Teerverminderung um 83 – 97.5 – 99.5% erfolgen.

4.3.2.2 Teerauflösung (Teerspaltung)

Eine nachgeschaltete **thermische**, respektive **katalytische Umsetzung** kann die primären Pyrolyse-Teere in Substanzen überführen, die auch bei Umgebungstemperatur gasförmig vorliegen. Dies hat den Vorteil, dass die chemische Energie der Teere nutzbar wird und weniger zu entsorgende Nebenprodukte entstehen. Das nachfolgenden Schema (Tab. 6) gibt einen Überblick über die thermochemischen Verfahren zur Teerspaltung [Au8].

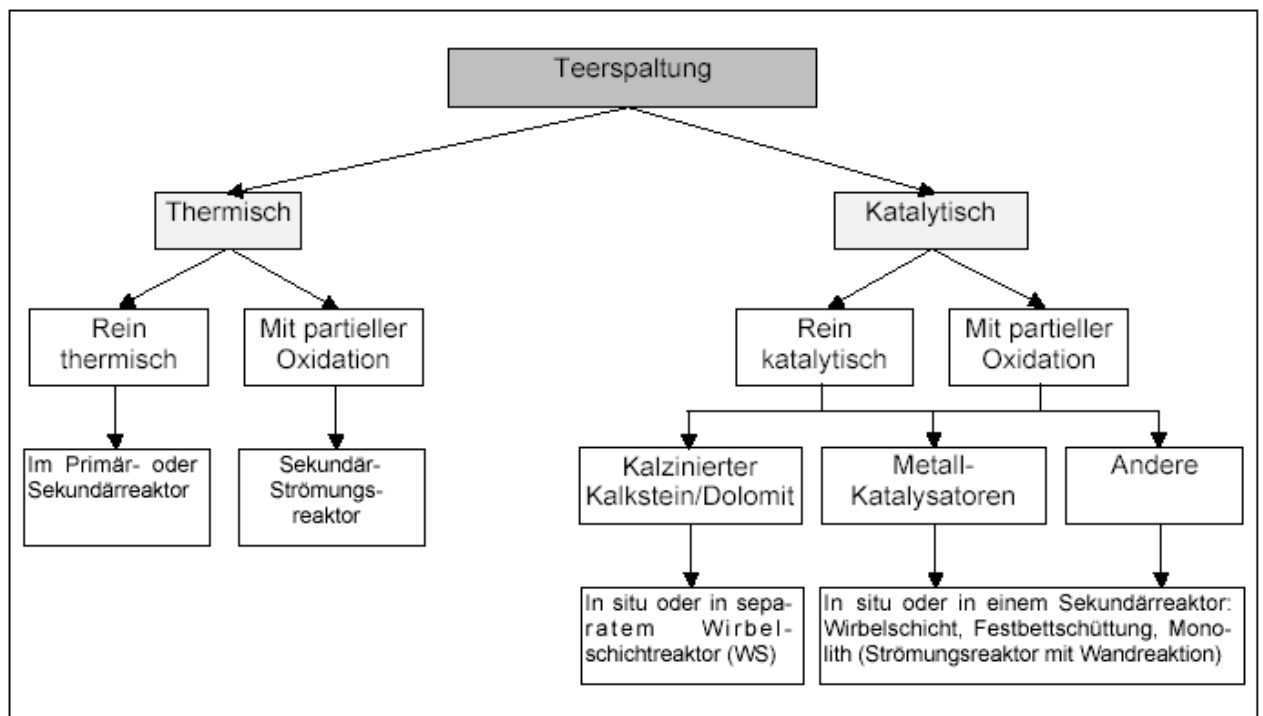


Abb. 6: Überblick über die thermochemischen Verfahren zur Teerspaltung

In folgenden Tabelle (Tab. 13) sind für verschiedene Teerbehandlungsverfahren die Haupt-Vor- und Nachteile aufgelistet.

Teerbehandlungsverfahren	+ Vorteile / - Nachteile
Klassische Abtrennverfahren: Wasch- und Quenchverfahren <ul style="list-style-type: none"> • auf Wasserbasis • auf Basis organischer Solventien • mehrstufige Abtrennverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> - Entstehung von zu entsorgenden Nebenprodukten - Begrenzte Teerabscheideraten - Unpolare, mittel bis leicht flüchtige Teerinhaltstoffe wie z.B. Naphthalin werden nicht hinreichend zurückgehalten - Bessere Abscheidung, Aufwand für Aufarbeitung und/Entsorgung ist aber höher als bei den reinen Wasserwäschen - Aufwendig, da viele Stufen zu realisieren sind
Teerspaltung: Thermische Umsetzung (Cracken, [H23])	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Temperaturen (bis 1400°C) ergeben energetische Einbußen • Teerumsetzungsgrade um 88% • Es ist fraglich, ob diese Umsetzung nicht direkt in den Vergasungsprozess zu integrieren ist (mehrstufige Vergasungsverfahren).
Teerspaltung: Katalytische Umsetzung (endotherme Reformierung mit Wasserdampf oder Kohlendioxid oder Crackreaktionen) <ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchskatalysatoren (Dolomit) • Dauerkatalysatoren (trägerfixierter Übergangsmetalle²⁵ z. B. Nickel (8-te Nebengruppe), CaO, MgO) 	<ul style="list-style-type: none"> + Ermöglichen Nutzung der in den Teeren enthaltenen chemischen Energie und damit weniger Nebenprodukte + Hohe Teerumsetzungsraten (>95%) und Wirkungsgrade. - Hoher Dolomitverbrauch und teure Ver- und Entsorgung - Empfindlich gegen Spurengase, Verkokungsgefahr²⁶ - Gute Testserfolge, aber Dauerbetriebstauglichkeit noch nicht erprobt - Kein kommerzielles Verfahren vorhanden.

Tab. 13: Haupt-Vor- und Nachteile der Teerbehandlungsverfahren [H24]

²⁵ Nickel-Katalysatoren sind gegenüber Dolomitskatalysatoren vorzuziehen. Kommerziell erhältlichen Katalysatoren kommen aus der Reformierungstechnologie. Die kommerziellen Nickel-Katalysatoren sind bisher auf ein anderes Anwendungsfeld hin optimiert worden und sind deshalb für die Teerspaltung von Generatorgas nur bedingt geeignet [Au8].

²⁶ Bei einem typischen Schwefelanteil von 0,3% musste der Katalysator alle 4.000 Stunden erneuert werden
<http://images.energieportal24.de/dateien/downloads/h2forottomotoren.pdf>

4.3.2.3 Teerentfernung und Abscheidung

Ergänzend zu obiger Tabelle (Tab. 12) sind in folgender Tabelle (Tab. 14) für verschiedene Teerabscheideverfahren (Kondensation, Waschung, Sorption) das Minimum und das Maximum der Teerreduzierung aufgezeigt.

Verfahren zur Teerreinigung	Teerreduzierung %	
	Minimum	Maximum
Gaswäscher für FB-Gleichstromvergaser (Absolutwerte für Partikel/Teer)	12 (75/350 [mg/Nm ³])	25 (50/100 [mg/Nm ³])
Textilfilter	0	45
Nasses Elektrofilter (z.B. mit organischem Lösungsmittel) ²⁷	0	60
Teer-Festphasen-Adsorber	51	60
Rotierender Partikel-Separator (RPS)	35	70
Sandbettfilter für FB-Gleichstromvergaser (Absolutwerte für Partikel/Teer)	48 120/500 [mg/Nm ³]	98 5/5 [mg/Nm ³]
Filterkerzen aus Sintermetall ²⁸ für Wirbelschicht-Vergaser	Keine Daten	Keine Daten

Tab. 14: Teerreduzierung von verschiedenen Verfahren zur Teerreinigung [H26]

Alle Verfahren haben grosse Variationen zwischen minimaler und maximaler Teerreduzierung. Im schlechtesten Fall kann daher für den Motor immer eine zu hohe Teerbelastung entstehen. Je nach Teeranteil im Gas sind Abscheidegrade²⁹ unter 95% nicht genügend (siehe oben). Die Verfahren müssen dann aufwendiger in mehreren Stufen eingesetzt werden. Hauptnachteil von jeder Teerabscheidung sind die zu entsorgenden **Nebenprodukte**.

Bei kleinen Teeranteilen besteht die Gefahr eines langsamen, aber permanenten Aufbaus auf zum Beispiel Turboladerschaufeln. Solche kumulierte Ablagerungen sind schwierig zu detektieren und ergeben empfindliche Wirkungsgradeinbussen. Sie sind meist mechanisch durch Öffnen des entsprechenden Maschinenteils zu entfernen.

²⁷Abscheidung von Teer und Partikeln ist erfolgreich möglich mit:

- Nasselektrofilter (0-60%)
- Nasser Gasreinigung mit organischem Lösungsmittel (z.B. Dieselöl statt Wasser, anschliessend Verbrennung in geeigneten Anlagen) [H20]

²⁸Wirbelschicht-Vergaser

- Unter Druck, Gasturbine: Heissgasreinigung, keine Teerabscheidung, Keramikfilter brachen, durch Filterkerzen aus Sintermetall ersetzt
- Atmosphärisch: vor Motoren kühlen, Abscheidung von Teeren und Partikeln, mittels Katalysatoren reduziert (z.B. Ni, Dolomit, Olivin) dann gleiche Techniken wie für Gase aus Festbett-Vergasern [H20].

²⁹Der bei der Vergasung von Biomasse entstehende Teer kann die Nutzung des Produktgases in Verbrennungsmotoren erschweren oder verunmöglichen. Gasreinigungssysteme, welche als sekundäre Massnahmen gegen das Teerproblem eingesetzt werden, sind technisch aufwendig und können bis heute die für den Motorenbetrieb ausreichende, konstante Gasqualität nicht zuverlässig gewährleisten [H23].

In folgender Tabelle (Tab. 15) sind die Vor- und Nachteile der Teerabscheidung zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
<p>+ meist vergleichsweise niedrige Investitionskosten, da konventionelle Bauteile eingesetzt werden können</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Abscheideleistung zum Teil nichtausreichend (Wasserwäschen, -quenchen), insbesondere für wirkungsgradoptimierte Aggregate - meist hohe Betriebskosten z.B. für Entsorgung oder bei Rückführung in den Prozess - hohe Störanfälligkeit oder hoher Aufwand - wenig Langzeiterfahrung - Kumulation von Ablagerungen auch bei kleinen Teergehalten, resp. guter Abscheideleistung - keine Nutzung des Energieinhaltes der Teere - letztlich nur eine Verlagerung des Problems

Tab. 15: Vor- und Nachteile der Teerabscheidung [H24]

4.3.2.4 Handlungsbedarf

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Teerabscheidung):

Ist eine Teerabscheidung erforderlich, so sind primäre Massnahmen, welche die weitere Teerbildung (Kondensation) verhindern, respektive vermindern am vorteilhaftesten, aber nicht hinreichend. Zusätzliche sekundäre Massnahmen zur Teerentfernung, respektive Kombinationen von primären und sekundären Massnahmen müssen daher für Holzgas spezifisch weiterentwickelt werden.

Die Prioritäten sind wie folgt zu setzen:

- kurzfristig: Kombination von einfacheren Verfahren in mehreren Stufen³⁰
- langfristig: Katalytische Verfahren, welche noch Probleme mit Spurengasen (H₂S) und beim Verbrauch (Betriebskosten, Entsorgung) haben. Das Ziel ist das Finden und/oder Herstellen von ultra selektiven Materialien, welche möglichst nur die geforderte Funktionalitäten erfüllen.

4.3.3 Partikelbehandlung

Partikel, respektive Feinstäube bestehend aus unvergastem Kohlenstoff, Asche und Bettmaterial, können besonders den Motorsubsystemen (Aufbau auf Turbolader, Ladeluftkühler etc.) schaden. Sie können auch aufgrund der motorischen Umwandlung zu unerlaubt hohen Emissionen im Abgas führen.

Die Korngrösse der Partikel bewegt sich zwischen 0.01 und 2 µm. Die meisten Partikelkorngrössen befinden sich in einem engeren Bereich zwischen 0.1 und 1 µm [H3b]. Alle diese Partikel sind lungengängig und somit besonders gesundheitsschädigend, da sie kleiner als 10 µm sind (PM10).

Im Brenngas von Festbettvergaser muss mit Partikelgehalten von mindestens 100 – 1'000 mg/Nm³ gerechnet werden. Wirbelschichtvergaser haben Werte über 10'000 mg/Nm³. Der Zielwert für die

³⁰ Totaler Abscheidegrad = 1-(1-Abscheidegrad)^{Anzahl Stufen} z.B. 3 Stufen à 60% ergibt: 93%=1-(1-0.60)³

motorische Verarbeitung ist 5 mg/Nm^3 . Somit sind Abscheidegrade von mehr als 95–99.5% zu erreichen.

Folgende Technologien und Systemkombinationen, welche vor allem für die Abgasnachbehandlung entwickelt wurden, werden heute eingesetzt:

1. Fliehkraftabscheider (Zyklon)
2. Elektrostatische Abscheider (Elektrofiltern)
3. Filternde Abscheider (Gewebe, Filz, Fliess, Keramisch, Sintermetall)
4. Waschsysteme (Scrubber)
5. Kondensation

Für Partikel aus der Vergasung sind prinzipiell 3 Behandlungsstufen möglich:

1. Abbauen (katalytisch)
2. Abscheidung und Umwandlung (filtern, waschen)
3. Motorische Verarbeitung (siehe Abschnitt Verstromung)

4.3.3.1 Partikelabbau mittels Katalysator

Durch katalytische Wirkungen kann der Partikelabbau beschleunigt werden. Katalysatoren, bestehen meist aus Edelmetallen oder Oxyden von Übergangsmetallen. Sie werden als Schichten auf Substraten oder als Additiv in den Brennstoff eingebracht.

Der Partikelabbau mittels Katalysator findet in der Regel im Zusammenhang mit einem Filter³¹ statt (siehe nachfolgender Abschnitt).

4.3.3.2 Partikelabscheidung mittels Filter

Das nachfolgende Diagramm (Abb. 7) zeigt für die verschiedenen Abscheideverfahren den theoretischen Abscheidegrad. Es ist zu erkennen, dass für eine Partikelgrösse von $< 1 \text{ }\mu\text{m}$ mit Zyklonen, Wäschern und Venturi nur eine ungenügende, respektive mit Elektrofiltern nur eine knapp genügende Abscheidung erreicht wird. **Faser- oder Sinterfilter** sind das bisher **effizienteste Verfahren zum Partikelabbau**.

³¹ Der Partikelfilter kann als Katalysatorträger dienen, da er funktionsbedingt eine sehr grosse Oberfläche hat (Oxidationskatalyse oder Entstickungskatalyse). Der Oxidationskatalysator verändert die Feststoffpartikelmasse und deren Verteilung praktisch nicht. Abgelagerter Russ wird in der Regel langsam katalytisch umgesetzt. In ungünstigen Fällen besteht die Gefahr einer Abdeckung der katalytischen Beschichtung, die damit für die Gasphase unwirksam wird (Deaktivierung) [Vs2].

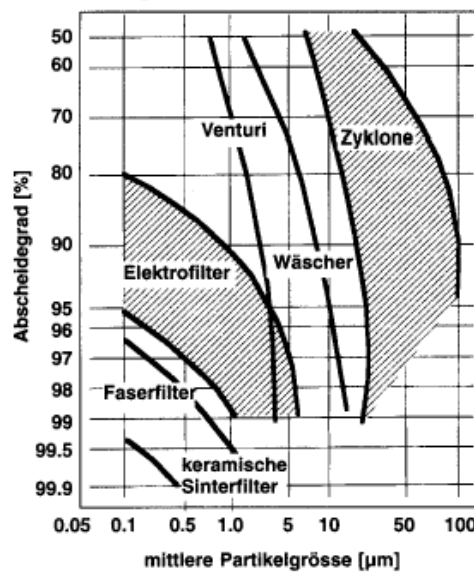


Abb. 7: Abscheideverfahren mit theoretischem Abscheidegrad

Im Anhang "Holzgas: Partikelfilter" sind die **Filtertypen**, die **Wirkungsweise** von Filtern und die zur Zeit bekannten **Filtermedien** umschrieben. Folgende Filtermedien sind in den kleineren Leistungsklassen³² bis 300 kW am ehesten mit vertretbarem apparativem Aufwand einsetzbar:

1. **Keramisch-monolithischen Zellenfilter** haben eine hohe Abscheiderate bei geringem Gegendruck, sind jedoch nicht sehr robust.
2. **Metall-Sinterfilter** sind schwer, aber viel robuster bei ebenfalls hoher Abscheiderate [20].

Besondere Aufmerksamkeit ist der **Regeneration**³³ der Filter sowohl aus betrieblicher Sicht als auch aus der Sicht der sogenannten Sekundäremissionen³⁴ zu widmen. Wie bei der Teerabscheidung entstehen auch bei der Partikelabscheidung zu entsorgende **Nebenprodukte** (Filterkuchen). Die Regeneration verbraucht Energie oder einen Stoff. Katalytische Substanzen (Beschichtungen, Treibstoff-Additive) können das Ablaufen des Regenerationsprozesses positiv beeinflussen. Folgende Partikelfiltersysteme werden unterschieden:

- a) Bei **passiven** Partikelfilter-Systemen erfolgt die Regeneration von selbst bei Erreichen bestimmter Betriebszustände.
- b) Bei **aktiven** Partikelfilter-Systemen wird durch einen Steuer- oder Regeleingriff zusätzliche Energie (eventuell auch Verbrennungssauerstoff) in das System eingeleitet. Die Wärmefreisetzung kann durch Brenner, elektrische Beheizung oder entsprechende Eingriffe bei der motorischen Verbrennung erfolgen. Solche Systeme bestehen aus **Partikelfilter** (Filterelement, Filtermedium), **Regenerationseinrichtung**, **Kontrolleinrichtung** zur Überwachung des Abscheidegrades und des Filtergedrucks.

³² Kompaktentstauber für RGR ab ca. 100 bis 450 kW mit **Gewebefiltration** (Schlauchfilter, kompakte Bauweise (ab ca. 3 m), Partikelabscheidung auf 20 mg/Nm³, [http://www.scheuch.com/start_scheuch.php?menu=5&seite=71&lg=1]

³³ Regeneration durch **Verbrennung des gespeicherten Russes**

Bei Temperaturen oberhalb 550°C können Filter rückstandsfrei gemacht werden. Es braucht aber zusätzliche **Systemhilfen**, wie Zusatzbrenner, elektrische Beheizung, zugegebene Reaktionsprodukte (Oxidantien, Katalysatoren).

³⁴ Partikelfilter können erhebliche Emissionen während der Regeneration erzeugen:

- C zu CO (Kohlenwasserstoffe in der Dampfphase verlassen den Filter)
- grosse Mengen von allenfalls verschmutztem Wasser (weisse Fahne)

- c) Als **automatisch** wird ein Partikelfilter-System bezeichnet, wenn keine Eingriffe durch den Maschinenführer erforderlich sind, das System sich selbst überwacht und regelt. [Au1]

Folgende **Regenerationssysteme**, welche unter anderem auch in der Nutzfahrzeugindustrie [Au1] aktiv weiterentwickelt werden, existieren:

- Vollstrombrenner
- Teilstrom-Brenner
- Elektrische Beheizung
- Regenerations-Additive
- Katalytische Beschichtung
- CRT-System (Continuous Regenerating Trap)
- Elektrische Stillstands-Regeneration (an Bord)
- Kombinierte Regenerationsverfahren
- Externe Regeneration (Wechselfilter)

Daneben sind **weitere Ideen** zur Regeneration in Entwicklung:

- Einsatz von Kaltplasma,
- Mikrowellen- Beheizung,
- Beheizung von elektrisch-leitfähigen Filtermaterialien durch direkten Stromdurchgang
- aerodynamisch rückgepulste Systeme (im Anlegebau)

Nebst oben genannten Filtern gibt es auch Verfahren wie die **Brenngasfilterung**, welche Partikel bei 1000°C aus dem Brenngas entfernen. Eine Integration, solcher Filter kurz nach dem Vergasungsprozess wäre daher denkbar. Diese Verfahren befindet sich noch im Entwicklungsstadium, deshalb sind noch keine verlässliche Daten verfügbar ([2], EU-Projekt J0U2-CT92-0184- V160Bio).

4.3.3.3 Zusammenfassung

Da bisher alle Vergasungsverfahren Staub und Partikel über ein motorverträgliches Mass hinaus produzieren, ist eine entsprechende Gasaufbereitung immer erforderlich. Für eine brauchbare Gasreinheit kommen praktisch nur Faser- und Sinterfilter in Frage. Über die Brenngasfilterung bei 1000°C sind noch keine verlässlichen Aussagen vorhanden.

Das Hauptaugenmerk ist auf die Regeneration des Filters zu legen. Robuste, vollautomatisch regenerierende Filter, mit vernachlässigbaren Sekundäremissionen, respektive 100% kontinuierliche Verfahren sind das Ziel.

Potenziale sind bei einer Holzgas spezifischen Entwicklung und Auslegung der Filter und Regenerationssysteme auszumachen. Durch die Integration der Regeneration (Energie aus Abgas, Wiedereinspeisung von Filterkuchen) in das Gesamtsystem ergäben sich neue Möglichkeiten. Synergien und Partner mit ähnlichen Zielen sind bei den Dieselpartikelfilterhersteller zu suchen.

Insgesamt bleibt die Partikelentfernung ein aufwendiges, anfälliges Unterfangen und ist das zweite Bottleneck, wenn das Teerproblem gelöst ist.

4.3.3.4 Handlungsbedarf

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Partikelentfernung):

Für eine genügend gute Partikelentfernung kommen praktisch nur keramische oder metallische Sinterfilter in Frage. Diese Technik ist prioritär weiterzuentwickeln. Gemeinsame Projekte mit ähnlich interessierten Partnern zur Erhöhung der Filterrobustheit, zur Vereinfachung der Regeneration und zur Verbilligung der Systeme sind anzustreben. Eine hohe Priorität hat die Entwicklung eines 100% kontinuierlichen Partikelfilterverfahrens.

4.3.4 Temperaturminderung (Kühlung)

Am Vergaseraustritt treten je nach Verfahren Temperaturen zwischen 200°C und 500°C auf. In nachfolgender Tabelle (Tab. 16) sind dazu einige typische Vergasungsreaktor-Austrittstemperaturen aufgelistet. Darunter befinden sich mögliche Motoreinlasstemperaturen. Technisch sind Motoreinlasstemperaturen um 120°C möglich. Betrieblich (Klopfen) und thermodynamisch (Füllgrad, Wirkungsgrad) sind jedoch nur Temperaturen unter 60°C sinnvoll.

Das heisst eine **Kühlung** des Gases ist für die motorische Verarbeitung **erforderlich**. Operiert das Filtersystem ebenfalls unter der Reaktorausstrittstemperatur wird die Kühlung vor dem Filtersystem angeordnet [H1]. In sogenannten Wäschern (Scrubber) lässt sich eine Kühlung mit einer partiellen Teer-, Partikel- und Schadstoffentfernung kombinieren. Dieses Verfahren kann in mehreren Stufen angewendet werden (3-fach Scrubber, Xylowatt), hat aber den Nachteil, dass das Gas 100% feucht ist. Mit einer weiteren Kühlung (Kondensation) und einer anschliessenden Erwärmung zum Beispiel mit der Verdichtung im Turbolader wird das Gas für den Motor wieder genügend trocken.

Die Volumen-, respektive Massenströme und Temperaturdifferenzen sind vom Prozess her vorgegeben. Diese bestimmen die Grösse der Kühler und damit die Investitionen. Bei den Kühlern kann kein spezifisches Entwicklungspotenzial ausgemacht werden. Kostensenkungen sind allenfalls durch eine optimierte Auslegung und den Einsatz standardisierter Aggregate erreichbar.

Vergasertyp	Reaktor-Austrittstemperatur [°C]
FB-Gegenstromvergaser	70-200
kombinierter FB-Gegenstrom-Gleichstrom-Holzvergaser	300
Doppelfeuer-Verfahren [H21]	400-460
Motoreinlass	Einlasstemperatur [°C]
Thermodynamisch gute Motoreinlass Temperaturen	10-30
Gebräuchliche Motoreinlass Temperaturen	50-60
Technisch möglich bisher noch nicht realisiert	120

Tab. 16: Vergasungsreaktor-Austrittstemperaturen und mögliche Motoreinlasstemperaturen

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Temperaturminderung):

Im Rahmen der Vergasung zeigt sich für die Kühlung allein kein prioritäres Entwicklungspotenzial.

4.3.5 Behandlung übriger Schadstoffe

Die Anteile an Schwefelverbindungen, Alkalimetallen, Schwermetallen, Stickstoff- und Halogenverbindungen im Holzgas können je nach zugeführtem Holz sehr unterschiedlich sein. Die Bereiche liegen von wenigen ppm bis 0.5w% bis 2w%, das heisst von 0.1 - 6000 mg/Nm³ (siehe Anhang: "Holzgas: Zusammensetzung und Eigenschaften").

Im Gegensatz zur Gasturbine, Brennstoffzelle und Methanolsynthese ertragen die Motoren alleine relativ viel Schadstoffe (500 mg/Nm³, [Vs3], siehe Anhang "Holzgas: Gasqualitätsanforderungen bei Gasmotoren vs Turbinen"). Ist hingegen ein Abgasnachbehandlungssystem mit **Katalysatoren** im

System, dann sollte die Summe der Schwermetallfracht **0.5 mg/Nm³** nicht übersteigen [H2, H22, H4]. Das heisst in diesen Fällen muss eine **Schadstoffentfernung** vorgenommen werden.

Die obigen Bestandteile müssen nicht notgedrungen nur negative Auswirkungen haben. Sie können durchaus auch katalytische Effekte, zum Beispiel bei der Teerumwandlung haben. Da ihr Vorkommen jedoch kaum steuerbar ist, überwiegen die negativen Aspekte.

Als Verfahren kommen vor allem Sandbettfilter, Rotations-Atomisierer und Wäscher in Frage (siehe Abschnitt "Realisierte Verfahrensschritte"). Die Systeme kommen meist aus dem Gebiet der Rauchgasreinigung und dienen je nach dem auch der Entfernung von Teer und Partikeln. Sie sind wenig spezifisch auf die Entfernung von Schadstoffen im Holzgas entwickelt. Hier liegt zugleich auch das grösste Potenzial.

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Schadstoffentfernung):

Die Entwicklung spezifischer Schadstoffentfernungsverfahren ist prioritär. Die genaue Abklärung wie viel Schadstoffe maximal bei der Vergasung entstehen und wie viel das jeweilige Motorsystem minimal erträgt ist dabei die erste zu lösende Aufgabe.

4.4 Verstromung und Emissionsnachbehandlung

Für die Verstromung des Holzgases werden Motoren aus der Diesel- und Ottomotortechnik eingesetzt. Bei beiden Technologien sind die Motoren auf die besonderen Bedingungen des Holzgases anzupassen. Da die Emissionsnachbehandlung zuweilen voll in die Motorsysteme integriert ist, werden diese zusammen mit dem Verbrennungsprozess behandelt.

In den beiden nachfolgenden Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 werden die jeweiligen Motorkonzepte beschrieben und die Bottlenecks abgeleitet. Die problematischen Holzgaseigenschaften, die Folgen für das Motorsystem und die rein motorischen Massnahmen sind im Kapitel 4.4.3 zusammengestellt. Im Kapitel 4.4.4 werden die Bottlenecks und Potenziale zusammengefasst und im Kapitel 4.4.5 der Handlungsbedarf mit Fokus auf die Verstromung und die Emissionsnachbehandlung aufgezeigt.

4.4.1 Motorsysteme mit Dieselmotortechnik

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 17) sind die Motorsysteme mit Dieselmotortechnik beschrieben. Im Speziellen sind diese, der in zahlreichen Anwendungen eingesetzte Zündstrahlmotor und der nur als potentielle Lösungsidee bestehende Dieselmotor mit Co-Combustion.

Motorkonzept	Zündstrahlmotor (ZM) ³⁵	Dieselmotor mit Co-Combustion (DM-CC)
Beschreibung	Dieselmotortechnik. Gezündet wird mittels eines Dieselstrahls. ca. 10% Diesel ist erforderlich.	Analog Zündstrahlmotor, Magerbetrieb, Einspritzen von 10-50% flüssigem Brennstoff (Diesel, Biodiesel)
Technik		
Entwicklungsstand	Zahlreiche Anwendungen mit Holzvergaser (State of the art)	Abzuklärende Idee für eine künftige Lösung, Anlehnung an die Fahrzeugmotorentechnik
Aufwand	Mässig, da keine speziellen Aggregate	Aufwendiges Einspritzsystem, tendenziell teures System
Wirkungsgrad ³⁶ %	30 (Saugmotor) - 40 ³⁷ (aufgeladen)	bis 42 (aufgeladen)
Zusätzliche Möglichkeiten	Lambda=1, TL, LLK, AGR	Analog Zündstrahlmotor, Einsatz von Biodiesel (ergab bisher Probleme mit dem Einspritzsystem)
Robustheit		
Betrieb	Robust, einfach	Robust und flexibel, reiner Dieselmotorbetrieb möglich
Heizwertschwankungen	unempfindlich und gut regelbar	
Teer /Partikel	ohne TL und LLK wenig empfindlich (sonst <100/50 mg/Nm ³)	
Schadstoffe	eher unempfindlich	

³⁵ Zündstrahlmotoren benötigen 7% bis 10% Heizöl und werden vollautomatisch betrieben. Der Einsatz dieser Motoren hat sich im Gegensatz zum Gasmotor bewährt, da sie eine höhere Betriebssicherheit bieten und einen Aus-gleich bei schwankenden Gasproduktionen ermöglichen.... Der elektrische Wirkungsgrad von Zündstrahlmotoren liegt bei 35% und derjenige von Gasmotoren bei 32%... anstatt des Diesels könnte auch reines Pflanzenöl als Zündöl verwendet werden.. siehe dazu auch Firmenverzeichnis Biogas BHKW, [B3, http://www.boxer99.de/ADRESSEN/biogas_bhkw.htm]

³⁶ **1% Wirkungsgradverbesserung** bei 150kWe und einer Verfügbarkeit von 8000h/a ergibt zusätzlich 12'000 kWh. Bei einem Einspeisetarif von 0.10 CHF/kWh sind dies **1'200.- CHF/a** zusätzliche Einnahmen.

³⁷ Zündstrahlaggregate der neuesten Generation (spezielle Kolbenmulden, höhere Verdichtung, spezielle Nockenwelle ohne Spülung) erreichen elektrische Wirkungsgrade von 37,5% beim 65 kW-Aggregat und 40% beim 100 kW-Aggregat (Firma Schnell aus Amtzell, [http://www.agrikomp.de/lang_de/biogastechnik/biogasanlagen.htm])

Rauchgas (LRV,[mg/Nm ³])			
NO _x (400) ³⁸	4000 (λ=1), 1000 (mager) 100-400 mit RGR	1150 (Diesel rein)	Abzuklären
CO (650)	1200-1800 200 mit OxyKat, 100 mit RGR		
Russ, Partikel ³⁹ , Staub ([H24] Σ10, 50 für ZM)	120 mit Zyklon, 10 mit RGR 3-5 mit RGR + Filter		
HC (kein Grenzwert) ⁴⁰	700-1000-60'000	200-500 (Diesel rein)	
SO ₂ (350)	KA		
Schadstoffe (Σ0.5)	0.1-10		
RGRreinigung	Aufwendiger als beim Ottomotor, Fahrzeugmotorentchnik		
RGR Möglichkeiten	RGR, Aktivkohlefilter, rotierende Partikelabscheider ⁴¹ , Zyklon ⁴² , CRT-Systeme ⁴³ , CSF [EN2], SCRT+Urea ⁴⁴ (verlangt 350°C),		

Tab. 17: Beschreibung des Zündstrahlmotors (ZM) und Dieselmotors (DM),
Abkürzungen: TL = Turbolader, LLK = Ladeluftkühler,
RGR = Rauchgasreinigung (Wäscher, Elektrofilter),
AGR = Abgasrückführung, KA = Keine Angaben

Die Bottlenecks der Motorsysteme mit Dieselmotorteknik sind:

- Der Zündstrahlmotor hat Emissionen über den Grenzwerten. Die erforderliche Rauchgasreinigung ist aufwendig und macht das Motorsystem wieder anfälliger auf Teer, Partikel und Schadstoffe.
- Der Dieselmotor mit Co-Combustion hat eine aufwendige Einspritztechnik. Je mehr Dieselmotortreibstoff eingesetzt wird, desto weniger ist das System CO₂-neutral.
- Die Motoren ohne Aufladung haben einen schlechten Wirkungsgrad. Mit der Aufladung und einem Ladeluftkühler steigt der Wirkungsgrad, aber auch die Empfindlichkeit gegenüber Teer und Partikel.

³⁸ However, there is some uncertainty about both the robustness of hot gas cleanup under the high tar and alkali environment of wood gas, and ammonia formation in the gasifier, with subsequent **conversion of ammonia to NOx** in the combustion [H11].

³⁹ Zusätzliche Partikel entstehen aus verbrannten Schmierölen. Die Anzahl neuentstandener Partikel beim Gasmotor ist etwa 100 mal kleiner als beim Dieselmotor.

⁴⁰ Siehe Anhang "Holzgas: Zündstrahlmotor"

⁴¹ rotierende Partikelabscheider – eine kostengünstige Technologie für die Abscheidung von feinen Flugaschen, [www.energytech.at/(de)/pdf/techportraitbio.pdf S24]

⁴² Wärmekraftkopplungsanlagen mit einer weitergehenden Abgasreinigung (ev. mit einem Multi-Zyklon), die insbesondere die Staubemissionen reduziert, haben in der Regel keine Probleme den Grenzwert für naturemade star einzuhalten [Gs5]

⁴³ CRT-Filterssysteme sind insbesondere hinsichtlich der Langzeitstabilität noch nicht genügend ausgereift [En4].

⁴⁴ Das SCRT-System + Urea ist eine Kombination eines Entstickungskatalysators mit einem CRT-System (Filter). Durch eine sehr magere Verbrennung werden die Partikel und durch die Oxidation mit Harnstoff die Stickoxidemissionen reduziert. Dieses System befindet sich derzeit in der Entwicklung und im Feldtest (En2,En3), siehe Anhang "Holzgas: Nachbehandlung: SCRT-Verfahren". Ein Experte meint, dass das Verfahren nur die Partikelmasse, nicht jedoch die Anzahl reduziert, d.h. es bleiben viele, kleine Partikel

4.4.2 Motorsysteme mit Ottomotortechnik

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 18) sind die Motorsysteme mit Ottomotortechnik beschrieben.

Motorkonzept	Saugmotor (OM)	Magermotor (MM)	Swissmotor (SM)
Beschreibung	Ottomotor (Zündung mit Zündkerzen)	Ottomotor im Magerbetrieb mit Turbolader	Ottomotor stöchiometrisch $\lambda=1$, 3-WegeKat, 2 kleinere LLK, TL, AGR
Technik			
Aufwand	Mässig, da keine speziellen Aggregate	Zusätzlich ein TL und allenfalls LLK	Aufwendige Motortechnik mit integrierter Abgasnachbehandlung
Wirkungsgrad %	32-34	36-37	38-41
Entwicklungsstand	P+D-Anlagen sind am laufen	Die aktuelle Entwicklung geht in diese Richtung.	Mit Erdgas gute Betriebserfahrung
Zusätzliche Möglichkeiten	(Weiterentwicklung zum Magermotor)	Ladeluftkühler, mehrfach Aufladung	Heisse Gaszuführung: 250, 120° incl. Luft
Robustheit			
Betrieb	Nicht mehr so robust und flexibel wie der Zündstrahlmotor		
Heizwertschwankungen			
Teer / Partikel	<100/50 mg/Nm ³	Empfindliche Nebenaggregate (<50/5 mg/Nm ³)	
Schadstoffe	eher unempfindlich	Mit OxyKat <0.5 mg/Nm ³	3-Wege-Kat ist noch empfindlicher
Rauchgas (LRV, [mg/Nm³])			
NO _x (400)	240 (Erdgas)		1 (Erdgas)
CO (650)	KA	1000	25 (Erdgas)
Russ, Partikel, Staub ([H24] Σ 10)	KA	KA	Abzu- klä- ren
HC (kein Grenzwert)	KA	1000 (Erdgas, Magerbetrieb ergibt kältere Abgase)	
SO ₂ (350)	KA	KA	
Schadstoffe (Σ 0.5)	0.1-10	0.1-10	
RGRreinigung	Aufwendig	Aufwendig	Aufwendig, integriert
RGR Möglichkeiten	Filter+OxyKat	Filter+OxyKat	

Tab. 18: Beschreibung des Saug- (OM), Mager-(MM) und Swiss-Motorkonzeptes (SM), Abkürzungen: TL = Turbolader, LLK = Ladeluftkühler, RGR = Rauchgasreinigung (Wäscher, Elektrofilter), AGR = Abgasrückführung, KA = Keine Angaben

Die Bottlenecks der Motorsysteme mit Ottomotortechnik sind:

- Der Motoren sind noch nicht vollständig an das Holzgas adaptiert. Gültige Rauchgaswerte sind daher kaum verfügbar.
- Der Saugmotor hat einen schlechten Wirkungsgrad. Wird zur Erreichung der Abgaslimiten (ausser CO) ein Filter und/oder OxyKat nachgeschaltet, ist er bezüglich Robustheit und Rauchgas mit dem Magermotor vergleichbar.
- Beim Saug- und Magermotor sind hohe CO und HC Emissionen aufgrund des Motorschlupfes immer zu erwarten.

- Beim Swissmotor machen vor allem die Nebenaggregate das Motorsysteme empfindlich. Die Anforderungen an die Gasqualität sind hoch, besonders da ein Katalysator im System integriert ist.

4.4.3 Grenzwerte und problematische Holzgaseigenschaften

Die motorischen Gasqualitätsanforderungen für den Motor alleine und in Kombination mit einem Katalysator sind in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 19) zusammengestellt. (siehe auch Anhang "Holzgas: Gasqualitätsanforderungen bei Gasmotoren vs Turbinen").

Holzgaskomponenten	Motorische Anforderungen	Mit Katalysator
Teer	<100 mg/Nm ³ (Ziel 50 mg/Nm ³)	z.Z. nicht spezifiziert
Partikel	<50 mg/Nm ³ (Ziel 5 mg/Nm ³)	z.Z. nicht spezifiziert
Stickstoff-, Schwefelverbindungen	<500 mg/Nm ³	Summe der Schadstoffkomponenten <0.5mg/Nm ³ [H4]
Schwermetalle (Zn, Pb, K mit Ca)	z.Z. nicht spezifiziert	
Halogen-Zwischenverbindungen	<100 mg/Nm ³	
Alkalimetalle	<50 mg/Nm ³	
Temperaturen	<40°C	
Feuchtigkeit	<100%, so trocken wie möglich	

Tab. 19: Holzgaskomponenten, motorische Anforderungen ohne und mit Katalysator

Die motorisch problematischen Holzgaseigenschaften sind in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 20) aufgelistet. Daneben sind die Folgen für das Motorsystem und die rein motorischen Massnahmen aufgezeigt.

Holzgas-eigenschaften	Folgen für das Motorsystem	Motorische Massnahmen
Teer ⁴⁵	<ul style="list-style-type: none"> + Der hohen Heizwert ist erwünscht [B1] - Teerkondensation führt zu: <ul style="list-style-type: none"> - Verklebung und Agglomeration (Turbolader, Kühler, Ventile, Brennraum) - Korrosion - Schmierölzerstörung - Deaktivierung des Katalysators - Erhöhte Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Teerkondensation durch hohe Einlasstemperaturen vermeiden (Taupunkt 250-300°C) • Innermotorische Verbrennung in einfachen, robusten Motoren ohne Zusatzaggregate • Abgasnachbehandlung (Nachverbrennung) • Revisionen

⁴⁵ Für den Einsatz in Motoren sind die Teere unerwünscht, da vor dem Motor eine Abkühlung des Gases erforderlich ist und die Teere durch Kondensation zu: Verklebung führen, Korrosion verursachen und Schmieröle angreifen [H3].

Partikel (Feinstäube) Nebenprodukte des Vergasers und der Gasaufbereitung wie Asche, Kondensat ev. Kohle und Abwasser [H1]	<ul style="list-style-type: none"> - Agglomeration auf Zusatzaggregaten (Turbolader, Kühler) - Veränderung im Motor - Gelangen ins Abgas (Emissionen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz einfacher, robuster Motoren ohne Zusatzaggregate • Verbesserung der Zusatzaggregate (TL, LLK mit Antihaft-Oberflächen) • Abgasnachbehandlung (Filter, Waschung) • Revisionen
CO⁴⁶	<ul style="list-style-type: none"> - Gelangen unverbrannt ins Abgas (Motorschlupf) - Neubildung aufgrund von O₂ Mangel in der Verbrennung - Massnahmen sind gegenläufig zu HC und NO_x Bildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Luftüberschuss ($\lambda > 1$, mager) • Oxidationskatalysator • Stöchiometrischer Betrieb mit 3-Wege Katalysator • Abgasrückführung
HC	<ul style="list-style-type: none"> - Gelangen unverbrannt ins Abgas (Motorschlupf, Emissionen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Analoge Massnahmen wie bei CO • Beim Einsatz von Katalysatoren sind hohe Abgastemperaturen für die Umwandlung erforderlich
Schwermetalle (Zn, Pb, K mit Ca)	<ul style="list-style-type: none"> - Gelangen über Aerosole und organische Verbindungen in die Abgase (Emissionen) - Deaktivieren bereits in kleinen Mengen Katalysatoren (glasige Beschichtung, Entfernung nicht möglich) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verzicht auf Katalysatoren • Abgasnachbehandlung (thermische Nachoxidation auf regenerativer Basis (CL.AIR, Jenbacher AG, wartungsfrei).
Stickstoff-, Schwefel-, Halogen-Zwischenverbindungen [H3]	<ul style="list-style-type: none"> - Zerstören alkalisches Schmieröl - Deaktivieren Katalysator - Korrosiver und abrasiver Verschleiß - Gelangen ins Abgas (Emissionen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verzicht auf Katalysatoren • Abgasnachbehandlung (Filter) • Revisionen
Alkalimetalle [H3] (Kalium, Natrium in Gasphase)	<ul style="list-style-type: none"> - Bisher sind keine Probleme bekannt 	
Geringe und variierende Anteile der brennbaren Stoffe (tiefer und variierender Heizwert [H3])	<ul style="list-style-type: none"> + Höhere Klopffestigkeit dank tiefem Heizwert - Grosse Volumen vergrössern die Aggregate - Variierende Emissionswerte 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz robuster Motoren • Aufladung, elektronische Gaseinblasseysteme • Zugabe zusätzlicher Brennstoffe • Regelung • Gezielte Auslegung
Hohe Temperaturen	<ul style="list-style-type: none"> - Schlechter Füllgrad und damit schlechter Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Ladeluftkühlung und Aufladung
Hohe Feuchtigkeit (>100%)	<ul style="list-style-type: none"> - Kondensation in den Zuleitungen und im Abgassystem (Korrosionsgefahr) 	<ul style="list-style-type: none"> • Trocknung über die Aufladung

Tab. 20: Holzgaseigenschaften, Folgen für das Motorsystem und motorische Massnahmen

Folgende Bottlenecks für die Verstromung und Emissionsnachbehandlung ergeben sich aus den in obiger Tabelle (Tab. 20) aufgelisteten Holzgaseigenschaften:

⁴⁶ Der CO-Grenzwert von 650 mg/Nm³ der TA Luft ist nicht erreichbar, da prinzipiell jeder Ottomotor einen kleinen Anteil an unverbranntem Gas emittiert. Verursacht wird dieser Effekt durch die an der Brennraumwand verlöschende (quenschende) Flamme. Die Größenordnung dieses Anteiles bewegt sich je nach dem eingestellten Lambda und dem Anteil an von der Flamme nicht erreichbaren Spalten (Schadräumen) im Bereich von 1 bis 2% ~ 10'000-20'000 mg/Nm³ [Vs3].

- Teer ist der problematischste Holzgasanteil, da er sowohl auf den Motor als auch auf dessen Nebenaggregate eine stark schädigende Wirkung hat.
- Partikel schädigen besonders die Nebenaggregate zur Nachbehandlung und bewirken schlechte Emissionswerte.
- CO und HC sind motorisch unproblematisch sind aber im Abgas zu vermeiden, auch wenn für HC heute noch kein Grenzwert besteht.
- Die übrigen Schadstoffe verhindern einen ungestörten Katalysatoreinsatz (Deaktivierung), verursachen in Kombination mit Feuchtigkeit Korrosion und zerstören die Schmieröle. Bei grossen Schadstoffanteilen ist auf den Einsatz von Katalysatoren allenfalls zu verzichten.
- Der geringe und variierende Heizwert stört den kontinuierlichen Motorbetrieb und hohe Gastemperaturen verschlechtern den Wirkungsgrad, respektive die Leistungsdichte.

4.4.4 Entwicklungspotenziale (Verstromung, Emissionsnachbehandlung)

Folgende Entwicklungspotenziale ergeben sich aus obigen Tabellen (Tab. 17-Tab. 20) für die Verstromung und Emissionsnachbehandlung.

Generelle Potenziale:

- Zur motorischen Verarbeitung von Teer und Partikel liegt das grösste Potenzial bei einfachen, robusten Motoren ohne Zusatzaggregate. In der heissen Gaszuführung ($>120^{\circ}\text{C}$) zur Verminderung der Teerentstehung wird ein weiteres Potenzial erwartet.
- Das Potenzial von Motoren zur besseren Verarbeitung von Schadstoffen liegt besonders in der Verbesserung der Schmieröle und der Korrosionsbeständigkeit.
- Das Potenzial zur Verbesserung des Wirkungsgrades, respektive der Leistungsdichte und der Emissionen liegt bei der Aufladung mit Ladeluftkühlung, bei der Abgasrückführung und einer verbesserten Regelung. Weitere Entwicklungspotenziale liegen bei elektronischen Gaseinblassystemen, elektronischen Ventilsteuerung, kontinuierlichen Gasanalyse (Flex-Fuel-Sensor) und bei der professionellen, spezifischen Auslegung (Tool).
- Zur Minderung von CO, HC sowie NO_x im Abgas haben Systeme mit Katalysatoren das grösste Potenzial. Die spezifische Verbesserung der Katalysatoren⁴⁷ (robustere, selektivere Materialien) hat ein hohes Potenzial.
- Für die Senkung der Emissionen haben vor allem Technologien, welche in das Motorsystem integriert und spezifisch optimiert sind, ein hohes Potenzial (z.B. Swissmotor mit 3WegeKat und AGR).

Spezifische Potenziale der Motorsysteme mit Dieselmotortechnik:

- Das Potenzial des Zündstrahlmotors liegt in der Einfachheit und Robustheit. Für den Einsatz mit Holzgas ist er noch weiter optimierbar. Die TA-Luft begünstigt zur Zeit den Zündstrahlmotor.
- Beim Dieselmotor mit Co-Combustion eröffnet die flexible Zugabe von Diesel das Potenzial für einen robusten, kontinuierlichen Betrieb trotz schwankender Brennstoffqualität und unsicherer

⁴⁷ Transition Metal Carbides as an Environmental Nanocatalyst, S. Ismat Shah, University of Delaware www.nano.gov/GC_ENV_EPA2002_Proc_03-0204.pdf, The goal of this research project is to investigate synthesis, characterization, and application of nanoparticles of transition metal carbides and oxycarbides as replacements for the Pt-group metals (expensive, not available). Tungsten carbide (WC 1-x) is possible.

Brennstoffverfügbarkeit. Die Systeme (u.a. Einspritzpumpe) sind für den Einsatz von flüssigen, biogenen Brennstoffen (Biodiesel, CO₂-neutral) optimierbar.

- Die holzgasspezifische Weiterentwicklung und Integration der Abgasreinigungssysteme (u.a. SCRT+Urea) ermöglicht einen robusten und schadstoffarmen Betrieb.
- Ein hohes Potenzial für die Dieselmotortechnik liegt darin, dass von den Errungenschaften und dem grossen Markt der Fahrzeugtechnik profitiert werden kann.

Spezifische Potenziale der Motorsysteme mit Ottomotortechnik:

- Die Weiterentwicklung des Saugmotors ist der aufgeladene Magermotor. Das Entwicklungspotenzial liegt in der Adaptation der Systeme auf Holzgas. Die TA-Luft und die LRV begünstigen zur Zeit den Magermotor.
- Der Swissmotor hat einen hohen Wirkungsgrad. Aufgrund der Erfahrungen mit Erdgas sind Abgaswerte weit unter den gesetzlichen Limiten zu erwarten (besonders auch für CO und HC). In der Adaptation der Technologie an Holzgas liegt ein hohes Potenzial.

4.4.5 Handlungsbedarf

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Verstromung und Emissionsnachbehandlung):

Die Adaptation des Swissmotors für Holzgas hat die oberste Priorität, denn Wirkungsgrad und Emissionen sind sehr gut und die Empfindlichkeit entspricht derjenigen anderer Systeme, wenn eine ähnliche Performance erreicht werden soll. Die spezifische Weiterentwicklung der Nebenaggregate, insbesondere der Turbolader und der Katalysatoren hat Vorrang.

Der aufgeladene Magermotor ist der von den Gesetzgebern unterstützte und von den Firmen eingeschlagene Weg. Die Weiterentwicklung ist zu beobachten. Handlungsbedarf besteht bei Entwicklungen, die auch für das Swissmotorkonzept von Nutzen sind (Nebenaggregate).

Das Konzept Dieselmotor mit Co-Combustion scheint vielversprechend zu sein. In einem ersten Schritt ist hierfür eine Machbarkeitsstudie durchzuführen, welche die tatsächlichen technischen Möglichkeiten klärt.

Die Zündstrahltechnik erzeugt hohe Emissionen. Längerfristig sind aufwendige Nachbehandlungssysteme, welche das Motorsystem empfindlich machen, erforderlich. Falls die Dieselmotortechnik favorisiert würde, könnte sie als Übergangstechnologie von Nutzen sein. Aktuell besteht aber kein Handlungsbedarf für eine Weiterentwicklung.

4.5 Gesamtsysteme

4.5.1 Prozessvarianten

Im Abschnitt "Analyseumfang: Gesamtheitlicher Ansatz – Prozessorientierung" sind 3 prinzipielle Gesamtprozessvarianten postuliert. Davon ausgehend sind in nachstehender Tabelle (Tab. 21) verschiedene Systemvarianten skizziert. Die Bottlenecks und Potenziale sind nachfolgend aufgeführt.

Variante	1a	1b	2a	2b	2c	2d	3
Herstellung	FB (Gegenstrom)				FB (Gleichstrom)		Mehrstufig
Aufbereitung	Kühlung Gute Teer + (Partikel)- entfernung (Schadstoffreinigung)		Kühlung Teer + Partikelentfernung Schadstoffreinigung				Kühlung Partikelentfernung Schadstoffreinigung
Verstromung	Zündstrahl	Diesel Co-C.	Saugmotor	Magermotor TL		Swissmotor, TL, LLK AGR, 3WegeKat	
Nachbehandlung	DPF, Gaswaschung OxiKat, SCRT+Urea		Filter, OxiKat				

Tab. 21: Die Gesamtprozessvarianten der Holzgasverstromung

Variante 1: **Aufwendige Gasbehandlung vor und/oder nach einem robusten Motor**

Das Bottleneck ist die längerfristig zu erwartenden Verschärfung der Gesetzgebung. Dadurch sind diese Systeme mit einer aufwendigen Nachbehandlung zu ergänzen. Wie robust diese sein wird und welche Massnahmen bei der Aufbereitung dadurch erforderlich werden ist unklar.

Das Potenzial dieser Varianten liegt in ihrer Robustheit. Speziell Variante 1b könnte hier neue Perspektiven eröffnen.

Variante 2: **Verbesserte Gasherstellung, Motor der bedingt Schadstoffe erträgt**

Die Varianten 2a, 2b, 2c und 2d sind Mischvarianten. **Fett** gedruckt ist die Variante 2c, welche von der **Industrie als Entwicklungsziel verfolgt** wird.

Das Bottleneck dieser Varianten ist in erster Linie der Teer. Längerfristig sind aber wie bei Variante 1, Folgeprobleme aufgrund einer aufwendigen Nachbehandlung zu erwarten.

Das Potenzial liegt in der Möglichkeit einer stufenweisen Adaptation der Einzelsysteme an das Holzgas.

Variante 3: **Hochentwickelte Gasherstellung (teerlos), hochentwickelte Verstromung mit integrierter Nachbehandlung**

Das Bottleneck dieser Variante ist die schädigende Wirkung der Schadstoffe auf die Motornebenaggregate.

Das Potenzial dieser Variante liegt in der Integration der Partikel und Schadstoffbehandlung, wie dies bei der Teerbehandlung und der Abgasnachbehandlung schon geschehen ist. Ein weiteres Potenzial liegt in der Integration zu einem kompakten Gesamtsystem (Druckvergasung).

4.5.2 Handlungsbedarf Gesamtsystem - Vergasung

Handlungsbedarf (mit Fokus auf das Gesamtsystem - Vergasung):

Teer bildet für alle Motoren das Hauptproblem. Die Teerabscheidung bedeutet einen erheblichen apparativen und energetischen Aufwand. Die Abscheideraten sind höchstens knapp genügend. Daher ist die Entwicklung von Vergasungsverfahren zur Herstellung eines teerfreien oder zumindest extrem teearmen ($<10 \text{ mg/Nm}^3$) Gases prioritär.

Der Betrieb der Nebenaggregate, insbesondere der Katalysatoren, Turbolader und Ladeluftkühler, wird durch Schadstoffe und Partikel stark beeinträchtigt. Diese Aggregate werden längerfristig bei allen Verstromungssystemen eingesetzt. Da die Entstehung dieser Stoffe nicht verhindert werden kann, sind Massnahmen zur Entfernung am wichtigsten. Die Integration dieser Massnahmen in das Vergasungssystem oder eine Kombination mit dem Kühler ist anzustreben. Sekundär sind Massnahmen, welche die Nebenaggregate robuster machen (selektive Katalysatoren, Antihafbeschichtungen).

Die Entwicklung von integrierten, kompakten Gesamtsystemen hat ein hohes Potenzial und ist in gemeinsamen Projekten anzugehen. Welche Motorsysteme dabei eingesetzt werden, ist vorerst nicht entscheidend. Ein hohes Potenzial dafür hat sicher der Swissmotor und allenfalls der Dieselmotor mit Co-Combustion.

4.6 Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und die Teilsysteme

In Tabelle (Tab. 22) wird der Handlungsbedarf mit Fokus auf das Gesamtsystem dem Handlungsbedarf mit Fokus auf die Teilsysteme gegenübergestellt. Die Nummerierung entspricht der Priorität. Fett gedruckt sind vergleichbare Punkte des jeweiligen Handlungsbedarfes.

Teilsysteme	Handlungsbedarf Fokus Teilsysteme	Handlungsbedarf Fokus Gesamtsysteme
Vergasung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Optimierung und Automatisierung von Gleichstrom Festbettvergasern 2. Entwicklung spezifischer Katalysatoren zur Verbesserung der Vergasungsreaktionen 3. Vergasungsmittel verändern 4. Kombinierte Gegenstrom-Gleichstrom-Holzvergaser weiterentwickeln 5. Mehrstufige Verfahren beobachten 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einsatz von Vergasungsverfahren mit teerfreiem Gas
Teer- abscheidung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kombination von einfacheren Verfahren in mehreren Stufen 2. Katalytische Verfahren weiterentwickeln 	
Partikel- entfernung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verbesserung der keramischen oder metallischen Sinterfilter (Filterrobustheit, Regeneration, Verbilligung) 2. 100% kontinuierliche Partikelfilterverfahren entwickeln 	<ol style="list-style-type: none"> 2. Verbesserung der Massnahmen zur Entfernung 3. Integration in das Vergasungssystem 4. Kombination mit dem Kühler 6. Nebenaggregate robuster machen
Temperatur- minderung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kein spezifischer Handlungsbedarf 	
Schadstoff- entfernung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spezifische Schadstoffentfernung 2. Abklärung der Schadstoffwerte 	
Verstromung, Emissions- nachbe- handlung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adaptation des Swissmotors für Holzgas 2. Spezifische Weiterentwicklung der Nebenaggregate (Turbolader, Katalysatoren) 3. Aufgeladener Magermotor beobachten 4. Machbarkeitsstudie Dieselmotor mit Co-Combustion 5. Zündstrahltechnik kein Handlungsbedarf 	<ol style="list-style-type: none"> 5. Entwicklung integrierter, kompakter Gesamtsysteme in gemeinsamen Projekten Priorität der Motorsysteme: <ol style="list-style-type: none"> a. Swissmotor b. Allenfalls Dieselmotor mit Co-Combustion c. andere

Tab. 22: Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und des Handlungsbedarfes für die Teilsysteme bei der Vergasung

Der Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und für die Teilsysteme in obiger Tabelle (Tab. 22) zeigt Unterschiede bezüglich der Priorität bei der Vergasung und Teerabscheidung (Optimierung Gleichstrom Festbettvergaser vs. Teerfreie Systeme) sowie bei der Verstromung (Adaptation des Swissmotors vs. integriertes Gesamtsystem). Der Handlungsbedarf bei der Partikel- und Schadstoffentfernung sowie der Temperaturminderung sind vergleichbar (Holzgasspezifische Verbesserung). Beim Gesamtsystem besteht zusätzlich ein Bedarf zur Integration und Kombination der Verfahrensschritte.

Folgende Thesen lassen sich daraus ableiten:

1. Vollintegriertes Gesamtsystem

Ein hohes Potenzial für ein wirtschaftliches Gesamtsystem liegt in der prozesstechnischen und apparativen Integration der Teilsysteme. Als Möglichkeit sei genannt: Allotherme, mehrstufige Druckvergasung mit Druckerzeugung mittels Abgasturbolader. Neben den Einzelnvorteilen können sich neue Möglichkeiten eröffnen. Dies erfordert für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben eine übergreifende Denkweise und Koordination.

2. Aufbau eines optimalen Gesamtsystems

Mehrstufige Vergasungsverfahren zeigen ein hohes Potenzial für die Herstellung von "sauberem", d.h. motorisch einfacher verarbeitbarem (Teer freiem/armem) Gas. Sie sind aufwendiger als einstufige Verfahren, jedoch unter anderem brennstoffunempfindlicher und besser beherrschbar. Durch die zusätzliche Stufe vereinfacht sich insgesamt das System, da sich eine Teerabbaustufe und Massnahmen am Motor erübrigen. Für eine optimale Gastemperatur vor dem Motor ist eine Kühlung erforderlich. Diese Kühlung ist brennstoffspezifisch mit einem Wascher und/oder Filter zur Entfernung von weiteren Schadstoffen und Partikeln zu kombinieren. Es resultiert eine gute Gasqualität und entsprechend können empfindlichere, respektive sauberere Motorsysteme mit Katalysatoren eingesetzt werden. Die heutigen Abgaslimiten (TA-Luft, LRV) könnten mit einem solchen System weit unterschritten werden.

3. Optimierung der Teilsysteme

Einstufige Vergasungsverfahren sind apparativ einfacher und kostengünstiger als mehrstufige. Der Entwicklungs- und Erfahrungsstand ist hoch. Freie Potenziale zeigen sich bei der Optimierung des Vergasungsprozesses (Teer- und Staubgehalt minimieren, Betriebsverhalten optimieren) und bei einer auf den Brennstoff und die Motoranforderungen hin optimierten Gasaufbereitung (u.a. eine zuverlässige Teerentfernung). Für solche Anlagen ist der Trend aufgeladene Magermotoren (ohne Katalysator) zu adaptieren. Die Abgasemissionen erfüllen die heutigen gesetzlichen Limiten (TA-Luft, LRV). Werden die Normen verschärft, werden aufwendige Anpassungen bei der Gasaufbereitung und Abgasnachbehandlung erforderlich.

5 Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergärung (Klär-, Biogas)

5.1 Zusammenfassung der Analyse - Verstromung von Gas aus der Vergärung

Die nachfolgende Liste ist eine Zusammenfassung der Analyse der Verstromung von Gas aus der Vergärung von Gülle, biologischen Abfällen, Klärschlamm etc.. Detaillierte Angaben finden sich in den anschliessenden Kapiteln.

- Die Anzahl Anlagen auf dem Gebiet der landwirtschaftlichen Nassvergärung und die daraus resultierende Erfahrung ist grösser als beim Holzgas. Deshalb können mehr Aussagen über die Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und die Probleme bei der Nassvergärung gemacht werden. Besonders kleine Anlagen (<100 kW) sind kaum wirtschaftlich zu betreiben. Hauptgründe dafür sind: Mangelnde Effizienz, unzureichende Nutzung der anfallenden Wärme, unzureichende Verfügbarkeit, zu grosser Aufwand für die Vor- und Nachbereitung der Biomasse und zu energiearmes Substrat.
- Hauptbottleneck ist der hohe Schwefelwasserstoffanteil (H_2S), welcher die motorische Verarbeitung stark beeinträchtigt (Schmieröl, Katalysator, etc.). H_2S ist bei der Methanherstellung unvermeidbar. Für die Entschwefelung stehen eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Chemisch-physikalische Verfahren haben den Vorteil, dass sie eine relativ hohe Gasreinheit liefern, sie sind aber betriebskostenintensiv. Die günstigeren, biologischen Verfahren haben den Nachteil, dass keine zuverlässige Reinheit garantierbar ist. Das grösste Potenzial haben kombinierte Verfahren in Verbindung mit Vergärungsverfahren (z.B. Trockenvergärung), welche ein H_2S -armes Gas produzieren.
- Ein weiteres Bottleneck sind die Si-Verbindungen und andere Schadstoffe, wie sie im Holzgas auch vorkommen können. Diese lagern sich auf den empfindlichen Motorteilen (Ventile) und in den Nebenaggregaten ab, oder deaktivieren die Katalysatoren. Der Handlungsbedarf liegt hier in der Optimierung der vorhandenen Verfahren, allenfalls in Kombination mit den H_2S -Entfernungsverfahren, welche z.T. auch zur Entfernung dieser Stoffe, sowie zur Kühlung des Gases dienen können.

Ein hohes Potenzial hat die Entwicklung eines wartungsarmen, spezifischen, daher allenfalls modularen Aufbereitungssystems (Feststoffentfernung, Entschwefelung, Schadstoffentfernung (Si, andere), Kühlung), mit welchem ein für den Katalysatoreinsatz genügend hohe und konstante Gasreinheit mit konstantem Methangehalt (Speicher) Gas resultiert.

- Bei den Motoren muss längerfristig wie beim Holzgas der Fokus auf die saubersten und effizientesten Motoren gelegt werden. Das Konzept Dieselmotor mit Co-Combustion hat aufgrund der guten Verarbeitung, der grossen Schwankungen in der Biogasmenge und dem Methangehalt ein noch höheres Potenzial als beim Holzgas.

Der Vergleich des Handlungsbedarfes mit Fokus auf das Gesamt-, respektive auf die Teilsysteme ergibt Unterschiede bezüglich der Priorität bei der Gasherstellung:

- Grosse Anlagen: Feststellen der optimalen Fermentertechnik vs H_2S -arme und effiziente Verfahren
- Kleine Anlagen: Optimierung und Standardisierung der Gasherstellanlage vs verbesserte Auslegung und optimierter Betrieb der Gesamtanlage.

Bei der Gasaufbereitung ist bei beiden Betrachtungsweisen die zuverlässige Erzeugung eines "sauberen" Gases prioritär. Der Grund dafür ist letztlich die Empfindlichkeit aller Motoren und das längerfristige Erfordernis einen Katalysator betreiben zu können.

5.2 Gasherstellung

Bei der Verstromung von Biogas⁴⁸ wird das Gas durch Vergärung hergestellt. Unter Vergärung versteht man den Abbau von biogenem Material (fest, flüssig) durch Mikroorganismen in Abwesenheit von Sauerstoff (anaerob). Mehrere Bakteriengruppen verwandeln biogenes Material, mit Ausnahme von Holz (Lignin), in Methan (2/3) und Kohlendioxid (1/3) sowie Restgase.

Biogenes Material liesse sich auch kompostieren (aerob). Die Energie-, respektive Ökobilanz der Vergärung ist aber besser, da im Gegensatz zur Kompostierung⁴⁹ keine Überschussenergie in Form von Wärme frei wird. Zudem besitzt der resultierende Anaerobekompost nach einer, zwei bis dreiwöchigen Nachrotte eine ähnliche Qualität⁵⁰, wie Kompost der rein aerob entstanden ist.

Anders als bei der Vergasung gibt es vor allem auf dem Gebiet der landwirtschaftlichen Nassvergärung viele Anlagen⁵¹ und daher auch mehr Erfahrungen. Im Anhang "Biogas: Herstellung" befindet sich eine Liste der "Anlagen in Betrieb" und der Schweizer "Firmen im Biogassektor" [B18]. Für neuere, allenfalls wirtschaftlichere Verfahren, wie die diskontinuierliche Trockenvergärung und Co-Vergärung, fehlen heute noch Detailangaben.

5.2.1 Aufbereitung und Vorbehandlung

Vor der eigentlichen Gasherstellung ist bei der Vergärung in der Regel eine Auf- und Vorbereitung des Substrates erforderlich. Folgende Aufbereitungsschritte können erforderlich sein (siehe Anhang "Biogas: Verfahrensablauf" 1. Prozessstufe, "Biogas: Herstellung: Aufbereitung"):

1. Entfernung von Störstoffen (manuell, teil- oder vollautomatisiert mit Magnetabscheider, Schwerstoffschleusen, Trommelsiebe, Rechen, etc.)
2. Zerkleinerung, Zerkleinerung (Korngrösse <10 mm Kantenlänge, mit z.B. Schneckenmühlen)
3. Hygienisierung (z. B. Schlachtabfälle, Speisereste. Aufheizung der Substrate auf eine Temperatur von 70°C für mindestens eine Stunde unter ständiger Durchmischung.)

Verfahrenstechnisch muss auf die Hygienisierung besonders geachtet werden, da sie bis zu 20% des inneren Energieaufwandes ausmachen kann. Die erforderliche Wärme kann allenfalls dem Heißwasser aus dem Kühlkreis des Blockheizkraftwerkes entnommen werden und die Restwärme sollte zum Aufheizen des frischen Substrats verwendet werden. Die Hygienisierung kann je nach dem auch in Form einer Nachbehandlung der Produkte bzw. eine aerobe Nachrotte der separierten Gärprodukte durchgeführt werden.

4. Anmischung (in Pulvern werden Substrate mit teilweise vorgewärmten Prozesswasser gemischt und somit pumpfähig gemacht)
5. Bei sehr wässrigen Substraten (Klärschlamm) ist eine Trennung von Substrat und Wasser für eine effiziente Vergärung erforderlich. Die Untersuchung und Anwendung verschiedener Filtrationsverfahren (Membranverfahren zu Ultrafiltration) ist Gegenstand der aktuellen Forschung ([B33], siehe Abschnitt "Klassifizierung und Beurteilung: Neuere Entwicklungen").

⁴⁸ biogenes Gas aus dem Vergärungsprozess

⁴⁹ Theoretisch aerob, praktisch nur unter Einsatz von zusätzlicher Energie

⁵⁰ Nachkompostierung (Stabilisierung) dient unter anderem zum Abbau von pflanzenhemmenden Substanzen. Anaerobekompost hat etwas niedrigere Salz- und Nährstoffgehalte. Er hat eine stark unterschiedliche Stickstoffdynamik, dessen Ursache aber noch unklar ist. In der Regel ist Anaerobekompost im Garten- und Landschaftsbau vielseitig einsetzbar. [B22]

⁵¹ Mittlerweile sind in Deutschland über 1.500 Biogasanlagen in Betrieb [B12].

5.2.2 Prozessschritte bei der Gasherstellung mittels Vergärung

Der Prozess der Vergärung läuft in einem geschlossenen Behälter, einem sogenannten Fermenter oder Gärbehälter unter kontrollierten Bedingungen ab (siehe Anhang "Biogas: Herstellung: Prozessschritte" [17, B30]). Die Prozessschritte sind:

- | | | |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 1. Hydrolyse | Aufspaltung der Makromoleküle | hydrolytische Bakterien |
| 2. Versäuerung | Vergärung der Spaltprodukte | fermentative Bakterien |
| 3. Essigsäurebildung | Bildung von methanogenen Substraten | aceagene Bakterien |
| 4. Methanbildung | Biogasbildung | methanogene Bakterien |

Der Prozess der Methanbildung aus Biomasse ist **umfassend wissenschaftlich erforscht** worden und weitgehend aufgeklärt. Forschungsarbeiten in jüngster Zeit befassen sich vorwiegend mit Verfahrenstechnik, **Verfahrensoptimierung**- sowie mit Mess- und Steuerungstechnik.

5.2.3 Prozess-Parameter

Der Vergärungsprozess ist geeignet für die Aufbereitung von organischen (biogenen) Abfällen:

- Flüssig (Abwässer aus Industrie und Gewerbe, Klärschlamm, Gülle)
- Fest (Festmist, Gülle mit Co-Vergärung von häuslichen Abfällen wie Gemüse, Schlachtnebenprodukte, usw.)

Im Anhang "Biogas: Herstellung: Grundstoffe und Leistungsbereiche" ist eine Auswahl geeigneter Substrate und deren Biogasausbeute gegeben. Die Biogasausbeute schwankt von 0.2 (Gülle) -1.4 (Fett) m³/kg oTS (organisches Trockensubstrat).

5.2.3.1 Eigenschaften der Betriebsstoffe

In Hinblick auf einen ungestörten und effizienten Vergärungsprozess, sind bei der Substratauswahl folgende Einflussgrößen zu berücksichtigen [17]:

1. Zusammensetzung und Substratgemisch

Die organischen Substanzen (Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße) sind der Lebensraum und die Nährstoffquelle für die Bakterienstämme. Je nach Anteil am Gärsubstrat wird die Biogasbildung und –zusammensetzung beeinflusst.

2. C/N-Verhältnis

Das Kohlenstoff zu Stickstoff-Verhältnis beeinflusst die Abbauleistung der Mikroorganismen. Stickstoff im Überfluss hemmt jegliche Bakterientätigkeit.

3. Hemmstoffe

Folgende Stoffe hemmen, wirken toxisch und bringen je nach Konzentration den Prozess sogar zum Erliegen (siehe Anhang "Biogas: Zusammensetzung, Eigenschaften"):

- Antibiotika, Therapeutika, Desinfektionsmittel (überdosierte Mengen) und organische Ringverbindungen (AOX, PCB usw.)
- Schwermetalle wie Kupfer, Chrom, Zink, Cadmium
- Ammonium-Verbindungen (NH₄⁺ ist die Stickstoffversorgung, in sehr hohen Konzentrationen, aber toxisch)

5.2.3.2 Eigenschaften des Vergasungsprozesses

Der Gas-, respektive Methanertrag, aber auch Aspekte der Hygiene, Schadstofffracht, Abbaubarkeit bzw. Aufschliessbarkeit, sowie Düngewert der Gärreste werden durch die nachfolgenden prozess-,

respektive anlagenspezifischen Faktoren beeinflusst. Die meisten dieser Faktoren spiegeln sich in messtechnisch erfassbaren Parametern wieder, die sich bis zu einem gewissen Grad verfahrens- oder bautechnisch justieren lassen.

Prozessspezifische Einflussfaktoren

1. Gärtemperatur

Je höher die Temperatur, um so höher die Anfälligkeit der Bakterien gegenüber Temperaturschwankungen (siehe pH-Wert). Das Temperaturmilieu muss der Qualität der Substrate bzw. des Substratgemisches angepasst werden.

- a) Psychrophile Bakterien unter 20°C
- b) Mesophile Bakterien zwischen 25 und 43°C, höhere Prozessstabilität
- c) Thermophile Bakterien zwischen 45 und 55°C, höhere Prozessgeschwindigkeit, gut, falls fettreich, hygienisierend, höhere Ausbeute

2. Verweilzeit (hydraulisch)

= Aufenthaltsdauer des Substrats im Fermenter. Sie beeinflusst den Abbaugrad und somit die Biogasproduktion und hängt von den eingesetzten Substraten und den Temperaturmilieus (Abbaugeschwindigkeit) ab.

- a) Stärke, Zucker, Eiweiß, Fett 15 bis 20 Tage
- b) Hemizellulose über 30 Tage

Wie das nachfolgende Diagramm (Abb. 8) zeigt ist die Ausbeute nicht proportional der Verweilzeit.

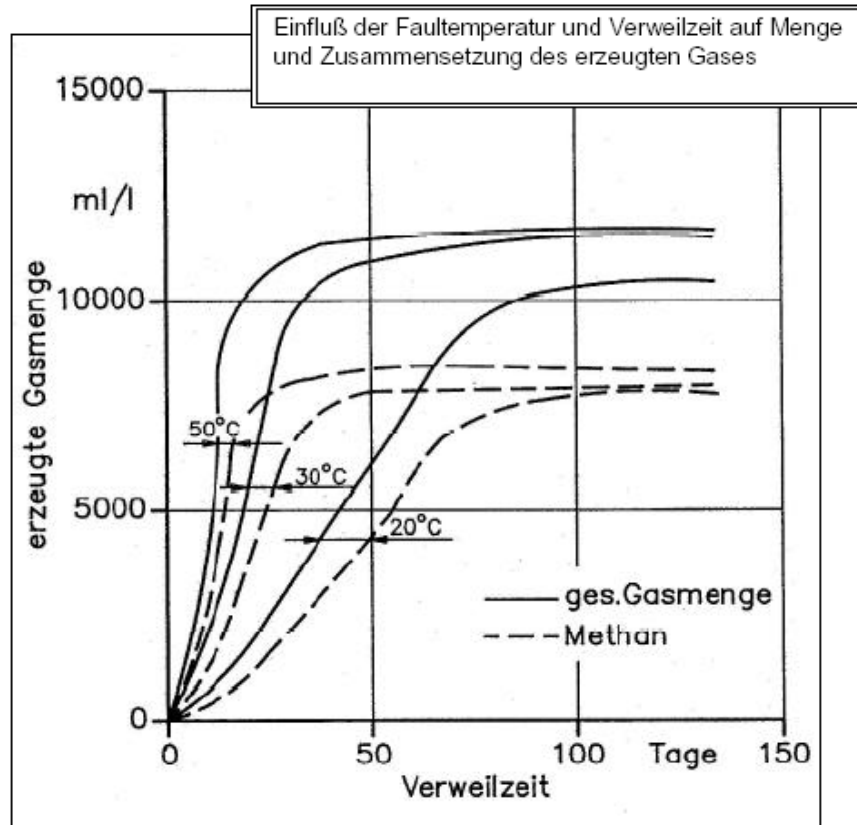


Abb. 8: Einfluss der Faultemperatur und Verweilzeit auf Menge und Zusammensetzung des erzeugten Gases [B31]

3. Konzentration der Trockensubstanz (TS) und organischer Trockensubstanz (oTS)

Je höher die Konzentration, desto

- höher die Biogasausbeute und die spezifische Raumbelastung
- kleiner das erforderliche Fermentervolumen und der Abbaugrad.

Für die Pumpfähigkeit bei der Flüssigvergärung ist die TS-Konzentration auf <15 % begrenzt.

4. Raumbelastung

= Masse für die organische Trockensubstanz (oTS), die pro Tag und m³ Fermentervolumen dem Gärprozess zugeführt wird. Mehrstufige Verfahren verkraften höhere Raumbelastungsgrade. Zu hohe Werte vermindern die Methanbildung und führen letztlich zum Übersäuern und somit zum "Umkippen" des Fermenterprozesses. Entleerung mit Betriebsstillstand ist die Folge.

5. pH-Wert

- a) Hydrolyse (Versäuerung) bei 5,2 bis 6,3.
- b) Methangärung bei 7 bis 7,5.

Gülle als Basissubstrat hat ein hohes Puffervermögen. Der pH-Wert stellt sich von selbst ein. Bei Bioabfall und industriellen Reststoffen ist oft das Zudosieren von z. B. Laugen erforderlich. Zudem kann sich bei höheren Temperaturen das Ammoniak/Ammonium-Gleichgewicht spürbar verschieben.

6. Durchmischung

Eine homogene Konzentration der Ausgangsstoffe, Zwischen- und Endprodukte, respektive Nährstoffe und Temperaturgefälle verhindert Sinkschichten und Schwimmdecken, vergrößert das aktive Fermentervolumen und damit letztlich die Ausbeute.

Anlagenspezifische Einflussfaktoren

1. Dimensionierung und Bauform

Mehrstufige Prozesse ermöglichen eine bessere Prozessüberwachung und –steuerung mit unterschiedlichen Temperaturbereichen und optimalen Milieubedingungen.

2. Milieubedingungen

Diese beinhalten: Ausschluss von Luftsauerstoff, kompletter Lichtabschluss, optimale Einstellung der prozessspezifischen Einflussfaktoren (siehe oben) und die Zuführung von Reaktionsmaterial.

3. Aufbereitung

Dies bedeutet: Schaffen einer großen Stoffoberfläche (Vorzerkleinerung) und bei der Flüssigvergärung, herstellen eines wässrigen Milieus (>50%, meist 85% wegen Pumpfähigkeit). Der Energieaufwand dafür ist zu optimieren.

5.2.4 Klassifizierung und Beurteilung der Vergärungsverfahren

In der folgenden Tabelle (Tab. 23) sind die wichtigsten Merkmale zur Unterscheidung der Gärverfahren aufgelistet (siehe auch Anhang "Biogas: Herstellung: Unterscheidung der Gärverfahren").

Kriterium	Unterscheidungsmerkmale
Art und Herkunft der Substrate ⁵²	<ul style="list-style-type: none"> Landwirtschaftliche Mono- und Co-Vergärungsanlagen Bioabfallvergärungsanlagen
TS-Gehalt der Substrate	<ul style="list-style-type: none"> Nassvergärung (TS bis 15%) Trockenvergärung (TS 15 bis 35%)
Prozesstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> psychrophil (kleiner 20°C) mesophil (25 bis 43°C) thermophil (kleiner 55°C)
Beschickungsintervall	<ul style="list-style-type: none"> diskontinuierlich semi- bzw. quasikontinuierlich
Prozessführung (siehe Anhang "Biogas: Herstellung: Prozessschritte")	<ul style="list-style-type: none"> Einstufig – Alle Abbaustufen gleichzeitig Zweistufig – Abtrennung der Hydrolyse Mehrstufig – Abtrennung von Hydrolyse und Säurebildung
Mischprinzip	<ul style="list-style-type: none"> Mechanisch – Propellerrührwerke Hydraulisch – Pumpen Pneumatisch – Gaseinblasung, Gasdruck

Tab. 23: Merkmale zur Unterscheidung der Gärverfahren

Die Vergärungsverfahren lassen sich wie im nachfolgenden Schema (Abb. 9) nach Prozessparameter, verfahrenstechnischen Ansätzen und baulichen Merkmalen klassifizieren. Anzufügen ist, dass aufgrund neuester Ergebnisse auch bei der Trockenvergärung zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren unterschieden werden muss [B22].

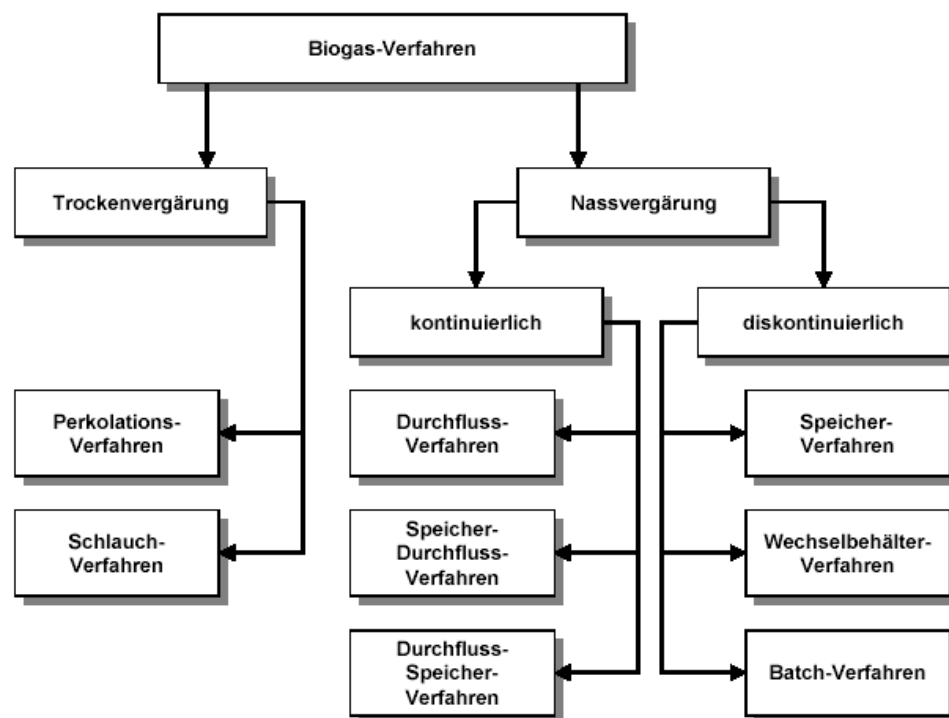


Abb. 9: Klassifizierung der Vergärungsverfahren nach Prozessparameter, verfahrenstechnischer Ansätze und baulichen Merkmalen [17]

⁵² Während sich in der Landwirtschaft eine spürbare Standardisierung von Anlagentechnik bemerkbar macht, existieren bei Bioabfallvergärungsanlagen mehrere Systemansätze die jedoch auf einem grundsätzlichen Verfahren (z. B. Nass- oder Trockenvergärung) basieren. Unterschiede in der Ausführung resultieren meist aus den Gegebenheiten vor Ort (z. B. Substratzusammensetzung), die meist eine komplexe Technik erforderlich machen. [17]

5.2.4.1 Trockenvergärung

Die Trockenvergärung oder Feststoff-Vergärung wurde bisher bei der Vergärung von gewerblichen und kommunalen Bioabfällen angewendet. Dabei wurde vor allem das Perkolationsverfahren, mit Berieselung und das Schlauch- oder Gärkanalverfahren eingesetzt (siehe Anhang "Biogas: Herstellung: Kontinuierliche Trockenvergärungsverfahren").

Viele landwirtschaftliche Stoffe, wie z.B. gemähtes Gras, Festmist und Silage, haben aber einen hohen Trockenrückstand. Wenn sie nicht stark verdünnt werden (Co-Fermentation mit Gülle, Nassvergärung), sind sie nicht pumpfähig (<15% TS) und somit nur für die Trockenvergärung geeignet. Vor allem in der Schweiz sind in den letzten Jahren die Forschungsanstrengungen für die Feststoff-Vergärung (Vergärung stapelbarer Biomasse) intensiviert worden. Die Anzahl Anlagen und damit auch Erfahrung ist aber geringer als bei der Nassvergärung.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Verwertung von energetisch bisher ungenutzten organischen Substraten mit hohem Struktur- und / oder Trockensubstratgehalt (TS 25-45%) + Keine Anmaische, geringe Vorzerkleinerung + niedrigerer Prozessenergieverbrauch, da Pump- und Rühraufwand wegfällt (<15% der gewonnenen Energie) + Schaum- und Schichtenbildung sowie Störstoffproblematik sind weitgehend ausgeschlossen • Faulzeit von 14-28 Tage 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenige Referenzanlagen – höheres Investitionsrisiko - Energieverluste durch anaerobe Vorrote - Höhere Anforderungen an Sicherheitstechnik (Rückspülung mit Motorabgasen)

Tab. 24: Allgemeine Vor- und Nachteile der Trockenvergärung

5.2.4.1.1 Kontinuierliche Trockenvergärung

Eine Übersicht über die kontinuierlichen Verfahren (Pilotanlagen) der Trockenvergärung ist im Anhang "Biogas: Herstellung: Kontinuierliche Trockenvergärungsverfahren" zusammengestellt [B22].

Vorteile	Nachteile (gegen diskontinuierlich)
<ul style="list-style-type: none"> + kontinuierlicher Betrieb + für grössere Anlagen (Kompogas) 	<ul style="list-style-type: none"> - komplexe Anlagentechnik mit hohen Investitionskosten (kontinuierliche Beschickung und Stoffaustrag bei gleichzeitiger Anaerobie) - zu teuer für die landwirtschaftliche Anwendung (Rührwerke, Fermenter auf starke Belastung ausgelegt).

Tab. 25: Vor- und Nachteile der kontinuierlichen Trockenvergärung

5.2.4.1.2 Diskontinuierliche Trockenvergärung

Bei diesen Verfahren verbleibt das Substrat für die ganze wirtschaftliche Verweilzeit im Fermenter. Befeuchtung und Impfung mit Bakterien erfolgt von oben mit der Perkolationsanlage. Es kann zusätzlich Wärme eingetragen werden. Wenige Tage vor Abschluss des Gärprozesses wird die Perkolation abgeschaltet, um das mit Methanbakterien angereicherte Wasser in der Wanne unter dem Boden des Fermenters zu sammeln. Gemäss

neuern Versuchen kann die Biomasse auch ohne Perkolation vergoren werden. Dies bedingt aber eine intensive Vormischung von Frischsubstanz zu Impfsbstanz im Verhältnis 1:1.

Für eine kontinuierliche Gasproduktion werden Batch-Verfahren mit phasenverschobenem Betrieb mehrerer Fermenter angewendet. Insgesamt befindet sich die diskontinuierlichen Verfahren noch im Stadium der Pilotanlagen.

Vorteile ⁵³ (gegen Nassverfahren)	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Einfache, kompakte, stabile Bauweise + Mobil (Fermenter nicht ortsgebunden) + Wartungsarme, robuste Technik (kaum bewegte Teile (kein Rühren), niedriger Verschleiß) + flexible Erweiterbarkeit der Fermenter durch modulare Ausbaukonzepte + Feste, stapelbare Biomasse kann unbegrenzt methanisiert werden + Hohe Gaserträge (100 m³/t Wiesengras 180 m³/t teigreife Maissilage, wie Nassverfahren für Bioabfälle) + sehr gute Gasqualität (CH₄-Gehalt ca. 70 - 80 %, H₂S-Gehalt ca. 20 ppm = 28.4 mg/m³) + Geringe Anfälligkeit gegenüber Störstoffen (z.B. Folien, Hölzer, Sand). + Kein aufwändiges Lagern des vergorenen Substrats + Geringer Wasserverbrauch • Verwendung von vorhandenen Geräten zur Befüllung und Entleerung 	<ul style="list-style-type: none"> - Gaszusammensetzung und -menge nicht konstant (Batchverfahren) • Im Entwicklungsstadium, geringe Betriebserfahrung

Tab. 26: Vor- und Nachteile der diskontinuierlichen Trockenvergärung

5.2.4.2 Nassvergärung

Die Nassvergärungsverfahren werden vor allem beim Vorhandensein des Basissubstrats Gülle eingesetzt. Daher wird dieses Verfahren in den konventionellen Biogasanlagen⁵⁴ in der Landwirtschaft am häufigsten angewendet (kontinuierlich: Durchflussverfahren, diskontinuierlich: Speicheranlage ,siehe Anhang: "Biogas: Herstellung: Nassvergärungsverfahren").

Da die Konzentration der Feststoffe im Reaktor meist im Bereich von 6 bis 10% Trockenrückstand liegt, kann durch Zugabe von Feststoffen (Co-Fermentate, Bioabfall, aber auch Gras) eine etwas höhere Konzentration und damit Gasausbeute erreicht werden. Die Pump- und Rührfähigkeit muss aber erhalten bleiben (TS-Gehalt <15%). Bei der Vergärung von Bioabfällen, wie in gewerblichen bzw. kommunalen Biogasanlagen üblich, muss deshalb das Substrat vorher angemaischt werden (Befeuchtung).

⁵³ siehe auch www.bekon-d.de/Bekon-EnergyTec/Trockenfermentation-Titel.htm, BEKON - Verfahren zur Biogaserzeugung durch Trockenfermentation von Biomasse

⁵⁴ Bei landwirtschaftlichen Biogas-Anlagen haben sich drei Arten durchgesetzt [B32]:

- Ballon-Anlage (niedrige Kosten, leichter Transport, hohe Faulraumtemperaturen, unkomplizierte Reinigung, Entleerung und Wartung, kurze Lebensdauer von fünf Jahren, hohe Empfindlichkeit gegen Beschädigungen)
- Festdom-Anlage (Geringe Baukosten, keine beweglichen Teile, Lebensdauer von über zwanzig Jahren, Schutz gegen tiefe Wintertemperaturen, platzsparend, stark schwankende Gasqualität, oft sehr hoher Gasdruck, niedrige Faulraumtemperatur, nicht erkennbare Beschädigungen)
- Schwimmglocken-Anlage (häufig eingesetzt, einfache Bedienung, gleichmäßiger Gasdruck, hohen Baukosten, rostanfällige Stahlteile, Lebensdauer 15 Jahre).

5.2.4.2.1 *Kontinuierliche Nassvergärung*

a. Durchfluss-Verfahren

Kennzeichnend für dieses Verfahren ist der Aufbau der Anlage mit einem kleinen Vorbehälter, einem ständig gefüllten beheizten Faulbehälter und einem Lagerbehälter für das ausgefaulte Substrat.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + gleichmäßige Gasproduktion + gute Faulraumauslastung + Befüllung ist automatisierbar und kostengünstig + kompakte Bauweise + niedrige Wärmeverluste 	<ul style="list-style-type: none"> - Vermischung durch das Rührwerk beeinträchtigt die Hygienisierung

Tab. 27: Vor- und Nachteile der Durchfluss-Verfahren

b. Durchfluss-Speicher-Verfahren

Diese Anlagen bestehen aus einem Vorbehälter, einem ständig gefüllten beheizten Faulbehälter bzw. Durchflussbehälter, der mit einer Folienhaube oder einer festen Decke verschlossen ist und einem Lagerbehälter. Der Faulbehälter wird täglich mit gleichmäßigen Substratladungen beschickt und durch ein Überlaufsystem entleert.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + hoher technischer Entwicklungsstand, viele Anwendungen + gute Gasausbeute (auffangen des restlichen Biogases durch den nachgeschalteten geschlossenen Behälter für das ausgefaulte Substrat) + gute Faulraumauslastung. + Minimale Stickstoffverluste durch den geschlossenen Lagerbehälter. 	<ul style="list-style-type: none"> - rel. Hoher Prozessenergiebedarf 30-45%

Tab. 28: Vor- und Nachteile der Durchfluss-Speicher-Verfahren

5.2.4.2.2 *Diskontinuierliche Nassvergärung*

Analog wie bei der Trockenvergärung wird bei der diskontinuierlichen Nassvergärung das Substrat nicht regelmäßig zugeführt. Die Behälter werden mit Substrat gefüllt und verschlossen, so dass die organische Masse ausfault. Nach der Vergärung werden die Behälter entleert und erneut befüllt.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + viele Anlagen, üblich in Landwirtschaft + relativ sicher, z.T. kostengünstig (häufig stehender Speicherreaktor, vertikales Rührwerk) 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Prozessenergieaufwandes (bei entsprechenden Isolierungskosten) - unregelmäßigen Gaserzeugung (Speicher-Verfahren) - Gaszusammensetzung und -menge nicht konstant (Batchverfahren) - grosser Aufwand (stehende Betonbehälter) - Faulzeit von 30-40 Tage

Tab. 29: Allgemeine Vor- und Nachteile der diskontinuierlichen Nassvergärung

a. Batch-Verfahren

Diese Anlagen bestehen aus Vor-, Faul- und Lagerbehälter in jeweils gleicher Größe. Das besondere dieses Verfahrens ist, dass der Faulbehälter auf einmal gefüllt wird. Die Gärsubstrate faulen ohne Zugaben oder Entnahmen bis zum Ende der Gärzeit. Nach der Vergärung wird der Fermenter bis auf einen geringen Satz entleert, der zur neuen Animpfung der nächsten Ladung dient. Beim Animpfen werden die frischen Substrate mit den bereits vergorenen Restsubstraten vermischt, so dass die vorhandenen Bakterien weiterhin genutzt werden können.

Vorteile	Nachteile
+ Keine hygienische Verunreinigung, da keine Vermischung von Alt- und Frischsubstraten	- Ungleichmäßige Gasproduktion - Überwiegend für Laborversuchen - Für die Praxis zu teuer und zu aufwendig (zwei Behälter, lagerungsbedingte Stickstoff- und Methanverluste).

Tab. 30: Vor- und Nachteile der Batch-Verfahren

b. Wechselbehälter-Verfahren

Diese Anlagen bestehen aus einem kleinen Vorbehälter, zwei beheizten Faulbehältern und einem Lagerbehälter für das ausgefaulte Substrat. Ein Faulbehälter wird aus der Vorgrube gespeist, während der andere ausfault. Nach Ende des Gärprozesses wird der Faulbehälter komplett in den Lagerbehälter entleert und anschließend wieder mit Substraten aus dem Vorbehälter gefüllt.

Vorteile	Nachteile
+ gleichmäßige Gasproduktion + Keine hygienische Verunreinigung, da keine Vermischung von Alt- und Frischsubstraten • Anwendung besonders in den 50er Jahren	- hohen Baukosten

Tab. 31: Vor- und Nachteile der Wechselbehälter-Verfahren

c. Speicher-Verfahren

Faul- und Lagerbehälter bilden bei diesem Verfahren eine Einheit. Wie beim Batch-Verfahren wird der Faulbehälter einmalig gefüllt und nach Abschluss der Vergärung bis auf einen Rest entleert. Die Wiederbefüllung erfolgt durch einen Vorbehälter.

Vorteile	Nachteile
+ Häufigste Anwendung in Landwirtschaft (kleine Biogasanlagen) + Einfache Umfunktionierung von vorhandenen, offenen Güllebehälter	- höhere Wärmeverluste - nicht für grössere Anlagen

Tab. 32: Vor- und Nachteile der Speicher-Verfahren

5.2.4.3 Stand der Technik

Für die Realisierung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (Gülle mit Co-Fermenten) wird heute das kontinuierlich arbeitende Durchfluss-Speicher-Verfahren (nass) im mesophilen Temperaturbereich, mit einer Verweildauer der Gärsubstrate von 35 bis 40 Tagen (relativ hohe Gasausbeute bei hoher Prozessstabilität und mässig hoher Temperatur 30°C) und folgenden Komponenten gewählt [B32]:

- Vorgube aus Stahlbeton mit einem Tauchmotor-Rührwerk
- Liegender Fermenter mit Pfropfenstrom-System aus Stahlbeton, integrierter Wärmedämmung, Heizsysteme, Tauchmotor-Propellerrührwerk und Verdrängerpumpe
- Niederdruckspeicher mit Folienhaube
- Endlager aus Stahlbeton.

In kommunale Feststoffvergärungsanlagen für Gras, Festmist und Silage werden heute kontinuierliche Trockenvergärungsverfahren eingesetzt (in der CH Kompogas-Verfahren).

5.2.4.4 Neuere Entwicklungen

a. Dänische Fermentertechnik

In Deutschland kann eine Tendenz zum Bau größerer Biogaseinheiten erkannt werden. Dazu wird oftmals, aus Unkenntnis der optimalen Verfahrenstechnik, die bewährte Technik für kleinere und mittlere landwirtschaftliche Betriebe nur in größerer Dimension gebaut. Dänische Betriebe besitzen eine größere Erfahrung mit großen und zentral gelegenen Einheiten. Für größere Anlageneinheiten (Durchsatz: $>20'000 \text{ m}^3/\text{a}$, $>100 \text{ kWe}$) ist daher die weiter entwickelte dänische Anlagen- und Fermentertechnik zu prüfen. (siehe Anhang "Biogas: Herstellung: Nassvergärungsverfahren", [17, B23])

b. Membranreaktoren (kontinuierliche Nassvergärung)

Bei tiefen Konzentrationen von organischen Inhaltstoffen in einem Substrat (Abwasser, dünne Gülle) arbeiten die Bakterien nicht mehr wirkungsvoll. Die Aufkonzentration von Substrat und Bakterienstämmen kann Abhilfe schaffen. Mittels eines Filters am Reaktorausgang werden unvergorenes Substrat und Bakterien zurückgehalten, respektive in den Reaktor rezirkliert. Nur ultrafiltrierte Flüssigkeit verlässt zur Weiterverarbeitung (Amoniakstripper, Umkehrosmose) den Reaktor. Zielgruppe für diese Technologie sind im ersten Schritt die lebensmittelverarbeitende Industrie und Fleischproduktionsbetriebe in der Landwirtschaft ([B33, B34] www.bioscan.dk, siehe Anhang "Biogas: Herstellung: BIOREK-Verfahren").

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Gleichzeitig Hygienisierung + Grössere Ausbeute + Faulzeit von 4-6 Tage (BIOREK-Verfahren), daher höherer Anlagenumsatz, wirtschaftlicher + Vielfältiger Einsatz der Membranen und daher Preisrückgang (92/99 --> 400/100 USD/m²) • Energieverbrauch tendenziell sinkend besonders Niederdruck und Niedrigenergieverfahren (weniger unproduktives Wasser, Gegendruck des Filters) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig Erfahrung bezüglich <ul style="list-style-type: none"> - Der integrierten Anwendung von Membranprozessen - Der Langzeitstabilität der Membranen - Dem Betrieb von Membranreaktoren • Im Entwicklungsstadium • Wirtschaftlichkeit noch ungeklärt

Tab. 33: Vor- und Nachteile der Membranreaktoren

5.2.5 Gaszusammensetzung und Qualität

Biogas ist mit einem Heizwert von $H_u = 23 \text{ [MJ/m}^3]$, wie Erdgas $36 \text{ [MJ/m}^3]$, ein sogenanntes Starkgas. Es besteht aus brennbarem Methan CH_4 63% und unbrennbaren CO_2 33% sowie $\text{N}_2 < 4\%$. Die **Feuchtigkeit** des Biogases nach dem Reaktor beträgt **100%**.

Da die Methan-Herstellung eine reduzierende Umgebung verlangt, ist normalerweise Schwefel vorhanden. Die Entstehung von Schwefelwasserstoff H_2S ist somit kaum vermeidbar. Es können

Mengen um 0.1-2 g/m³ vorhanden sein. Des Weiteren ist auch mit Schwefelverbindungen **SO_x** zu rechnen.

Im Anhang: "Biogas: Zusammensetzung, Eigenschaften" sind die typischen Werte für den **Heizwert** H_u und **die Gasanteile** von aufbereitetem, nicht aufbereitetem Biogas und vergleichsweise von Erdgas aufgelistet. Ebenfalls aufgelistet sind die Konzentration ausgewählter Schadstoffe in den zu vergärenden Abfällen und Gärprodukten.

Da in den Substraten in zunehmendem Masse Schadstoffe vorhanden sind, muss je nach Verfahren auch in Spuren im Biogas damit gerechnet werden. Zu nennen sind neben chlorierten KW's besonders die leichtflüchtigen **Si-Verbindungen** (Siloxane, Silane), welche aufgrund des Einsatzes von z. B. Trägerölen für Kosmetika, Schäumbremsen bei Wasch- und Reinigungsmitteln, Imprägniermittel für Baustoffe, Auto- und Lederpflegeprodukten, Hydraulik- und Transformatorenölen entstehen.

Die Gastemperatur von 35°C-60°C ist für das Aufbereitungsanlage unproblematisch. Je nach Aufbereitung wird das Gas auch automatisch bei der Gaswäsche gekühlt. Kühles Gas ist in jedem Fall für den Motor thermodynamisch besser (bessere Füllung, resp. Wirkungsgrad). Problematisch kann die durch Kondensation und H₂S verursachte Korrosion sein.

Noch problematischer als beim Holzgas sind die innerhalb von Minuten stark **schwankenden Methangehalte (30%)**, wenn z.B. der Nachgärer oder der Hauptfermenter abgeschaltet wird.

5.2.6 Nebenprodukte (zu entsorgen)

Als Nebenprodukt aus dem Vergärungsprozess resultiert Anaeroberkompost, welcher nach einer Nachrotte wie aerober Kompost entsorgt werden kann. Für die Fremd- oder Schadstoffbelastung gilt auch hier die Bioabfallverordnung.

5.2.7 Bottlenecks und Potenziale

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 34) sind die Bottlenecks der Vergärung zusammengestellt. Daneben sind die Entwicklungspotenziale aufgelistet.

Bottlenecks der Vergärung	Entwicklungspotenzial
<p>Schlechter Gasausbeute</p> <p>Ca. 2-3 mal zu geringe Effizienz (156-210 m³/Tag für ca. 75 kWe, statt 420 m³/Tag, Ziel 300-600 m³/Tag [B25])</p>	<p>Folgende Verfahrensverbesserungen oder neuen Verfahren haben ein Potenzial zur Verbesserung der Gasausbeute:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Co-Vergärung (sofern Co-Fermentate billig zu erhalten sind) • Trockenvergärung (für Praxistauglichkeit sind technische Entwicklungsarbeiten auf Pilotmassstabebene erforderlich [B18, 18]) • Diskontinuierlich (auch als Zusatzmodul für eine bereits bestehende konventionelle Biogasanlage) • Kontinuierlich - Gärkanalsystem (sehr betriebssicher) • Membranreaktoren (in Kombination mit der Hygienisierung und Nachbehandlung) • Optimierung der Gasgewinnung inkl. Nachrotte (25% der Gesamtausbeute⁵⁵) • Für landwirtschaftliche Anlagen Übernahme der dänischen Fermentertechnik

⁵⁵ ThermDes® von Archea (www.archea.de), der Nachrotte vorgeschaltetes Zusatzverfahren, welches die Ausbeute erhöht und zudem eine Hygienisierung bewirkt.

up-scaling	Verfügbarkeit und Übertragung von Daten verbessern, Pilotanlagen
<p>Bottleneck bei der Co-Vergärung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit der Co-Fermentate • Fehlender Dialog der verschiedenen involvierten Parteien behindert wird [B20] • Einbringen von Stör-, Schad- und Nährstoffen in den Landwirtschaftlichenkreislauf • Für kleine Betriebe kaum lohnend 	<ul style="list-style-type: none"> • Abklären und Verbesserung der Verfügbarkeit, Standorte (Herstellung, genügend Entsorgungsfläche) • Kommunikation der Möglichkeiten und Vorteile • Abklären der Auswirkungen auf den Landwirtschaftskreislauf und Möglichkeiten zur Einhaltung der Bioabfallverordnungen • Entwicklungspotenzial für Fermenter >100 m³ , Jahresdurchsatz von >1'200 Tonnen
<p>Betrieblich:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beschickung: mit unterschiedlichen Betriebsstoffen (Gülle einfach, Stroh und Mist schwieriger) • Schwimmdeckenbildung • Anfahr- und Stopvorgang (bes. bei diskontinuierlichen Prozessen) • Gas-, resp. Geruchsemissionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexiblere Verfahrens- und Anlagenkonzepte, Standardisierung • Rührtechnik verbessern, Rührintervalle erhöhen • Verfahrens- und Anlagenoptimierung u.a. mit Mess- und Steuerungstechnik (verfahrens- oder bautechnisch justierbare Parameter) • Mehrstufige Prozesse für eine gute Prozessüberwachung und -steuerung
Hygienisierung	Verbesserung der Hygienisierung durch gezielte Vorhygienisierung mittels Erhitzung oder einer thermophilen Betriebsweise über 3 Wochen., Membranverfahren
Gasqualität (Schwankung in Menge und Methangehalt, Schadstoffe)	Optimierung der Verfahren (kontinuierliche, Batch-Verfahren), Ausgleich im Speicher
Kompostqualität	Nachkompostierung verbessern (senken von Schadstoffgehalt, erhöhen von Rottegrad), Verfahrenstechnisch einbinden
Lebensdauer der Anlagen 5 (Ballon-Anlage)-15 (Schwimmglocken-Anlage) Jahre	Qualitätsverbesserungen der Anlageteile

Tab. 34: Bottlenecks und Entwicklungspotenziale bei der Vergasung

5.2.8 Handlungsbedarf

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Vergärung):

Es besteht erheblicher Forschungsbedarf zur Feststellung optimaler Fermentertechniken für grosstechnische Anlagen (u.a. Gasproduktionsraten in Funktion der Verweilzeiten, Durchmischungs- und Wärmeeintragstechnik, mehr praxisrelevante Daten [11]). Die Potenziale der Trockenvergärung und der Membranraktoren (BIOREK-Verfahren) sind detaillierter auszuarbeiten.

Bei den kleineren landwirtschaftlichen Anlagen ist eine Konzentration auf die verfügbaren Substrate und Co-Fermentate mit entsprechender Optimierung und Standardisierung (Verbilligung) der Fermenteranlage und der Anlagenteile vorrangig.

Zweitrangig sind die Verbesserung der Hygienisierung, der Kompostqualität und der Lebensdauer.

5.3 Gasaufbereitung

Eine motorische Verarbeitung von Biogas wird vor allem beeinträchtigt durch:

1. H_2S ($0.1-1-2\text{g/m}^3$) und Schwefelverbindungen SO_x
2. Si-Verbindungen (Siloxane, Silane), Schadstoffe
3. Schaum und Partikel
4. Feuchtigkeit
5. Schwankende Biogasanfall, respektive Methangehalt

Auch bei unempfindlichen Motoren (Zündstrahlmotor) ist eine möglichst **gute Entschwefelung** und **Trocknung** des Gases **immer erforderlich**. Die Wartungsintervalle und Lebensdauer des Motors sind stark abhängig davon. Bei kleinen Anlagen ist dies eine zusätzlich kritische wirtschaftliche Belastung.

5.3.1 Entschwefelung

Für die Entschwefelung stehen folgende Verfahren zur Verfügung [B34]:

1. Chemisch-Physikalische Verfahren
 - a. Fällungsverfahren (direkte Zugabe von Eisensalz)

Direkt im Fermenter wird Eisenchlorid (Fe_2Cl_3) oder seltener Eisensulfat zugesetzt, um H_2S als Sulfid auszufällen.
 - b. Absorption (Lauge, Aminen, anorg. Salze)

Zum Beispiel: ENTEC-Sulfurex® Entschwefelung durch Laugenwaschung hat sich bewährt (www.biogas.at/PDF/A4_entec_Sulfurex_deu.pdf).
 - c. Adsorption (Eisenhaltige Massen, Aktivkohle, Zinkoxid)

Zum Beispiel: Entschwefler mit Eisenoxidmasse (Raseneisenerz, $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow 2\text{FeS} + \text{S} + 6\text{H}_2\text{O}$). Die relativ aufwendige Anlage mit vorgeschaltetem Kiesfilter dient zur vollständigen Entfernung von Schwefelwasserstoff. Der Schwefel wird dabei in Form von Eisensulfid gebunden. Es sind Werte von $0-20\text{ mg/m}^3$ erreichbar. Dank einer kontinuierlichen Regeneration der Entschwefelungsmasse wird eine Schwefelbeladung bis ca. 340 kg/m^3 möglich. Eine solche externe Entschwefelungskolonie ist wirtschaftlich nur für mittlere und große Vergärungsanlagen zu empfehlen (siehe Anhang "Biogas: Entschwefelung mit Eisenoxidmasse", www.koehler-ziegler.de)
 - d. Sonderverfahren (Oxidation an Katalysatoren, Druckwäsche in Wasser, Membranverfahren)

Diese Verfahren werden z.T. in der grosstechnischen Erdgasaufbereitung eingesetzt.
2. biologische Verfahren
 - a. Direkt im Gärraum (Entschwefelung im Biogasfermenter)

Mit zusätzlich 3-5% Luftsauerstoff im Gasraum wird Schwefelwasserstoff bakteriell⁵⁶ zu elementarem Schwefel oxidiert. Bei höheren Konzentrationen sind Abscheidegrade bis 95% möglich, d.h. von $1-6\text{ g/m}^3$ auf $50-300\text{ mg/m}^3$. Wichtig ist die Kontrolle der Gaszusammensetzung zum Explosionsschutz.
 - b. Nachgeschalteter Biowäscher oder -Filter

⁵⁶ Fähigkeiten des Bakteriums *Sulfobacter oxydans*

Es ist auch möglich die biologische Entschwefelung in einem separaten Behälter vorzunehmen. Das Verfahren der Firma Archea beispielsweise macht eine Gaswäsche bei 30°C mit einer zu erneuernden Bakteriensuspension aus der Dünnphease des Gärschlammes (www.archea.de). Ähnlich funktioniert auch die Anlage BioSulfex® von Koehler + Ziegler und erreicht Werte um 140 mg/m³ (www.koehler-ziegler.de).

3. Kombination

Ausschöpfung der Vorteile beider obigen Verfahren, z.B. Biologische Grobreinigung im Fermenter und nachfolgend kleine Feinreinigung mit Ad- oder Absorbern

Für die Entschwefelungsverfahren sind in nachfolgender Tabelle (Tab. 35) die Vor- und Nachteile der Verfahren aufgelistet.

Verfahren	Vorteil	Nachteil
Chemisch-Physikalische	<ul style="list-style-type: none"> + Geeignet, erprobt, + Reinheit⁵⁷ <20 mg/m³ (ev. geeignet für anschliessenden Einsatz von Oxikat) + Z.B. Adsorption mit Aktivkohle auch für Siloxanentfernung geeignet • eher für grosse Anlagen (> 250m³/h, 400kWe) 	<ul style="list-style-type: none"> - aufwendig - betriebskostenintensiv - Abfallprodukte
biologische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> + wenig aufwendig + häufiger Anwendung + kaum Abfallprodukte • für kleine Anlagen (20-100kWe) 	<ul style="list-style-type: none"> - nicht langzeitstabil - bei grösseren Anlagen ist die Durchmischung problematisch - wenig konstante Reinheit⁵⁸ um 200 mg/m³
Kombination	+ Kombination der Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Noch im Entwicklungsstadium - Viele Techniken sind zu beherrschen

Tab. 35: Vor- und Nachteile der Entschwefelungsverfahren [B34]

5.3.2 Si- und Schadstoffentfernung

Für die Si- und Schadstoffentfernung⁵⁹ stehen die in nachfolgender Tabelle (Tab. 36) mit ihren Vor- und Nachteilen aufgelisteten Verfahren zur Verfügung.

Verfahren	Vorteil	Nachteil
A-Kohle oder mineralische Zeolithe (Festbett-Adsorption)	<ul style="list-style-type: none"> + Geringer technischer Aufwand + einfacher Betrieb + Kombinierbar mit der H₂S-Entfernung • Bei kleineren Gasmengen (<100 m³/h, 140 kWe) und 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwendige Überwachung der Beladung - Teure, aufwendige Entsorgung

⁵⁷ Entschwefelung ist mit chemisch relativ einfacher Anlage möglich (Betriebskosten ohne Amortisation und Unterhalt 14.- EUR pro 1'000 Nm³ Klärgas [Au4]. Dies ergibt etwa 0.01 EUR/kWh für die Entschwefelung)

⁵⁸ Da, durch die weit verbreitete biokatalytische Entschwefelung des Biogases, Schwefelwasserstoffspitzen und damit nach der Verbrennung SO₂ Spitzen, nur selten vermieden werden können, ist der Einsatz eines Katalysators oft nicht möglich [17].

⁵⁹ Es ist bei Siliziumanteilen im Gas von mehr als 15 mg/m³ ökonomisch und ökologisch sinnvoll, das Brenngas vor der Verwertung in Gasmotoren (Zündstrahl) zu reinigen [B34].

	kleineren Gehalten an Siloxanen < 30 mg/m ³	
Kaltwasserwäsche ⁶⁰ (Taupunkt –30°C, bessere Löslichkeit von Si-Verbindungen als Methan)	+ Einfacher Betrieb + keine Reststoffe + Kombinierbar mit der Kühlung	- Geringere Effizienz - Höherer technischer Aufwand
Kohlenwasserstoffwäsche	+ Hohe Effizienz (70% bis 98%) + Gute Reinigung auch von Halogenverbindungen	- Hoher technischer Aufwand - Aufwendige Mess- und Regeltechnik - Waschölentsorgung kostenintensiv

Tab. 36: Vor- und Nachteile der Si-Entfernungsverfahren [Au9]

5.3.3 Schaum- und Partikelentfernung

Da im Biogas normalerweise die Partikelbelastung, besonders durch Kleinstpartikel viel geringer als bei Holzgas ist, können je nach Bedarf auch einfachere Filterverfahren eingesetzt werden. Für die Schaum- und Partikelentfernung werden vor allem folgende Verfahren eingesetzt:

1. Kiesfilter zum Abscheiden von Feststoffpartikeln
2. Keramikfilter für Partikel > 0.15-0.21 mm

5.3.4 Trocknung

Die Trocknung ist erforderlich, da das Biogas am Fermenterausgang wasserdampfgesättigt ist. Die Trocknung erfolgt hauptsächlich⁶¹ durch Abkühlung in den Leitungen. [B32]
Kondensationstrocknung und statische Wasserabscheidung spielen eine eher untergeordnete Rolle. Waschung des Gases kommt allenfalls in Kombination mit der Si-Entfernung vor.

5.3.5 Schwankender Biogasanfall, respektive Methangehalt

Gegen die Schwankungen in der Biogasproduktion und im Methangehalt kommen bei der Gasaufbereitung folgende Massnahmen zum Zug:

1. Ausgleich durch Gasspeicherung
 - a. indirekte Speicherung durch grosse Anlagenvolumen (Durchmischung)
 - b. indirekte Speicherung im Nachfermenter
 - c. direkte Speicherung in einem separaten Speicher
2. Heizwertergänzung⁶² mittels anderen Brennstoffen (Erdgas-, Dieselumischung)
3. Zusammenhängen mehrerer Fermenter (Batch-Verfahren) und Anlagen (lokales Biogasnetz)

Ein wesentliches Problem liegt darin, dass eine allfällige Schwankung frühzeitig erkannt (gemessen) werden kann, damit durch die entsprechende Aufbereitungsmassnahme eine definierte Gasqualität für die motorische Verbrennung erzeugt werden kann.

⁶⁰ Da Siloxane erst bei niedrigen Temperaturen in der Waschlösung binden, wird bei der Kaltwasser-Gaswäsche das Brenngas mittels Kälteaggregat gekühlt und in einem Waschturm mit einer Speziallösung (Gaskondensat) intensiv berieselt. http://www.koehler-ziegler.de/de/programm/zugehoerige_links/pdf/siloxanentfernung.pdf

⁶¹ 61% Lange Leitungen mit Kondensatabscheidung (z. B. 150 m)
15% Wasserabscheider im Speicher
12% Kondensattrocknung
4% Wasserkühler [B28]

⁶² Technische Lösungen für die Gasreinigung und Methananreicherung existieren, sind aber noch sehr kostenintensiv [18].

5.3.6 Bottlenecks und Potenziale

In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 37) sind die Bottlenecks der Aufbereitung von Biogas zur motorischen Verarbeitung zusammengestellt. Daneben sind die Entwicklungspotenziale aufgelistet.

Bottlenecks der Gasaufbereitung	Entwicklungspotenzial
Ungenügende Entschwefelung <ul style="list-style-type: none"> • Kurze Wartungsintervalle, Motorstandzeit • sicherer Katalysatorbetrieb (Oxykat, 3WegeKat) bisher nicht gewährleistet 	Weiterentwicklung der Kombinierten Entschwefelungsverfahren Kombination mit der restlichen Aufbereitung (Schadstoffentfernung, Kühlung, Speicherung)
Aufwendige und teure SI- und Schadstoffentfernung	Optimierung der vorhandenen ⁶³ Aufbereitungsverfahren
Eine vollständige Aufbereitung besteht aus vielen Anlagenkomponenten, die aufeinander und auf die vorgeschaltete Gasproduktion abgestimmt sein müssen	Auf die vorhandenen Schadstoffe anpassbares ⁶⁴ , modulares Konzept zur Entfernung unter einen permanenten, garantierten Schadstoffgehalt von: <ul style="list-style-type: none"> • 500 mg/m³ (ohne Kat), heute bereits erreichbar • 0.5 mg/m³ (mit Kat), Ziel: hohe Gasreinheit

Tab. 37: Bottlenecks und Entwicklungspotenziale bei der Vergasung

5.3.7 Handlungsbedarf

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Gasaufbereitung):

Entwicklung eines wartungsarmen, spezifischen, daher allenfalls modularen Aufbereitungssystems (Feststoffentfernung, Entschwefelung, Schadstoffentfernung (Si, andere), Kühlung), mit welchem ein für den Katalysatoreinsatz genügend hohe und konstante Gasreinheit mit konstantem Methangehalt (Speicher) Gas resultiert. [B34]

Analog wie beim Holzgas ist die genaue Abklärung, wie viel Schadstoffe maximal bei der Vergärung entstehen und wie viel das jeweilige Motorsystem minimal erträgt, die erste zu lösende Voraussetzung.

⁶³ Z.B. Entwicklung Bau von neuen Gasreinigungsanlagen für Biogas, SILOXA ENGINEERING AG, www.siloxa-ag.de

⁶⁴ Gewisse Schadstoffe werden z.T. in einem Schritt entfernt.

5.4 Verstromung und Emissionsnachbehandlung

Für die motorische Verwertung des Biogases sind die gleichen Techniken und somit Bottlenecks und Potenziale wie beim Holzgas relevant. Bei den problematischen Eigenschaften des Biogases verglichen mit dem Holzgas (siehe Tab. 20).

- verschärfen sich die Probleme mit Schwefel (H_2S , SO_x), Si und Brennwertschwankungen,
- entfällt die Teer-, Partikel- und Temperaturproblematik,
- sind die Probleme mit den übrigen Schadstoffen (z.B. von Siedlungsabfällen, respektive Altholz) und der 100%-igen Feuchtigkeit (Holzgas aufgrund der Aufbereitung, Biogas aufgrund der Herstellung) ähnlich.

Die motorisch sehr problematischen Biogaseigenschaften sind in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 38) aufgelistet. Daneben sind die Folgen für das Motorsystem und die rein motorischen Massnahmen aufgezeigt.

Biogas-eigenschaften	Folgen für das Motorsystem	Motorische Massnahmen
Schwefelverbindungen	<ul style="list-style-type: none"> • wie beim Holzgas aber verschärfte Problematik 	
Si-Verbindungen (Siloxane, Silane)	<ul style="list-style-type: none"> - Starke Anlagerungen und Zerstörung im Brennraum, auf den Ventilen und in den Nebenaggregaten (Filter, TL, LLK, Kat) - Deaktivierung der Katalysatoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Reinigung, Revisionen • Gasaufbereitung, mit speziellen Filtern (teuer) • Selbstreinigender Katalysator (absplittern der Anlagerungen)
variierender Methanteil	<ul style="list-style-type: none"> - Probleme beim Start und im Betrieb - Variierende Emissionswerte 	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz robuster Motoren (Zündstrahl) • Aufladung, elektronische Gaseinblasseysteme • Zugabe zusätzlicher Brennstoffe (Gas, (Bio-)Diesel) • Verbesserte Motorregelung

Tab. 38: Biogaseigenschaften, Folgen für das Motorsystem und motorische Massnahmen

Der aktuelle Stand der Technik ist [Vs3]:

- Für kleine Leistungen 20-100 kWe (Landwirtschaft) werden aus Kostengründen für Gas adaptierte **Ottomotoren** (Saugmotor ohne Katalysator OM) eingesetzt. Zur Wirkungsgrad und Emissionsverbesserung wird der Gasmotor vermehrt auch im aufgeladenen **Magerbetrieb** (MM) gefahren. Die Anwendung eines Oxykats ist mit den entsprechenden Problemen in Entwicklung.
- Bei Leistungen >100 kWe (Kommunen, Kläranlagen) werden die von der TA-Luft bevorteilten **Zündstrahlmotoren** ZM verwendet. Hauptgrund ist die hohe Robustheit bezüglich variierendem Methananteil und unreinem Gas, sowie der inzwischen gute Wirkungsgrad (30-40%). Die Wartungsintervalle (Ölwechsel) sind zwar länger geworden (1000-2000 h), aber wie die Abgaswerte nicht zufriedenstellend. Zur Vermeidung von Russ und Stickoxiden ist die vermehrte Anwendung des Magermotors in Entwicklung. Es sind dafür aber mehr CO und HC (Schlupf) in den Abgasen zu erwarten.

5.4.1 Bottlenecks und Potenziale

Neben den im Abschnitt "Holzgas: Verstromung und Emissionsnachbehandlung" aufgezählten Bottlenecks und Potenziale der Otto- und Dieselmotortechnik sind in der nachstehenden Tabelle (Tab. 39) die für Biogas wesentlichsten nochmals explizit genannt.

Bottlenecks der Verstromung	Entwicklungspotenzial
Emissionen aufgrund des problematischen Einsatzes von Katalysatoren ⁶⁵ (längerfristig aufgrund der verbreiteten Anwendung von Zündstrahl- ⁶⁶ und Magermotoren ohne Kat)	<ul style="list-style-type: none"> • SCR + OxyKat • Swissmotor
Schwankungen in der Biogasmenge und dem Methangehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Motorregelstrecke (laufende Anpassung der Motorparameter an den Methangehalt [17]) • Dieselmotor mit Co-Combustion (Pflanzenöl) • TL und Aufladung des Gasspeichers mit Motor
Korrosionsschäden und Ablagerungen	Korrosionsbeständigkeit, Selbstreinigende Zusatzaggregate (Oberflächenbeschichtungen)

Tab. 39: Biogas spezifische Bottlenecks und Entwicklungspotenziale bei der Verstromung

5.4.2 Handlungsbedarf

Handlungsbedarf (mit Fokus nur auf die Verstromung und Emissionsnachbehandlung):

Es besteht der analoge Handlungsbedarf wie bei der Verstromung von Holzgas. Längerfristig muss der Weg zu den saubersten und effizientesten Motoren führen. Die Zündstrahltechnik ist abzulösen.

Das Konzept Dieselmotor mit Co-Combustion scheint aufgrund der guten Verarbeitung der grossen Schwankungen in der Biogasmenge und dem Methangehalt noch mehr Sinn, als beim Holzgas zu machen. Die Potenziale sind zu prüfen.

5.5 Gesamtsysteme

5.5.1 Prozessvarianten

Im Abschnitt "Gesamtheitlicher Ansatz – Prozessorientierung" sind 3 prinzipielle Gesamtprozessvarianten postuliert. Davon ausgehend sind in nachfolgender Tabelle (Tab. 40) verschiedene Systemvarianten skizziert.

⁶⁵Bei der Verbrennung von Biogas entstehen Verbindungen, die durch Abgaskatalysatoren nicht unschädlich gemacht werden können. So vergiften bzw. inaktivieren Spurengase wie **Schwefelwasserstoff** (nach der Verbrennung von **SO₂**) sehr schnell eventuell nachgeschaltete Oxidationskatalysatoren [17].

⁶⁶ Speziell beim Zündstrahlmotor: Kohlenmonoxid, Stickoxide, Methan, Schwefeldioxid, Formaldehyd, Ruß und Staub sowie höhere Kohlenwasserstoffe aus dem zugesetzten Zündöl

Variante	1a	1b	2a	2b	3
Herstellung	Nassvergärung mit Entschwefelung		Trockenvergärung Nachvergärung		Trockenvergärung Membranreaktoren
Aufbereitung	Feststoffentfernung				
	H ₂ S-, Si- und Schadstoffreinigung		Sehr zuverlässige H ₂ S-, Si- und Schadstoffreinigung		
	Kühlung, Trocknung				
	Gasspeicherung			Treibstofftank	Nachvergärung mit Speicherung
Treibstofftank					
Verstromung	Zündstrahl	Saugmotor	Magermotor TL	Diesel Co-C	Swissmotor, TL, LLK AGR, 3WegeKat
Nach-behandlung	DPF, Gaswaschung OxiKat, SCRT+Urea		Filter, OxiKat	DPF, Gaswaschung OxiKat, SCRT+Urea	

Tab. 40: Verschiedene Gesamtprozessvarianten der Biogasverstromung

Nachfolgend sind die Bottlenecks und Potenziale der Systemvarianten von obiger Tabelle (Tab. 40) aufgelistet.

Variante 1: Aufwendige Gasbehandlung vor und/oder nach einem robusten Motor

Das Bottleneck ist die längerfristig zu erwartenden Verschärfung der Gesetzgebung bezüglich Emissionen. Dadurch sind diese Systeme mit einer aufwendigen Nachbehandlung zu ergänzen. H₂S, Si-Verbindungen und Schadstoffe verunmöglichen einen Katalysatorbetrieb. Das heisst, längerfristig wird eine aufwendige und zuverlässige Aufbereitung erforderlich werden. Ein wartungsarmer Motorbetrieb wird schwierig zu erreichen sein.

Das Potenzial dieser Varianten liegt in der bestehenden breiten Erfahrung sowie Einfachheit der Gasherstellung und der Robustheit auf der Motorenseite.

Variante 2: Verbesserte Gasherstellung, Motor der bedingt Schadstoffe erträgt

Die Varianten 2a, 2b sind Mischvarianten. **Fett** gedruckt ist die Variante 2a, welche von der **Industrie als Entwicklungsziel verfolgt** wird.

Das Bottleneck dieser Varianten sind der Wirkungsgrad und die Emissionen, welche längerfristig wie bei Variante 1 eine aufwendige Nachbehandlung erwarten lässt.

Das Potenzial dieser Varianten liegt in einem guten Wirkungsgrad der Gasherstellung und im Fall 2a in einem günstigen Motor. Variante 2b ist vor allem bezüglich der betrieblichen Flexibilität (ohne Gas-, dafür mit Treibstoffspeicher) und ihrer Verfügbarkeit sehr interessant. Die Dieselmotortechnik ist allerdings teuer.

Variante 3: Hochentwickelte Gasherstellung (H₂S-arm), hochentwickelte Verstromung mit integrierter Nachbehandlung

Das Bottleneck dieser Variante werden die Kosten (Membran, Aufbereitung, Speicher, Motor) sein, welche eine Anwendung im unteren Leistungsbereich erschweren. Zudem befinden sich die Herstellungsverfahren noch im Entwicklungsstadium, das heisst die Betriebserfahrungen sind noch gering.

Das Potenzial dieser Variante liegt in der H₂S-armen Gasherstellung, dem hohen Wirkungsgrad und den geringen Emissionen.

Da es, im Gegensatz zu Holzgas, beim Biogas einiges mehr an Anlageerfahrung gibt, können auch mehr Aussagen über die Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und die Gründe, warum diese allenfalls ungenügend ist, gemacht werden. Folgende allgemeine Bottlenecks und Entwicklungspotenziale (Tab. 41) bestehen für das Gesamtsystem:

Bottlenecks der Gesamtsysteme	Entwicklungspotenzial
<p>Standortabhängige, immobile Anlage, welche spezifisch auszulegen ist, aufgrund von:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorhandener Bausubstanz (Gärbehälter) • Lokalen Platzverhältnissen • Art und Menge der verfügbaren Biomasse • Wärme- und allenfalls Strombedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von kompakten Anlageneinheiten, Baukastensystem • Optimierung der Standortwahl (sowohl bez. Substratbeschaffung als auch Wärmeabgabe)
<p>Unrentabel, weil:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zu kleine Leistung⁶⁷ (< 200 kWe) • Mangelnde Effizienz • Unzureichende Nutzung der anfallenden Wärme⁶⁸ (Wärmeüberschuss) • Unzureichende Verfügbarkeit und Auslastung aufgrund von: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Unregelmässiger, verminderter Gasherstellung (Vergärprobleme, zu wenig Substrat, kein Co-Substrat) ◦ Motorausfall (Anfahrvorgänge, Schäden, Revision) • Zu grosser Aufwand bei der Vor- und Nachbereitung • Energiearmes Substrat (Gülle⁶⁹) • Nicht optimalen Rahmenbedingungen: Mineralölsteuer, Zonenkonformität⁷⁰, schwierige Bewilligung 	<ul style="list-style-type: none"> • Bau von grösseren, zentralen Anlagen mit optimiertem Wirkungsgrad (Teilsysteme⁷¹ und Gesamtsystem) • Erhöhung der Verfügbarkeit und Auslastung durch: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Verbesserung und Abstimmung der Komponenten ◦ Notheizung ◦ 2 Anlagen koppeln ◦ Bildung lokaler Biogasnetze • energetische Optimierung der Aufbereitung, Wahl unempfindlicherer Verfahren, Optimierung und Integration der Nachvergärung • Co-Vergärung, Membranreaktoren • Absprache mit Behörden und Ämtern z.B. für einfachere Baubewilligungsverfahren
<p>Schlechte Akzeptanz, aufgrund von:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Komplexe Anlage (besonders wenn ökologisch einwandfrei mit vielen Teilprozessen und Anlagenteilen) • Schwieriger Inbetriebnahme und Betrieb (Bestückung, Entleerung, Operating, Überwachung, Störungsbehebung, ..) • Emissionen (Gerüche, Abgas) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Anlagentechnik z.B. Vollautomatische Steuerung und einfache Bedienung und Überwachung mit erhöhtem Komfort • Technisches Verständnis des Betreibers schulen • Komponenten standardisieren

⁶⁷ Der Fachverband Biogas hat mitgeteilt, dass erst eine Leistung von 200 kWe. zu einer Verbesserung der Bilanz eines landwirtschaftlichen Betriebes führt. Wenn dann zusätzlich zum Stromertrag die anfallende Wärme ganzjährig sinnvoll genutzt werden kann wird die Wirtschaftlichkeit weiter erhöht.

⁶⁸ Das Defizit des Betriebs von Biogasanlagen mit KWK besteht derzeit im **unzureichenden Umfang der Nutzung anfallender Wärmeenergie**. Abgesehen vom Eigenbedarf für die Beheizung der Fermenter und eventuell der landwirtschaftlichen Wohn- und Wirtschaftsgebäude, ist eine weitere Verwertung nur selten gegeben. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass etwa 80% der nach Abzug des Eigenverbrauchs noch zur Verfügung stehenden Wärme über Notkühlanlagen an die Atmosphäre abgeführt wird [17].

⁶⁹ Landwirtschaftliche Nassvergärung ist nur mit Co-Vergärung wirtschaftlich.

⁷⁰ Co-Vergärung wird heute als Abfallentsorger eingestuft [11].

⁷¹ z.B. Wahl von Herstellungsverfahren mit besserer Ausbeute, Einsatz wirkungsgradoptimierter Motoren

<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsrisiko • Hohe Investitionskosten (Finanzierung) • Grösse der Anlage (fixe Installation, welche bauliche Massnahmen verlangt) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gekapselte Biogasanlage, emissionsfreie Motoren • Sicherheitsmanagement mit Gasüberwachung, Überdrucksicherung, etc. • Finanzierungsmodelle (Contracting) • Allgemein Akzeptanz und Identifikation mit erneuerbaren Energieträger fördern
---	--

Tab. 41: Biogas spezifische Bottlenecks und Entwicklungspotenziale der Gesamtsysteme

Der Schwerpunkt der gegenwärtigen Entwicklung liegt in der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Optimierung des Anlagenbetriebs ([B2, B11, B13])

5.5.2 Handlungsbedarf Gesamtsystem - Vergärung

Neben einer Reihe von politischen und organisatorischen Massnahmen (Standortwahl, Bewilligungsverfahren, Schulung, Motivation) gibt es folgenden Handlungsbedarf bezüglich der Gesamtanlage:

Handlungsbedarf (mit Fokus auf das Gesamtsystem - Vergärung):

Der H₂S-Anteil im Biogas ist für alle Motorvarianten sehr problematisch. Die H₂S-Abscheidung ist aufwendig und die Abscheideraten für einen Katalysatorbetrieb zu wenig zuverlässig. Daher ist die Weiterentwicklung von **Vergärungsverfahren, die ein H₂S-armes (< 20 mg/Nm³) Gas herstellen**, prioritär.

Zur Erreichung der Wirtschaftlichkeit ist die Verfügbarkeit und der Gesamtwirkungsgrad sehr entscheidend, daher sind bei allen Anlagenteilen nur die energieeffizientesten zu wählen, d.h. unter anderem Trockenvergärung und Swissmotor. Um längerfristig zudem auch Abgas-Emissionen zu minimieren wird der Einsatz eines Katalysators unvermeidlich, d.h. eine **zuverlässige Gasaufbereitung** ist Voraussetzung. Ein "sauberes" Gas wird sich zudem sehr positiv auf das Betriebsverhalten und den Unterhalt auswirken. Ein einfach auf den Bedarfsfall anpassbares modulares Aufbereitungssystem (Feststoffentfernung, Entschwefelung, Schadstoffentfernung (Si, andere), Kühlung), welches zu dem Brennstoffschwankungen auszugleichen vermag (Speicher, indirekte Speicherung im Nachfermenter), wäre anzustreben.

Die Rentabilität **kleiner, landwirtschaftlicher Anlagen** (<100 kWe) ist in jedem Fall kritisch. Auch mit obigen Massnahmen sind die Anlagen kaum wirtschaftlicher realisierbar. Somit liegt ein allfälliger, kurzfristiger Handlungsbedarf in einer **verbesserten Auslegung der Gesamtanlage und der Optimierung des Anlagenbetriebs** (Co-Fermentate, Abwärmenutzung). Längerfristig ist zu versuchen von den Erfahrungen und Standardisierungen bei grösseren Anlagen zu profitieren (scale-down).

5.6 Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und die Teilsysteme

In Tabelle (Tab. 42) wird der Handlungsbedarf mit Fokus auf das Gesamtsystem dem Handlungsbedarf mit Fokus auf die Teilsysteme gegenübergestellt. Die Nummerierung entspricht der Priorität. Fett gedruckt sind vergleichbare Punkte des jeweiligen Handlungsbedarfes.

Teilsysteme	Handlungsbedarf Fokus Teilsystem	Handlungsbedarf Fokus Gesamtsystem
Vergärung	<ol style="list-style-type: none"> a. Bei großtechnische Anlagen Feststellung optimaler Fermentertechniken b. Bei kleinen Anlagen (<100kWe) Optimierung und Standardisierung der Fermenteranlage und der Anlagenteile Verbesserung <ol style="list-style-type: none"> Vorbehandlung für bessere Hygienisierung Nachbehandlung (Rotte) für bessere Kompostqualität Der Systemkomponenten um die Lebensdauer zu verlängern 	<ol style="list-style-type: none"> Bei großtechnische Anlagen: Einsatz von Vergasungsverfahren mit H₂S-armem Gas Einsatz von Verfahren mit bestem Wirkungsgrad Bei kleinen Anlagen (<100 kWe): Verbesserte Auslegung der Gesamtanlage und Optimierung des Anlagenbetriebs Entwicklung einer zuverlässige Gasaufbereitung Entwicklung eines anpassbaren modularen Aufbereitungssystem Integration der Speicher in die Aufbereitung
H₂S-Abscheidung	<ol style="list-style-type: none"> Anwendung und Weiterentwicklung bestehender Verfahren zur Sicherung der Zuverlässigkeit 	
Si-Entfernung	<ol style="list-style-type: none"> Entwicklung einer modularen Schadstoffentfernung Abklärung der Schadstoffwerte 	
Temperaturminderung	<ol style="list-style-type: none"> Kein spezifischer Handlungsbedarf 	
Ausgleich von Brennstoffschwankung	<ol style="list-style-type: none"> Verbesserung der Speichermöglichkeiten 	<ol style="list-style-type: none"> Einsatz von Motorsystem mit bestem Wirkungsgrad und Emissionen Priorität der Motorsysteme: <ol style="list-style-type: none"> Swissmotor Allenfalls Dieselmotor mit Co-Combustion Andere
Verstromung, Emissionsnachbehandlung	<ol style="list-style-type: none"> Adaptation des Swissmotors für Biogas Machbarkeitsstudie Dieselmotor mit Co-Combustion Spezifische Weiterentwicklung der Nebenaggregate (Turbolader, Katalysatoren) Aufgeladener Magermotor beobachten Zündstrahltechnik kein Handlungsbedarf 	

Tab. 42: Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und des Handlungsbedarfes für die Teilsysteme bei der Vergärung

Der Vergleich des Handlungsbedarfes für das Gesamtsystem und für die Teilsysteme in obiger Tabelle (Tab. 42) zeigt folgendes:

Bei der Gasherstellung ist die optimale Fermentertechnik bei grossen Anlagen noch nicht gefunden. Mit Blick auf das Gesamtsystem sind H_2S -arme, möglichst effiziente Verfahren prioritär (Trockenvergärung).

Bei kleinen Anlagen sind die Differenzen grösser. Die Optimierung und Standardisierung der Gasherstellanlage und deren Teile steht eher weniger aufwendigen Massnahmen wie die verbesserte Auslegung (bedarfsgerechtes Minimum) und einem optimierten Betrieb der Gesamtanlage gegenüber.

Bei der Gasaufbereitung ist bei beiden Betrachtungsweisen die zuverlässige Erzeugung eines "sauberen" Gases prioritär. Der Grund dafür ist letztlich die Empfindlichkeit aller Motoren und das längerfristige Erfordernis einen Katalysator betreiben zu können.

Folgende Thesen lassen sich daraus ableiten:

1. Integration der effizientesten und saubersten Teilsysteme bei grossen Anlagen

Kleine, landwirtschaftliche Anlagen (< 100 kWe) sind kaum jemals wirtschaftlich zu betreiben. Eine Verbesserung ist zur Zeit nicht lohnend. Der Schwerpunkt liegt daher bei den grösseren Anlagen (>100 kWe, zentrale Biogasanlage, Klärgasanlage), deren Wirtschaftlichkeit durch den Einsatz der effizientesten Teilsysteme erreicht werden kann. Die Entwicklung einer H_2S -armen Gasherstellung, einer bedarfsoptimierten, zuverlässigen Gasaufbereitung und der Einsatz der effizientesten und saubersten Motoren sind dafür erforderlich. Längerfristig kann versucht werden diese Techniken auch auf kleine Anlagen zu übertragen (scale-down).

2. Optimierung der Teilsysteme für kleine, landwirtschaftliche Anlagen

Bei kleinen, landwirtschaftlichen Anlagen (<100 kWe) besteht ein Verbesserungspotenzial in der Optimierung (Co-Fermentation) und Standardisierung der bestehenden Fermenterverfahren. Bei grösseren Anlagen (>100 kWe) muss prioritär eine optimale Fermentertechnik eruiert und einsatzfähig gemacht werden. Weitere Potenziale liegen in der Entwicklung einer minimalen Aufbereitung und der verbesserten Adaptation robuster Motoren z.B. Zündstrahlmotor. Voraussetzung ist, dass bei den Emissionen die (gesetzlichen) Konzessionen beibehalten werden. Längerfristig besteht ein Potenzial in der Verbesserung der Abgasnachbehandlung (SCRT, Oxykat). Dies bedingt aber entsprechende Anpassungen bei der Gasaufbereitung vor dem Motor.