

MACHBARKEITSSTUDIE UND BUSINESSPLAN

LIGNOGAZ

Methan aus Holz
Projektierung einer 2.67-MW-Anlage
für den Standort Mont-La-Ville (VD)

Winterthur, 2014-08-20

Auftraggeber

Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW), Zürich
Bundesamt für Energie (BFE), Bern
Holdigaz SA, Vevey

Mitwirkende

Lenkungsausschuss

Daniela Decurtins	Direktorin VSG
Dr. Pascal Favre	CEO Cosvegaz, Verwaltungsrat Holdigaz
Martin Seifert	Sekretär FOGA (SVGW)
Sandra Hermle	Bundesamt für Energie BFE
Giorgio Gadola	CEO CTU

Kontaktgruppe

Dr. Pascal Favre	CEO Cosvegaz, Verwaltungsrat Holdigaz
Patrick Agassiz	Bürgermeister Mont-la-Ville
Dominique Reymond	Dir. Gen. de l'Environnement Canton VD
Luisa Helms	Holdigaz

Ersteller

CTU Clean Technology Universe AG

Ansprechpartner

Giorgio Gadola

ZUSAMMENFASSUNG

Am Standort Mont-la-Ville wird beispielhaft die Realisierbarkeit einer sogenannten Methan aus Holz Anlage analysiert. Dabei wird in einer ersten Stufe Holzgas mittels eines allothermen Vergasers produziert und anschliessend in einer zweiten Phase zu einem synthetischen Biogas (Bio-SNG) umgewandelt, welches chemisch den Spezifikationen von Erdgas entspricht und somit direkt in das Erdgasnetz einspeisbar ist. Dieses Verfahren wird als SWISS-SNG bezeichnet und wurde in Kooperation zwischen der CTU Clean Technology Universe AG (CTU) und dem Paul Scherrer Institute (PSI) entwickelt. Dafür wurden die CTU und PSI mit dem Watt d'Or 2009 des Bundesamtes für Energie für Bestleistungen im Energiebereich ausgezeichnet.

Vorteile der SWISS-SNG-Technologie

Die Vorteile der SWISS-SNG-Technologie gegenüber anderen erneuerbaren Energien im Allgemeinen und gegenüber der 'konventionellen' Verwendung von Holz als Energieträger im Speziellen sind vielfältig. Die wichtigsten sind:

- Erneuerbar und CO₂-neutral
- Flexibel in der Verwendung
- Grundlastfähig und speicherbar
- Aus der Region (Holz), für die Region (Energie, Arbeitsplätze)
- Wenig Abwärme bei reiner Gasproduktion
- 'Power-to-Gas'-fähig
- Nutzung bestehender Infrastruktur (Erdgasnetz)

Standortanalyse 'Champs de la Pierre'

Die geplante SWISS-SNG-Anlage hat eine Leistung von 2.67 MW_{BIO-SNG} (unterer Heizwert H_u). Der Platzbedarf für eine derartige Anlage inkl. Lagerplatz für das Frischholz und interner Verkehrswege beträgt mindestens 3'000 m². Die Gemeinde Mont-la-Ville hat den Standort 'Champs de la Pierre' als möglicher Anlagestandort ausgewählt. Dieser wird nun anhand der wichtigsten Standortkriterien beurteilt.

Parzellengrösse

Der von der Gemeinde Mont-la-Ville gewählte Standort erfüllt mit mehr als 13'000 m² das Kriterium.

Zonenkonformität

Eine Umzonung von der Landwirtschafts- in eine Sondernutzungszone ist erforderlich.

Zugänglichkeit, verkehrstechnische Erschliessung

Der Ausbau der Zufahrtsstrasse ist erforderlich.

Umweltverträglichkeit

Es ist keine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich.

Sicherheitsvorstudie

Es ist keine Risikoanalyse nach Störfallverordnung erforderlich.

Gewässerschutz

Aufgrund einer Trinkwasserfassung in der Nähe der Parzelle ist ein hydrologisches Gutachten einzuholen. Ein Rückhaltesystem (Auffangbecken) ist vorzusehen.

Grenzabstände

Eine Waldabstandslinie von 10 Metern ist aufzunehmen. Gegebenenfalls bedarf es einer Anpassung der Aufstellungsplanung.

Im Übrigen entspricht die Anlage den Vorschriften des Bundesgesetzes über die Raumplanung sowie den kantonalen und den regionalen (Morges VD) Richtplänen.

Für den Prozess zur Einrichtung einer Sondernutzungszone ist, vorausgesetzt Einsprachen bleiben aus, mit einer Dauer von mind. 12 Monaten zu rechnen.

Rohstoff Holz aus der Region

Ein besonderes Augenmerk wird auf die Verfügbarkeit von regionalem Holz gerichtet. Die Auswertung der vorhandenen Grundlagen und Untersuchungen zeigt, dass das noch verfügbare, regionale Energieholzpotenzial problemlos ausreicht, um die geplante Methanisierungsanlage in Mont-la-Ville nachhaltig mit den erforderlichen ca. 12'500 Tonnen/Jahr Waldholzschnitzeln zu versorgen.

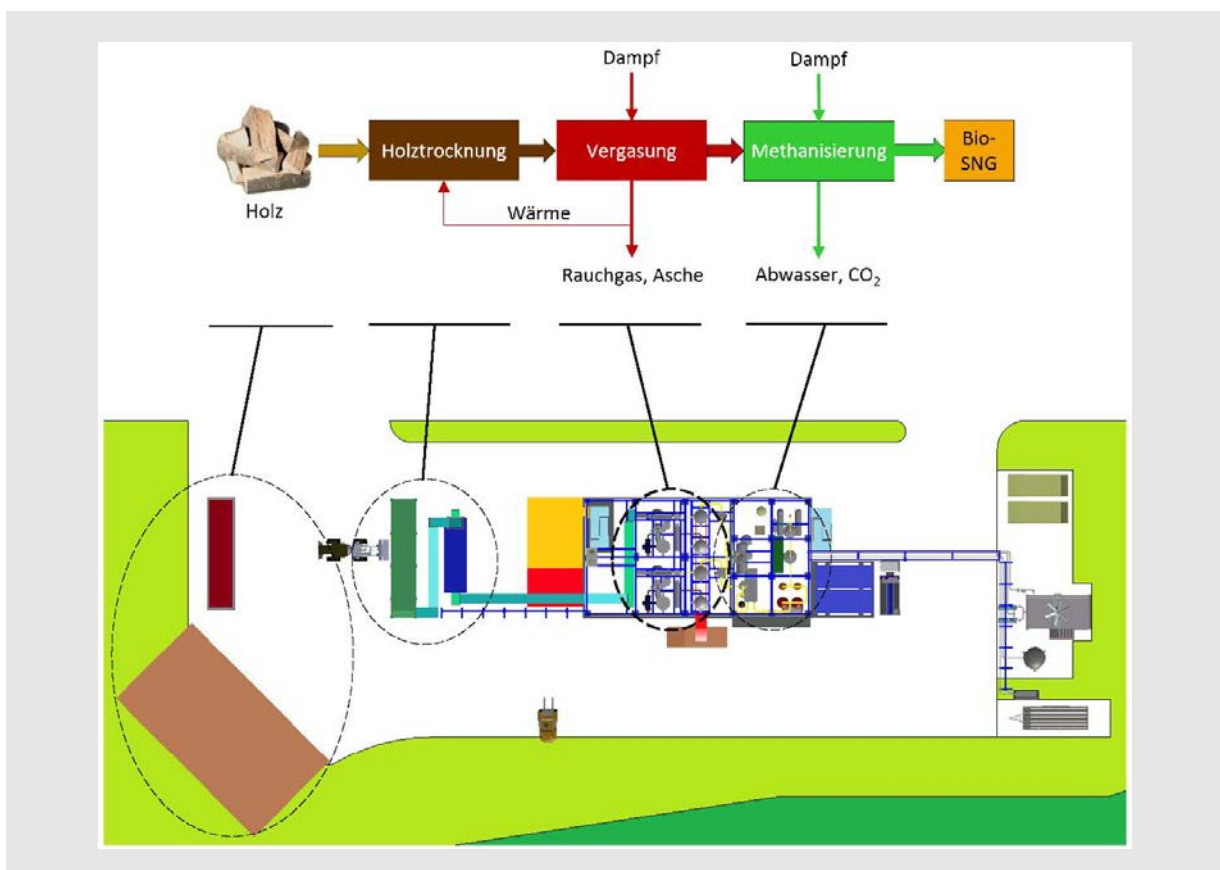
Anhand zweier konkreter Angebote von erfahrenen Unternehmen aus der Region lässt sich zeigen, dass ein Holzpreis von 4.6 bis 4.9 Rp./kWh (entspricht 5 bis 5.5 Rp./kWh nach dem Kessel) erzielbar ist.

Verfahrenstechnische Konzeptionierung der Anlage

Die Technologie beruht auf einer Kombination von Verfahren zur Holzvergasung mit anschliessender Methanisierung des Holzgases. Im Kern besteht sie aus den folgenden drei Verfahrensabschnitten:

- Holztrocknung
- Vergasung
- Methanisierung

Unten stehende Abbildung verdeutlicht den prinzipiellen Prozessablauf der SWISS-SNG-Technologie und zeigt zugleich die Lokalisierung der einzelnen Schritte innerhalb der in dieser Studie betrachteten Bio-SNG-Anlage.



Leistungsklasse der Anlage

Die Auslegung der Anlage entspricht einer Leistungsklasse von etwa 4.4 MW Brennstoffwärmeleistung (Frischholz, Wassergehalt 50%) bzw. einer BioSNG-Produktion von 2.67 MW (untere Heizwert H_u).

Der gesamte chemische Wirkungsgrad der Anlage beträgt 63.6% (unterer Heizwert Bio-SNG zu Brennstoffwärmeleistung) bzgl. des eingesetzten Frischholzes. Hierin inbegriffen ist die Nutzung von Prozessabwärme zur Holztrocknung. Da ausreichend Abwärme zur Verfügung steht, ist die Anlage prinzipiell unabhängig hinsichtlich des Feuchtegehaltes des angelieferten Frischholzes.

Ferner werden innerhalb der Anlage zahlreiche Prozessströme rezirkuliert, was letztendlich zu einer nicht unerheblichen Reduzierung der erforderlichen Holzmenge für die Anlage und damit zu einer weiteren Steigerung des Gesamtwirkungsgrades führt.

Kommerzieller Businessplan

Die Herstellkosten der einzelnen Anlagelose inkl. Montage und Inbetriebnahme stellen sich wie folgt dar:

Holzschnitzelannahme und Trocknung	CHF	800'000
Vergasereinheit	CHF	5'500'000
Methanisierungseinheit	CHF	3'300'000
Nebensysteme	CHF	6'600'000
Erschliessungskosten	CHF	1'000'000
Baukosten (Beton- und Stahlbau)	CHF	1'800'000
Total Herstellkosten	CHF	19'000'000

Je nachdem, wie das Projekt realisiert würde, ist mit folgenden Zuschlägen von 10% bis 20% für die Projektorganisation (Finanzierungskosten, Garantien, Rückstellungen) zu rechnen.

Die Investitionskosten für eine Erstanlage belaufen sich je nachdem, wie das Projekt organisiert wird, auf CHF 21 Mio. bis CHF 23 Mio.

Die Betriebskosten beinhalten sämtliche mit der Aufrechterhaltung des Betriebs notwendigen Kosten und setzen sich wie folgt zusammen:

Holz	CHF p.a.	1'450'000
Betriebsmittel (Strom, Katalysator, etc.)	CHF p.a.	930'000
Personalkosten	CHF p.a.	400'000
Unterhalt (ab dem 3. Betriebsjahr)	CHF p.a.	170'000
Diverses (Versicherung, Kommunikation, etc.)	CHF p.a.	125'000
Total Betriebskosten	CHF p.a.	3'075'000

Die oben genannten Investitions- und Betriebskosten ergeben einen Gestehungspreis für das Bio-SNG einer Erstanlage von ca. 20 Rp./KW. Unter Berücksichtigung von Skaleneffekten bei Folgeanlagen und grösseren Anlagekapazitäten ist ein Bio-SNG-Gestehungspreis von 16.5 Rp./KWh als realistisch zu betrachten.

Gemessen am heutigen Verkaufspreis von Biogas in der Schweiz von ca. 23 Rp./KWh ergibt sich eine Gesamtkapitalrendite von über 9%.

Darin nicht berücksichtigt sind potenziell tiefere Holzpreise (Beimischung von Altholz; Holz mit höherem Wassergehalt) sowie mögliche Zusatzeinkünfte aus dem Verkauf von BioCO₂ oder der (simultanen) Nutzung der Anlage für 'Power-to-Gas'-Anwendungen.

Da sich potenzielle Standorte gerade in der Westschweiz oft in ländlichen Gebieten, geprägt von kleinen Gemeinden befinden, sollen ergänzend die Investitions- und Betriebskosten für eine Anlage mit einer Leistung von 1.335 MW (halbe Leistung) geschätzt werden.

Bei einer Anlage mit einer Leistung von 1.335 MW resultiert ein Bio-SNG-Gestehungspreis von 23 Rp./KWh (vgl. Gestehungskosten Bio-SNG für eine Anlage mit halber Leistung). Dies bedeutet eine Steigerung von 15% im Vergleich zu den Gestehungskosten von 20 Rp./KWh einer Anlage mit der ursprünglichen Planleistung von 2.67 MW.

Es zeigt sich also, dass durchaus Skaleneffekte wirken, die sich bei zunehmender Anlagenkapazität vorteilhaft auf den Gestehungspreis des Bio-SNG auswirken. Bei jeder potenziellen SWISS-SNG-Anlage wird schliesslich ein Kompromiss zwischen Rentabilität und Regionalität zu finden sein.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG.....	3
1 EINLEITUNG	10
1.1 AUSGANGSLAGE.....	10
1.2 ZIEL DIESER STUDIE.....	10
1.3 METHODIK.....	11
1.4 ERGEBNISSE DER MACHBARKEITSSTUDIE ('DELIVERABLES').....	12
1.5 VORTEILE DER SWISS-SNG-TECHNOLOGIE	12
1.6 WESHALB FÖRDERUNG DURCH DIE ERDGAS-WIRTSCHAFT?.....	13
1.7 VERTRAULICHKEIT	13
2 STANDORT-EVALUATION FÜR GEMEINDE MONT-LA-VILLE (VD)	14
2.1 SITUATION VOR ORT.....	14
2.2 KATASTEREINTRAGUNGEN UND ZUORDNUNG.....	15
2.3 STRASSENANBINDUNG	15
2.4 NACHWEIS.....	17
2.5 KONFORMITÄT	17
2.5.1 Technische Sachzwänge.....	17
2.5.2 Umweltauflagen	18
2.5.3 Landschaften und Ortsbilder	22
2.5.4 Übersicht der Sachzwänge.....	23
2.5.5 Zwänge bezüglich der Ansiedlung	24
2.5.6 Bundesgesetz über die Raumplanung.....	24
2.5.7 Richtplan des Kantons Waadt.....	25
2.5.8 Regionaler Richtplan des Bezirks Morges.....	25
2.5.9 Kantonaler Richtplan Venoge.....	25
2.6 VORGEHENSWEISE.....	25
2.6.1 Planungen und parallel laufende Studien.....	25
3 ROHSTOFF HOLZ.....	27
3.1 KLASSIFIZIERUNG VON HOLZ.....	27
3.2 METHODIK.....	27
3.3 VERFÜGBARKEITEN	27
3.3.1 Energieholzpotenzial Schweiz	28
3.3.2 Kanton Waadt	28
3.3.3 Kanton Freiburg.....	29
3.4 AKTUELLE NUTZUNG VON ENERGIEHOLZ IM KANTON WAADT	29
3.5 GEGENÜBERSTELLUNG NUTZUNG UND POTENZIAL.....	30
3.6 KOSTEN.....	30
3.6.1 Allgemeine Angaben aus Literatur und Empfehlungen	30
3.7 ABSICHTSERKLÄRUNGEN FÜR HOLZLIEFERUNGEN	32
3.7.1 Angebot FORETNERGIE SA, Montricher.....	32
3.7.2 Angebot Schmuki SA, Lucens	33
3.8 SCHLUSSFOLGERUNGEN ROHSTOFF HOLZ	34

4	PREISE ERNEUERBARE ENERGIE-GASE IN DER SCHWEIZ	35
4.1	BIOGASPREISE SCHWEIZ	35
5	VERFAHRENSTECHNISCHE KONZEPTIONIERUNG DER ANLAGE	36
5.1	HOLZTROCKNUNG	37
5.1.1	Grundlagen zur Holz Trocknung	37
5.1.2	Beschreibung der Verfahrensabschnitte.....	41
5.2	HOLZVERGASUNG	43
5.2.1	Grundlagen der Holzvergasung	43
5.2.1.1	Chemisch-physikalische Vorgänge	43
5.2.1.2	Oxidations- bzw. Vergasungsmittel.....	46
5.2.1.3	Grundbauformen von Vergasern	47
5.2.2	Evaluierung eines geeigneten Holzvergasungssystems	47
5.2.3	Beschreibung des ausgewählten FICFB-Vergasers	52
5.3	METHANISIERUNG	54
5.3.1	Holzgaskonditionierung	54
5.3.1.1	Vortrocknung des Holzgases	55
5.3.1.2	Schwerflüchter-Absorption.....	55
5.3.1.3	Entschwefelung.....	56
5.3.2	Methanisierung.....	56
5.3.2.1	Grundlagen der Wirbelschichtmethanisierung	56
5.3.2.2	Katalysator-Handling.....	58
5.3.3	Roh-SNG-Aufbereitung	58
5.4	HILFSSYSTEME	60
5.5	VERFAHRENSTECHNISCHE AUSLEGUNG.....	63
5.5.1	Verfahrensflussbild	63
5.5.2	Prozesstechnische Auslegung der Anlage.....	64
5.5.3	Verbrauchsmittel	66
5.6	AUTOMATISIERUNGSKONZEPT.....	68
5.7	ANLAGENGESTALTUNG	69
5.7.1	Layout.....	69
5.7.2	Geländeerschliessung	71
6	BUSINESSPLAN.....	72
6.1	ÜBERSICHT INVESTITIONSKOSTEN	72
6.2	ÜBERSICHT BETRIEBSKOSTEN.....	73
6.3	RENTABILITÄTS-BETRACHTUNG	73
6.4	SENSITIVITÄTSANALYSE.....	77
APPENDIX.		79
7	POWER-TO-GAS	80
7.1	WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-GAS?	80
7.2	EIGNUNG VON POWER-TO-GAS FÜR DIE BIO-SNG-ANLAGE?	81
8	NUTZUNG VON BIOGAS IN DER SCHWEIZ	82
8.1	BIOGASERZEUGUNG IN DER SCHWEIZ.....	82
8.2	ZUSÄTZLICHE ÖKOLOGISCHE ASPEKTE DER BIOGASHERSTELLUNG.....	83
8.3	ERDGAS UND BIOGAS ALS BRENNSTOFF	84

8.4	EXKURS: SWISS-SNG VERSUS FERNWÄRME	85
8.4.1	Zukunft der Schweizer Fernwärmenetze	87
8.5	BIO- CO ₂ ALS ZUSATZNUTZEN DER HOLZGASMETHANISIERUNG	89
8.6	ERDGAS UND BIOGAS ALS TREIBSTOFF	90
8.6.1	Erdgas-Fahrzeugbestände	91
8.6.2	Tankstellennetz in der Schweiz	92
8.6.3	Vorteile der aktuellen Erdgas- und Biogasmobilität	93
8.6.4	Fördermodelle für ökologische Mobilität	93
8.7	FISKALISCHE BELASTUNGEN DER ENERGIETRÄGER ERDGAS UND BIOGAS	94
8.7.1	Asymmetrien der Handhabung der verschiedenen Energieträger	94
9	HOLZVERGASUNG	95
9.1	HISTORIE	95
9.2	TECHNISCHE GRUNDLAGEN AUSGEWÄHLTER HOLZVERGASUNGSSYSTEME	95
9.2.1	AGNION	95
9.2.2	MILENA	96
10	FESTBETT- VS WIRBELSCHICHT-METHANISIERUNG	98
10.1	FESTBETTMETHANISIERUNG	98
10.2	WIRBELSCHICHTMETHANISIERUNG	98
10.3	VERFAHREN ZUR ROH-SNG-AUFBEREITUNG	99
10.3.1	Abtrennung von CO ₂ mittels Aminwäsche	99
10.3.2	Trocknung des Roh-SNGs	100
10.3.3	Abtrennung von Wasserstoff mittels Membrantrennverfahren	100
11	UMWELT- UND RISIKOANALYSE	103
11.1	ERDBEBEN	104
11.2	FEUER	104
11.3	EXPLOSION	105
11.4	WASSERVERSCHMUTZUNG	108
11.5	LUFTVERSCHMUTZUNG	108
11.6	AUSTRITT VON GIFTIGEM GAS	109
11.7	VERLETZUNG DES BETRIEBSPERSONALS	109
11.8	AUSWIRKUNGEN AUF FAUNA UND FLORA	109
11.9	AUSWIRKUNGEN AUF DIE MENSCHEN IN DER UMGEBUNG	110
11.10	UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG UND SICHERHEITSVORSTUDIE	110
11.11	BRANDSCHUTZ	112
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	113
13	TABELLENVERZEICHNIS	115
14	LITERATURVERZEICHNIS	116
15	ANLAGEN	117

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BEV	Battery Electric Vehicle
GIS	Geografische Informationssysteme
ha	Hektaren
jato	Jahrestonnen oder Tonnen pro Jahr
MIV	Motorisierter Individualverkehr
SNG	Synthetic Natural Gas
StFV	Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung)
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPV	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung
P2G/PtG	Power-to-Gas

1 EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSLAGE

In einigen Teilen der Schweiz werden Gemeinden unterstützt, welche eine Nachhaltigkeitsstrategie verfolgen und sich insbesondere bezüglich Energie auf ihre eigenen Ressourcen konzentrieren. Vor allem kleinere Gemeinden haben in dieser Beziehung gute Chancen, da neben der Sonne insbesondere viel Wald pro Einwohner zur Verfügung steht.

In solchen ländlichen Gemeinden ist die Einwohnerdichte (pro Fläche) üblicherweise sehr gering. Deshalb ist ein Nah- oder Fernwärmenetz, welches als geschlossener Kreislauf aufzubauen und zu betreiben ist, vergleichsweise teuer (geringe Wärmedichte pro Laufmeter Rohrleitungen ergibt hohe spezifische Strömungs- und Wärmeverluste, erfordert Wärmeisolationen, Rücklaufleitungen, etc.).

Demgegenüber weist eine Gasversorgung, welche lokal und nachhaltig produziertes Erdgas transportieren kann, eine Vielzahl von Vorteilen auf. Sie ist einerseits als einfach geführte Speiseleitung ausführbar und ist andererseits Teil eines Verbundnetzes, was die Flexibilität erheblich vergrössert. Zu guter Letzt sind die Bau- und Betriebskosten einer Gasversorgung um Faktoren geringer, als ein entsprechendes Fernwärmenetz.

Zudem bietet die lokale Einspeisung von erneuerbarem Erdgas in ein bestehendes Gasnetz gegenüber Fernwärme weitere markante Vorteile, indem dieses einerseits ein günstiger Speicher mit einer grossen Kapazität darstellt und andererseits die Energieverteilung über das Gasnetz mit sehr geringen spezifischen Verlusten sowohl lokal als auch über die Region hinaus erfolgen kann.

Insbesondere in ländlichen Gebieten mit dünner Besiedlung und limitiertem Ausbaupotenzial ist die Holzenergienutzung zu Wärmezwecken via Fernwärme teuer und, da wichtige Megatrends gegenläufig verlaufen, zukünftig mit zunehmend erheblichen ökonomischen Risiken verbunden. So rechnet zum Beispiel der Verband 'Fernwärme Schweiz' mit massiv rückläufigem Wärmebedarf pro Quadratmeter Wohnfläche in den kommenden Jahrzehnten (vgl. dazu 8.4). Dies bedeutet, dass ein lokales, in sich gefangenes Wärmenetz stetig neue Bezüger anzuschliessen hat, um eine gleichbleibende Wärmemenge absetzen zu können. Dies induziert progressiv steigende Netzkosten.

Mit der SWISS-SNG-Technologie wird erneuerbares Erdgas aus nicht vergärbaren Biomasse wie Holz und holzartigen Ernterückständen hergestellt. International wurde erkannt, dass die Umwandlung von Holz zu erneuerbarem Erdgas (auch Bio-SNG) erhebliche Vorteile hat (insb. der viel höhere Wirkungsgrad) im Vergleich zur Umwandlung von Holz in flüssige Treibstoffe (Fischer-Tropsch-Diesel bzw. Benzin, Ethanol) sowie als Energieträger im Vergleich zu Pyrolyseöl oder torrefizierter Biomasse sehr flexibel eingesetzt werden kann. Der Schlüsselprozess in dieser Umwandlungskette ist die Methanisierung.

Dieser Prozess wurde am Paul Scherrer Institut (PSI) im Labor und bei Feldversuchen mit Kleinanlagen entwickelt. Eine Pilotanlage mit einer Kapazität von etwa 1 MW_{SNG} wurde im Rahmen des EU-Projekts Bio-SNG beim Biomassekraftwerk in Güssing (Österreich) von der CTU entworfen, errichtet und 2008/09 in Betrieb genommen. Während mehrerer Testreihen konnte gezeigt werden, dass die Hochskalierung vom Labormassstab in den Pilotmassstab gelungen ist: Im Juni 2009 konnte erstmals synthetisches Erdgas mit hoher Qualität entsprechend dem H-Gas (HHV=10,7MJ/Nm³; Wobbe Index 14.5) erzeugt werden, das zur Füllung einer Erdgastankstelle verwendet wurde. Die CTU und das PSI wurden für diese 'Bestleistungen im Energiebereich' mit dem Watt d'Or 2009 des Bundesamtes für Energie (BFE) ausgezeichnet. Seit 2011 ist die CTU der exklusive Kooperationspartner und Lizenznehmer des PSI für die Methanisierungstechnologie.

Mit dem vorliegenden Projekt soll eine Machbarkeitsstudie erstellt werden, welche die Entscheidungsgrundlage bildet für die Realisierung einer ersten 2.67-MW_{Bio-SNG}-Anlage, basierend auf der SWISS-SNG-Technologie. Eine solche Anlage hat einen Holzverbrauch (Frischholz bei 50% Wassergehalt) von ca. 12'500 Tonnen pro Jahr (jato) und erzeugt rund 18'000 MWh erneuerbares Erdgas pro Jahr. Der gesamte chemische Wirkungsgrad beträgt ca. 63,6%.

1.2 ZIEL DIESER STUDIE

Ziel dieses Projekts ist die Erarbeitung einer Machbarkeitsstudie als Grundlage für die Realisierung einer ersten kommerziellen Anlage zur Erzeugung von synthetischem Erdgas (Biogas) aus Holz. Die Anlage soll eine Leistung von 2.67 MW Bio-SNG aufweisen und am Standort Mont-la-Ville (VD) erstellt werden.

Insbesondere stehen dabei die Nutzung der regionalen Holzressourcen sowie die Einspeisung ins lokale Erdgas-Verteilnetz im Vordergrund.

Betrachtet wird die kommerzielle und multiplizierbare Realisierung einer Holzvergasungs- und Methanisierungsanlage am Standort Mont-la-Ville. Dabei wird auf die Allgemeingültigkeit der Erkenntnisse grosses Augenmerk gelegt, um auch weiteren interessierten Gemeinden oder Organisationen eine erste Entscheidungshilfe zu bieten.

1.3 METHODIK

Für die Erstellung der Studie wurde ein systematischer Ansatz nach Abb. 1 gewählt. Die vorliegende Machbarkeitsstudie ist grundsätzlich mit der ersten Stufe der Projektabwicklung identisch. Die Studie widerspiegelt das vorhandene interne Know-how, gibt einen Überblick über die Technik von Drittanbietern und nutzt diese Erkenntnisse zur Erarbeitung und Bewertung eines Verfahrenskonzeptes für die SWISS-SNG-Anlage auf einem zur Abschätzung der Machbarkeit hinreichend detaillierten Niveau. Sie bildet damit die Grundlage für eine fundierte Entscheidungsfindung.

Sie ermöglicht aber auch die Fortführung des Projektes bis hin zum "Detail Engineering" und der Realisierung.

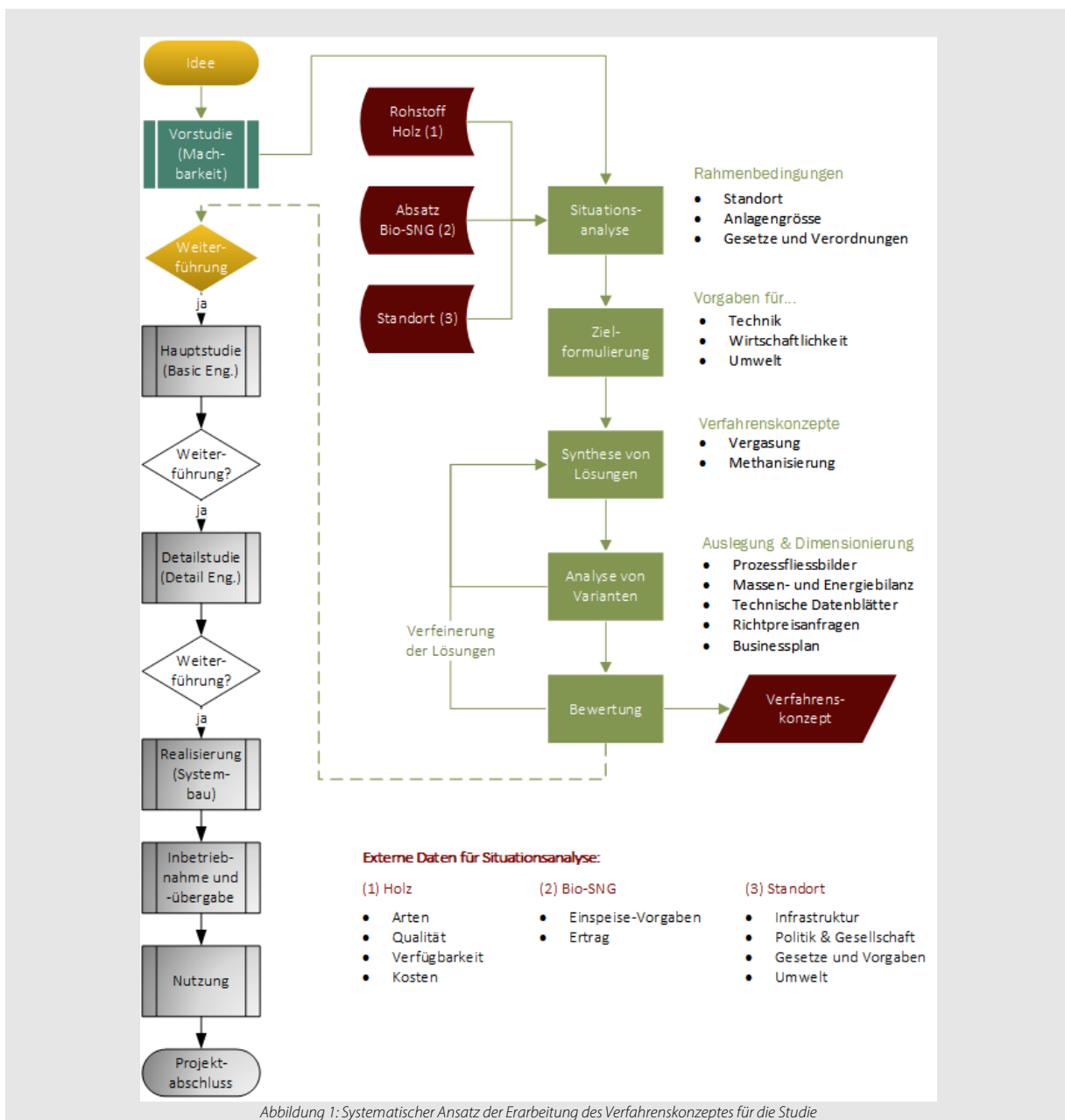


Abbildung 1: Systematischer Ansatz der Erarbeitung des Verfahrenskonzeptes für die Studie

1.4 ERGEBNISSE DER MACHBARKEITSSTUDIE ('DELIVERABLES')

- Standortanalyse für eine 2.67-MW_{BIO-SNG}-Anlage am Standort Mont-La-Ville (VD).
- Absichtserklärungen und/oder Vorverträge für Holzlieferungen für mindestens 12'500 jato entsprechen ca. 35'000 Sm³/Jahr über eine Laufzeit von 10 Jahren.
- Evaluation von möglichen Technologievarianten und deren technische Bewertung, Verfahrensfließbild, Massen- und Energiebilanz sowie Aufstellungsplan und Grobspezifikationen der wichtigen Anlagekomponenten.
- Zusammenstellung der Investitionskosten (+/-15%) und Betriebskosten.
- Businessplan mit Cashflowplan basierend auf Finanzierungsbedarf und Rückzahlungsmodell.

1.5 VORTEILE DER SWISS-SNG-TECHNOLOGIE

Die Methan- aus Holz-Technologie, umgesetzt in der Schweiz, bietet folgende Vorteile:

Erneuerbar und CO₂-neutral

Die SWISS-SNG-Technologie ermöglicht die Nutzung des in der Schweiz in ausreichendem Masse vorhandenen erneuerbaren Rohstoffes Holz. Nebst der Gewinnung von "sauberer" Energie fördert die professionelle und nachhaltige Waldbewirtschaftung Schutz vor Verwaldung, die Biodiversität sowie den natürlichen Schutz vor Bodenerosion, Lawinen und Rüfengängen.

Flexibilität in der Verwendung

Da das Produkt der SWISS-SNG-Technologie Biogas in Erdgasqualität ist, kann nicht nur die bestehende Gasinfrastruktur genutzt werden, sondern es lassen sich auch alle handelsüblichen Gas-Endgeräte mit diesem Energieträger betreiben: Heizungen, Kochherde, Fahrzeuge, Brennstoffzellen, Gasturbinen, etc.

Die SWISS-SNG-Anlage kann wahlweise durch Teilabschaltung auch mit halber Last bei gleichbleibend hohem Wirkungsgrad betrieben werden. Somit ergibt sich eine hohe operative Flexibilität, um auf allfällige Schwankungen auf der Input- und/oder Outputseite reagieren zu können.

Grundlastfähig und speicherbar

Im Gegensatz zu vielen anderen erneuerbaren Energien ist die SWISS-SNG-Technologie sowohl grundlastfähig als auch speicherbar, und zwar holz- wie auch gasseitig.

Regional

Die SWISS-SNG-Technologie ist besonders für eine regionale Umsetzung sehr geeignet, da der Rohstoff aus der Region stammt, die Netze nicht strapaziert werden, die Grauenenergie minimiert wird und zu guter Letzt qualifizierte Arbeitsplätze in Forst und Betrieb geschaffen werden.

Kaum Abwärme bei reiner Gasproduktion

Dank dem vergleichsweise sehr hohen Wirkungsgrad und der prozessinternen Nutzung der Abwärme ist die SWISS-SNG-Technologie praktisch standortunabhängig, d.h., der Standort ist nicht, wie beispielsweise bei der konventionellen Verbrennung von Holz, primär an den Standort des Abwärmeverbrauches gebunden.

'Power-to-Gas'-Fähigkeit

Beim Power-to-Gas-Ansatz (vgl. dazu 7) wird überschüssiger Strom, vor allem aus Wind- und Sonnenkraft, dazu verwendet, mittels Wasserelektrolyse Wasserstoff zu produzieren und bei Bedarf in einem zweiten Schritt unter Verwendung von Kohlendioxid (CO₂) in synthetisches Methan umzuwandeln. Der bei SWISS-SNG eingesetzte Methanisierungsreaktor eignet sich sehr gut, um den Wasserstoff aus der Elektrolyse zu methanisieren, und zwar bei gleichbleibender Verarbeitung von Holzgas (Parallelbetrieb).

Vorteile gegenüber Wärmenetzen

Üblicherweise wird angestrebt, Biomasse mittels Wärmekraftkopplung in Strom und Wärme umzuwandeln. Dabei fällt viel Abwärme an, welche praktisch nur über Nah- oder Fernwärmenetze abgesetzt werden kann. Gleichzeitig wird damit praktisch verunmöglicht, solche Anlagen bei schwachem Wärmekonsum zu fahren, da sie dann nicht wirtschaftlich zu betreiben sind.

Die SWISS-SNG-Technologie löst dieses Problem elegant: Die anfallende Abwärme kann vor Ort direkt intern genutzt werden, insb. zur Trocknung von Holz, und trägt damit zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades bei. Weiter kann Gas verteilt werden anstelle von Wärme, was zu deutlich tieferen Infrastruktur-Investitionskosten führt, sowohl auf der Verteilungsseite (Netz) wie auch bei den Hausinstallationen. Grosser Vorteil ist, dass nur ein Netz aufgebaut werden muss, auch wenn z.B. mit Gas gekocht werden soll. Redundanz und Spitzenabdeckung der Versorgung sind gegeben durch Erdgas. Dies bedeutet, dass die Produktionsanlage dem durchschnittlichen jährlichen Bedarf angepasst werden kann und keine Spitzenauslegung für die Gasproduktionsanlage notwendig ist. Dies ermöglicht einen Bandbetrieb der Anlage und ist somit betrieblich deutlich vorteilhafter.

1.6 WESHALB FÖRDERUNG DURCH DIE ERDGAS-WIRTSCHAFT?

Ziel des Projekts ist es, 2016 eine erste kommerziell betriebene Bio-SNG-Anlage auf Basis der SWISS-SNG-Technologie in Betrieb zu nehmen. Entscheidungsgrundlage für die Errichtung dieser Produktionsanlage/Referenzanlage ist die hier erstellte Machbarkeitsstudie.

Die Machbarkeitsstudie eröffnet die Chance, nach aussen glaubwürdig die strategische Stossrichtung der Erdgaswirtschaft in Richtung erneuerbares Gas zu kommunizieren und gleichzeitig die Konkurrenzenergie Holz auf die eigene Mühle zu lenken.

1.7 VERTRAULICHKEIT

Diese Studie sowie alle Anhänge dürfen nur mit vorheriger, schriftlicher Einwilligung von CTU für andere Zwecke als zur Beurteilung durch den Empfänger bezüglich einer möglichen Finanzierung der Projekt- Entwicklung und Realisation verwendet werden. Die vollständige oder teilweise Vervielfältigung, die Verbreitung, die Modifikation, die Verknüpfung oder die Verwendung für kommerzielle oder öffentliche Zwecke und jede Art der Verwertung ausserhalb der Grenzen des Urheberrechts bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung durch die CTU. Durch den Kauf oder den Empfang dieser Studie wird unter keinen Umständen eine Lizenz zur Nutzung des geistigen Eigentums der CTU erworben.

2 STANDORT-EVALUATION FÜR GEMEINDE MONT-LA-VILLE (VD)

Einleitung

Mont-la-Ville ist eine ländliche Gemeinde im Kanton Waadt mit ca. 350 Einwohnern und einer Gemeindefläche von knapp 20 km². Mont-la-Ville wurde kürzlich ans Erdgasnetz des lokalen Gasversorgers Cosvegaz angeschlossen. Die Gemeinde verfügt über bedeutende Waldbestände, so dass sie früher von den reichen Einkünften der Forstwirtschaft leben konnte und erst ab 1983 Gemeindesteuern erheben musste. Heute möchte Mont-la-Ville ihren Forst wieder verstärkt nutzen und zwar zur möglichst hohen energetischen Selbstversorgung. Aus diesem Grunde sowie der kürzlich erfolgten Erschliessung mit Erdgas hat sich die Gemeinde und der lokale Versorger Cosvegaz sehr interessiert gezeigt, die Möglichkeiten der Gewinnung von erneuerbarem Erdgas (Bio-SNG) aus Holz zu prüfen.

Der Platzbedarf ergibt sich einerseits aus der benötigten Fläche für die eigentliche Anlage, im Wesentlichen bestehend aus Vergaser und Methanisierungseinheit, andererseits jedoch auch aus der für den Betrieb notwendigen Lager- und Manövrielfläche.

Für eine Anlage mit einer Leistung von 2.67 MW_{Bio-SNG} wird unter der Annahme, dass die Vor-Ort Lagerkapazität von Holz für 48 Stunden ausreichen soll, eine Fläche von ca. 3'000 m² benötigt.

Aufgrund der anlagentechnischen Vorgaben hat die Gemeinde Mont-la-Ville einen möglichen Standort im Raum Mont-la-Ville zur Disposition gestellt.

Nachfolgend wird der seitens der Gemeinde favorisierte Anlagenstandort 'Champs de la Pierre' einer detaillierten Standortanalyse unterzogen.

2.1 SITUATION VOR ORT

Das südwestlich der Gemeinde Mont-la-Ville gelegene Flurstück 247 ist im Relief des Jurabogens eingebettet, der gemäss der Typologie des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE als „hügelige Landschaft des Faltenjuras“ bezeichnet wird.

Diese vorwiegend landwirtschaftlich genutzte Anhöhe befindet sich in einer grossflächigen, von Wäldern geprägten Region zwischen dem Wald von Saint-Marie und dem Wald von Ban. Durch Gehölzsäume abgegrenzte Wasserläufe prägen die nach Südwesten ausgerichtete Anhöhe. Die nächste Ortschaft, „La Coudre“ (Gemeinde L'Isle), ist ca. 500 m entfernt und liegt ca. 50 m höher.

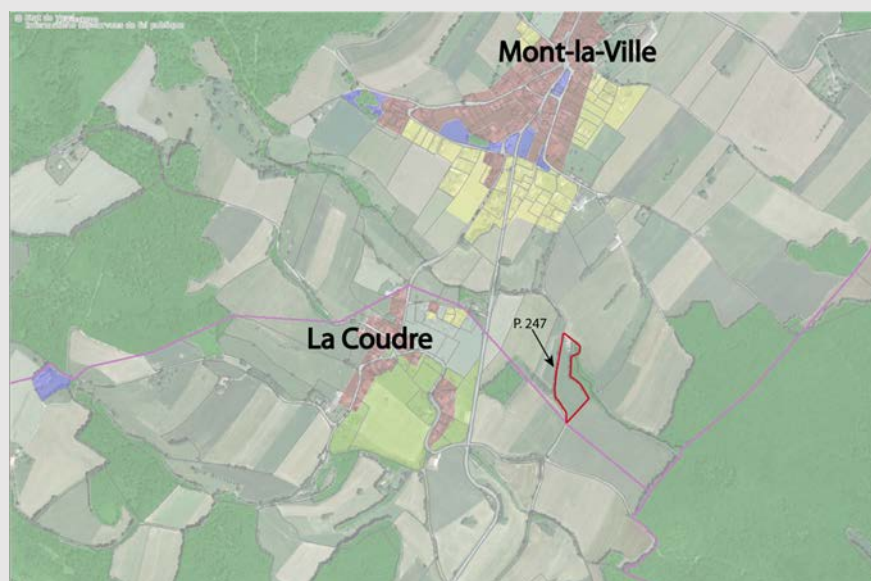


Abbildung 2: Lokalisierung des Flurstücks 247 und Zonen
(Quelle: Geoplanet)

Im Osten grenzt ein dem Waldareal zugeordneter Gehölzsaum das Flurstück 247 ab. Im Westen trennt ein landwirtschaftlicher Weg das Flurstück von den angrenzenden Feldern. Am Rande dieses Weges stehen Pflanzen, die in das Flurstück 247 hineinwachsen. Im Süden öffnet sich das Flurstück auf die landwirtschaftlich genutzte Anhöhe. Auf dem Nordteil des Flurstücks steht die Kläranlage von Mont-la-Ville. Der Zufahrtsweg zur Kläranlage bildet die Nordgrenze des Areal. Das nordöstliche Ende ist Teil des Waldareals.



Abbildung 3: Flurstück 247, Massstab 1:2000
(Quelle: Geoplanet)

2.2 KATASTEREINTRAGUNGEN UND ZUORDNUNG

Das Flurstück 247 hat eine Gesamtfläche von 13 677 m² und gehört der Gemeinde Mont-la-Ville an. Es besteht aus 608 m² Waldareal, der Rest ist der landwirtschaftlichen Zone zugeordnet. Es ist Teil der Fläche 4 des kantonalen Richtplans Venoge. Die auf der landwirtschaftlichen Zone stehende Kläranlage besteht aus einem dem Verkehr vorbehaltenen Areal von 646 m² und 2 Gebäuden von jeweils 71 m² und 21 m². Gemäss den Informationen der Generaldirektion für Umwelt (GDE) des Kantons Waadt (Herr Jaqueroz) wird diese Anlage früher oder später ausser Betrieb gesetzt. Eine Verbindung zur Kläranlage von L'Isle wurde bereits durchgeführt, jedoch müssen die Abwässer dieser Gemeinde ebenfalls woanders in einer neuen Anlage geklärt werden, die in La Sarraz gebaut werden soll. Schätzungsweise wird dieses Bauvorhaben in einer Frist von 10 Jahren realisiert.

2.3 STRASSENANBINDUNG

Das Areal kann ab der Kantonalstrasse KS 151b befahren werden, deren Werk-tagsverkehr auf ca. 1 800 Fahrzeuge (nach Angabe des Strassenmeisters) geschätzt wird. Zu dieser Einmündung gehört keine Abbiegespur. Sie liegt ausserhalb der Ortschaft, so dass Geschwindigkeit auf 80 km/h begrenzt ist. Talwärts begrenzt ein Erdhügel die Sicht.



Abbildung 4: Einmündung des Zufahrtsweges auf die Kantonsstrasse

Nach Verlassen der KS ist die Zufahrt bis zur Kläranlage ca. 350 m lang. Derzeit ist sie für LKW gesperrt. Die geteerte Fahrbahn ist ca. 3 m breit. Im Kataster ist der Weg als öffentlicher Raum (ÖR) der Gemeinde eingetragen. Der ÖR 25 ist 4 m breit, und die variable Breite des ÖR 56 beträgt 4 bis 5 m. Ausserdem ist festzustellen, dass der unterhalb der Kreuzung mit dem ÖR 47 liegende ÖR 56 im Fussweginventar eingetragen ist.

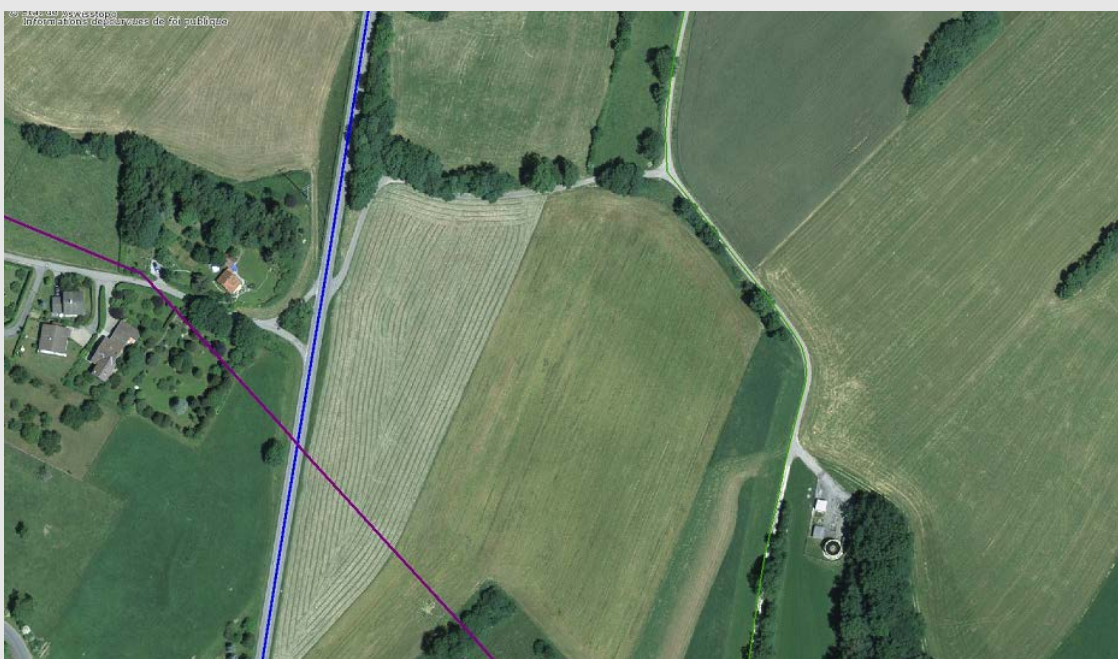


Abbildung 5: Zufahrtsweg zur Kläranlage

2.4 NACHWEIS

Die heimische Produktion erneuerbarer Energien gewährleistet eine sichere und verlässliche Versorgung. Sie ist ein zentrales Thema der nationalen und kantonalen Energiepolitik. Die öffentliche Förderung entspricht auch den rechtlichen Energievorgaben und der Raumordnung:

„Anlagen zur Produktion erneuerbarer Energien sind von entscheidender Bedeutung (kantonales Energiegesetz (VD), Art. 16a, Abs. 2, 2013)“

„Der Kanton (...) fördert den Einsatz erneuerbarer Energien (...). Die Produktionsstandorte liegen in den Gebieten, welche die besten Voraussetzungen für die Produktion anbieten“ (Richtplan des Kantons Waadt (PDCn), Massnahme F51)

Die Energieproduktion mit heimischem Holz entspricht voll und ganz den Zielen der oben erwähnten öffentlichen Politik.

Das Gebiet von Mont-la-Ville liegt inmitten einer grossflächigen, von Wäldern geprägten Region mit guter Strassenanbindung. Diese örtliche Begebenheit bietet optimale Bedingungen für die Produktion. Auf infrakommunaler Ebene entspricht die Wahl des Flurstücks 247 den zur Gewährleistung der Lebensfähigkeit der Anlage unverzichtbaren Bedürfnissen:

- Fläche gleich oder grösser 3'000 m²;
- Nähe zur Gasfernleitung, in welche das Biogas gespeist wird;
- Strassenanbindung vorhanden;
- Begrenzte landschaftliche Belastungen auf Grund der Topographie und des Baumbestands;
- Entfernung von Wohnzonen;
- Konzentration der Aktivitäten auf einem bereits mit einer technischen Anlage ausgestatteten Standort.

Somit wird in Übereinstimmung mit Artikel 50a, Abs. b vorgeschlagen, das Flurstück als Sondergebiet auszuweisen, damit diese spezifische Tätigkeit ausgeführt werden kann.

2.5 KONFORMITÄT

2.5.1 Technische Sachzwänge

Zuordnungsverfahren

Das Flurstück wird der landwirtschaftlichen Zone und marginal dem Waldareal zugeordnet. Die landwirtschaftliche Zone ist nicht bebaubar. Ein Zuordnungsverfahren ist unerlässlich.

Gemäss Art. 50a LATC (Raumplanungs- und Baugesetz vom 4. Dezember 1985) impliziert der spezifische Charakter des Projekts eine Zuordnung als Sondergebiet.

Zu ergreifende Massnahmen:

Um vorläufige Zustimmung des Kantons Waadt ersuchen, damit ein Teilnutzungsplan bezüglich des Sondergebietes aufgestellt werden kann.

Zufahrt (gemäss Gespräch vom 7. Mai 2014 mit dem Strassenmeister)

In den Normen des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS sind unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeiten Mindestbreiten für Fahrbahnen vorgeschrieben.

Folgende Angaben sind zu beachten

Bei Einbahnverkehr beträgt die Mindestbreite für einen Lastwagen:

Zu erzielende Geschwindigkeit	Ohne Rand	Mit Rand
0-20 km/h	2.80 m	3.10 m
30km/h	3.00 m	3.30 m

Bei gegenläufigem Verkehr beträgt die Mindestbreite für das Kreuzen von 2 LKW:

Zu erzielende Geschwindigkeit	Ohne Rand	Mit Rand
0-20 km/h	5.60 m	6.20 m
30km/h	6.00 m	6.60 m

Durchfahrtsöffnung: Die Breite der Fahrbahn (3 m) ist für gegenläufigen LKW-Verkehr nicht ausreichend. Der Zufahrtsweg wird durch die Landwirtschaft befahren und ist im entsprechenden Inventar teilweise als Fussweg aufgeführt. Nach Durchführung einer entsprechenden Studie ist die Durchfahrtsöffnung der Strasse nach Bedarf anzupassen, damit die Spuren zwischen der Landwirtschaft und den Fussgängern optimal aufgeteilt werden können. Kreuzungspunkte sowie der Bau einer den Fussgängern vorbehaltenen Spur sind zu prüfende Massnahmen.

- Tragfähigkeit: Die Tragfähigkeit des Weges im täglichen LKW-Verkehr ist zu prüfen.
- Einmündungen: Für LKW's muss die Sicht („sehen und gesehen werden“) in Höhe der Einmündung der Kantonsstrasse optimal sein. Die hindernisfreie Zone muss eine Mindestsicht von 150 bis 200 m gewährleisten.

Bei der Vorabprüfung der Planungsakte wird das Departement die Machbarkeitsanalyse der Zufahrt abfassen. Alle Verfahren im Hinblick auf die Gewährleistung der Zufahrt sind spätestens beim öffentlichen Einspruchsverfahren im Rahmen des Teilnutzungsplans durchzusetzen.

Zu ergreifende Massnahmen:

Einen Verkehrsbauingenieur damit beauftragen, die mit der Zuordnung des Geländes zu koordinierenden Massnahmen und Verfahren bezüglich der Strassen zu identifizieren.

2.5.2 Umweltauflagen

Umweltbelastungen

Gemäss Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV, Anhang 1, Nr. 21.2) ist für Anlagen zur Produktion von Wärmeenergie oder pyrolytischer Energie in folgenden Fällen eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen:

- Leistung höher als 100 MWth für fossile Energien;
- Leistung höher als 20 MWth für erneuerbare Energien;
- Leistung höher als 20 MWth für kombinierte Energien (fossile und erneuerbare Energien).

Die Leistung der geplanten Anlage ist deutlich niedriger als die durch die UVPV definierten Schwellwerte.

Zu ergreifende Massnahmen:

Die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung ist nicht erforderlich.

Verhütung gravierender Unfälle

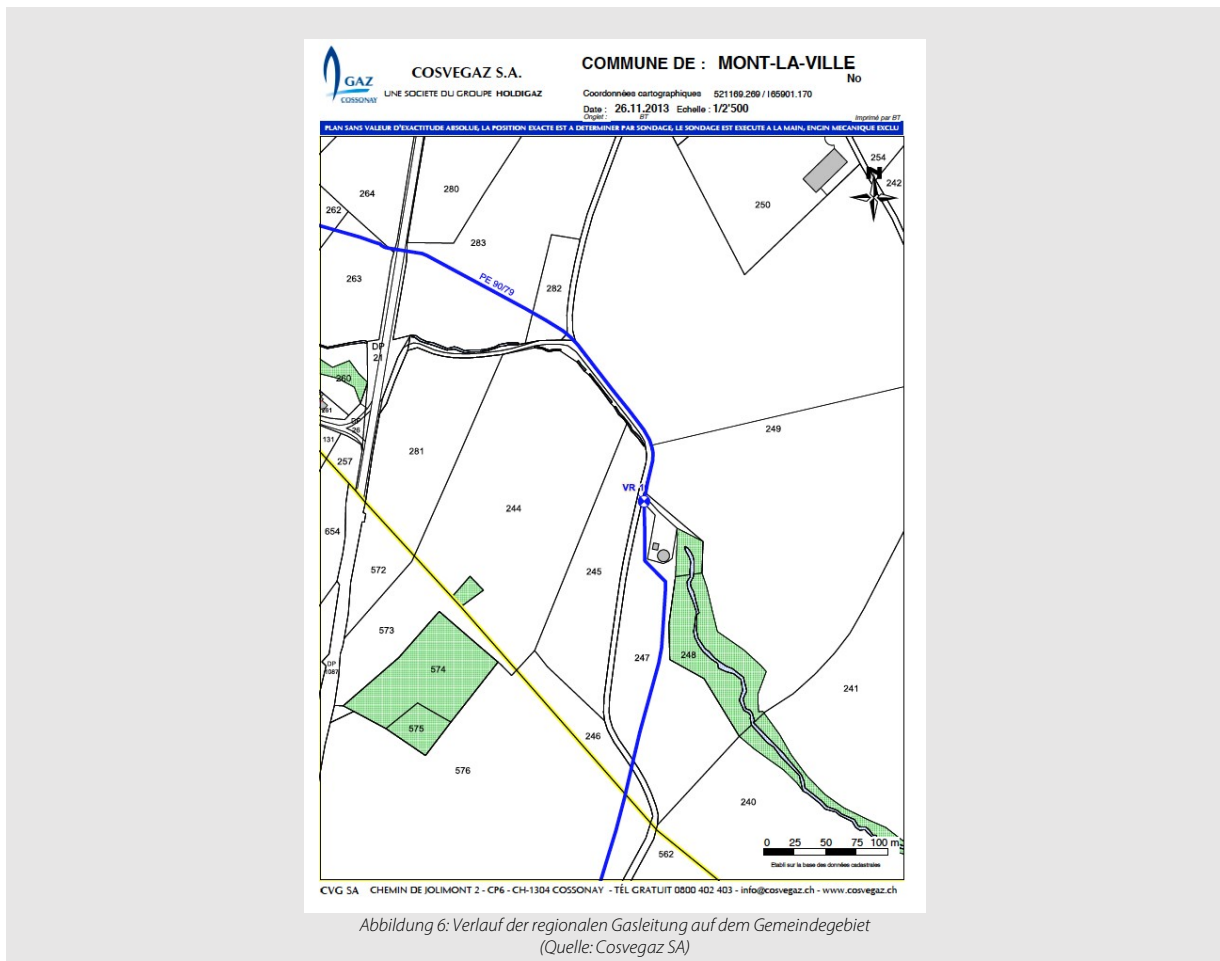
In der Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV, Anhang 1, Ziffer 3), sind die quantitativen Schwellwerte für gefährliche Produkte definiert, über welche hinaus eine Risikoanalyse erforderlich ist.

Nachstehende Vergleichstabelle zeigt auf, dass das Projekt die Schwellwerte nicht erreicht, die eine StFV-Untersuchung erforderlich machen würden:

Stoff	Schwellwert (StFV)	Lokalisierung und laut Projekt zu erwartende Menge	
Wasserstoff (H ₂ O)	5'000 kg	Reserve und Anlage	< 100 kg
Nickel (Ni)	2'000 kg	Katalysator + Nachfüllpack	~ 500 kg
Kohlenmonoxid (CO)	2'000 kg	Vergaser, Biokonverter	~ 300 kg
Ammoniak (NH ₃)	2'000 kg	Vergaser, Biokonverter, Denox System	~ 100 kg
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	200 kg	Vergaser, Aktivkohle	< 5 kg

Tabelle 1: Vergleich zwischen den zu erwartenden Mengen und den StFV-Schwellwerten

Die Einspeisung des Biogases in die Gasfernleitung erfolgt unter Beachtung der anwendbaren Vorschriften. Eine geringfügige Verlegung der Gasfernleitung wäre zu planen.



Zu ergreifende Massnahmen:

Unter Vorbehalt weiterer zu beachtender Vorschriften erweist sich, dass eine StfV-Studie nicht notwendig ist.

Landwirtschaftliche Flächen

Das Flurstück 247 wird der landwirtschaftlichen Zone und dem Waldareal zugeordnet. Der in der landwirtschaftlichen Zone gelegene Teil ist nicht als Fruchtfolgefläche (FFF) inventarisiert.

Auf Grund der am 1. Mai 2014 eingetretenen Rechtskraft der Übergangsmassnahmen aus der Bundesverordnung über die Raumplanung (RPV, Art. 52a, Abs. 2) bedarf es zur Einzonung von Landwirtschaftsland in Bauland der gleichzeitigen Auszonung von Bauland gleicher Grösse. Diese Übergangsmassnahme ist bis zur Genehmigung des angepassten Richtplans des Kantons Waadt durch den Bund wirksam.

Jedoch ist im vorliegenden Fall die Frage des Ausgleichs nicht anwendbar, da die Zuordnung als Sondergebiet der Zuordnung als Bauland nicht gleichzustellen ist.

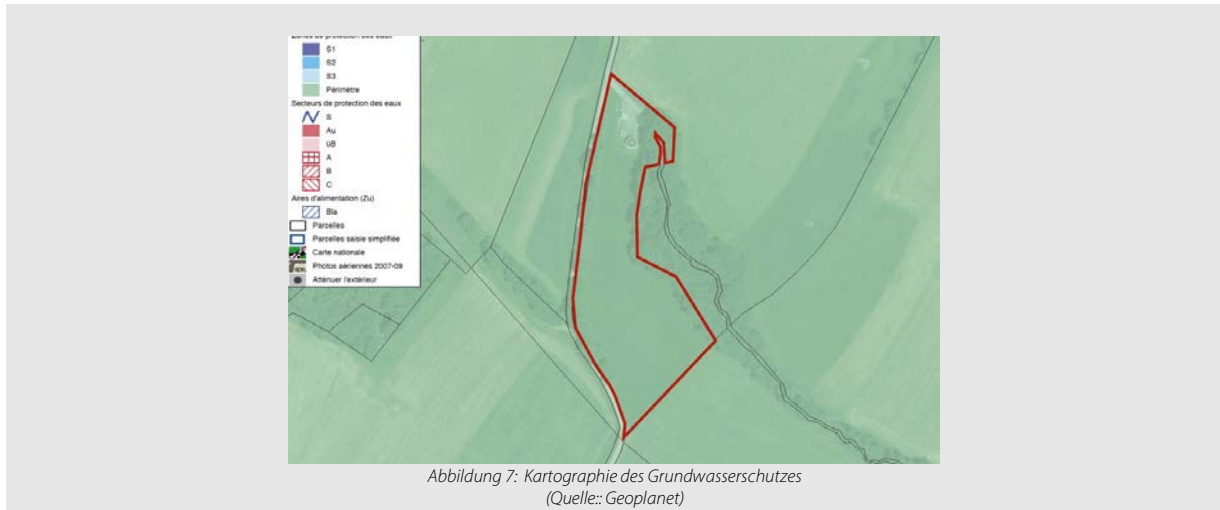
Zu ergreifende Massnahmen:

Es sind keine Massnahmen zu ergreifen.

Wasser – (gemäss Telefonaten vom 8. Mai 2014 mit Herrn Poget und Herrn Lavanchy)

Grundwasser

Das Flurstück 247 liegt oberhalb des Trinkwasserentnahmestroms von La Vuichime, der auf dem Areal der Gemeinde Cuarnens ca. 1.5 km vom Flurstück 247 entfernt liegt. Aus diesem Grunde befindet sich das Teilgebiet, auf dem das Flurstück 247 liegt, im Grundwasserschutzgebiet S (auf unten stehender Abbildung in grün).



Dieser Einzonung entsprechend ist das Flurstück derzeit nicht bebaubar. Zur genaueren Eingrenzung der Schutzstufe des Grundwasserschutzes müsste der Eigentümer der Grundwasserentnahmestelle in der Umgebung des Brunnens eine Studie durchführen. Die noch nicht geplante Studie würde nach folgender Einzonung die genaueren Schutzstufen einzugrenzen erlauben:

- Zonen S1 und S2, in denen das Gelände nicht bebaubar ist;
- Zone S3, in dem das Gelände unter Vorbehalt der Beachtung der Gewässerschutzverordnung (GSchV, Anlage 4, Ziffer 221) bebaubar ist:

In Zone S3 nicht erlaubt sind:

- a) Industrie- und Handwerksbetriebe, die für das Grundwasser ein Risiko darstellen;
- b) Überbauungen, die das Speichervolumen oder den Durchflussquerschnitt des Grundwasserleiters verringern;
- c) Abwasserversickerungen, mit Ausnahme von nicht verunreinigtem Wasser (Art. 3, Abs. 3), durch eine biologisch aktive Bodenschicht;
- d) die deutliche Verringerung der schützenden Abdeckschichten;
- e) die dem Rohrleitungsgesetz vom 4. Oktober 1963 unterworfenen Leitungen 97, mit Ausnahme der Gasleitungen;
- f) die Wärmekreisläufe, die Wärme aus dem Untergrund entnehmen oder in diesen eintragen;
- g) die unterirdischen Tanks und Leitungen, die wassergefährdende Flüssigkeiten enthalten;
- h) wassergefährdende Flüssigkeiten enthaltende Tanks mit Nutzinhalt über 450 l pro Schutzbauwerk, mit Ausnahme von nicht unterirdischen Tanks für Heizöl und Dieselöl zur Energieversorgung von Gebäuden oder Betrieben für maximal 2 Jahre; der Nutzinhalt dieser Tanks darf pro Schutzbauwerk nicht über 30 m³ liegen;
- i) Betriebsanlagen, die wassergefährdende Flüssigkeiten enthalten, mit einem Nutzinhalt über 2.000 l.

Die Verwendung von Holzschutz- und Pflanzenschutzmitteln sowie Düngern unterliegt ChemRRV, Anlagen 2.4, Ziffern 1,2,5 und 2.6.

Zu ergreifende Massnahmen:

- Organisieren eines Arbeitstreffens zwischen der zuständigen Dienststelle, dem Brunnenbetreiber und der Firma CTU zwecks Prüfung, ob das Projekt der Zone S3 konform ist;
- Kontaktaufnahme mit dem Brunnenbetreiber zwecks Prüfung, ob eine Studie geplant ist und in welcher Frist;
- Beauftragung eines Beratungsbüros für Hydrogeologie zwecks Identifizierung der Wasserschutzstufe auf dem Flurstück 247;

Oberflächenwasser

Der kantonale Richtplan Venoge (Art. 20) unterstützt den Bau von Oberflächen-wasserspeicheranlagen.

Zu ergreifende Massnahmen:

Die Versickerung begünstigen und ein Rückhaltesystem planen, falls das in den Wasserlauf einzuleitende Volumen über den zulässigen Schwellwerten liegt.

Wasserentsorgung

Das Areal muss mit dem Kanalisationsnetz verbunden sein. Gemäss den erfolgten Kontaktaufnahmen ist zwecks Abwasserentsorgung ein Sammelbecken vorhanden.

Zu ergreifende Massnahmen:

Gemeinde kontaktieren, um sich das Vorhandensein des Sammelbehälters belegen zu lassen oder falls notwendig das Grundstück entsprechend auszustatten.

Luft

Der von der Anlage vorgesehene Filter gewährleistet, dass die Vorschriften der Luftreinhalteverordnung (LRV) bezüglich des Verbrennens von Holz eingehalten sind.

Boden

Gemäss Angaben des Geoportals ist das Areal nicht verunreinigt

Zu ergreifende Massnahmen: Keine.

Naturgefahren (gemäss Gespräch vom 29. April mit der DGE-GEODE - Generaldirektion für Umwelt, Geologie, Böden und Abfälle)

Aus geologischer Sicht geht vom Areal keine Gefahr hervor.

Aus hydrologischer Sicht zeigt die vom Kanton Waadt aufgestellte Gefahrkartographie im Norden des Flurstücks eine mittlere bis starke Überflutungsgefahr. Gemäss den von der DGE-GEODE übermittelten Angaben ist eine Risikoanalyse im Falle einer Ansiedlung in der Zone, die eine „starke“ Überflutungswahrscheinlichkeit (in u. s. Landkarte, in dunkelblau) aufweist, notwendig.

Zu ergreifende Massnahmen:

Im Falle einer Ansiedlung in der Zone, die eine „starke“ Überflutungswahrscheinlichkeit aufweist: Risikoanalyse erstellen und Überflutungsschutzmassnahmen definieren.



Abbildung 8: Karte der Überflutungsgefahren

Abfälle, umweltgefährdende Stoffe

Nach heutigem Kenntnisstand werden im Rahmen dieser Aktivität keine spezifischen Abfälle oder umweltgefährdenden Stoffe produziert.

Zu ergreifende Massnahmen:

Gegebenenfalls mit der zuständigen Dienststelle definieren.

Lärm

Gemäss Art. 43 der Lärmschutzverordnung (LSV) ist Bauland eine Lärmempfindlichkeitsstufe (LES) zuzuweisen. In vorliegendem Fall ist eine LES IV, entsprechend einer Nutzung gewerblicher Art, vorzusehen.

Die Anlage entwickelt Lärm. Die Quellen rühren vom Strassenverkehr, vom Vergasungsprozess sowie vom Vorhandensein von Motoren und sonstigen Ventilatoren her.

Auf Grund der Entfernung zwischen der Anlage und den Wohnzonen sind gegen diese Lärmemissionen keine Lärmschutzmassnahmen zu ergreifen.

Zu ergreifende Massnahmen:

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand macht die Anlage keinerlei Lärmschutzmassnahmen notwendig.

Forst

Gemäss Waldgesetz (Art. 17, Abs. 2 WaG) obliegt es den Kantonen, die angemessene Maximalentfernung zwischen Bebauungen sowie Anlagen und dem Waldrand festzulegen. Im Kanton Waadt beträgt diese Entfernung 10 m.

Ausserdem verlangt das Departement das Vermessen des vor Bauland liegenden Waldrains. Ziel dieser Massnahme ist, die Grenze des Waldes unabhängig seiner späteren Entwicklung festzulegen.

Zu ergreifende Massnahmen:

- Beauftragung eines Vermessers zur Aufnahme des Waldrains
- Ansiedlung der Gebäude mit einem 10 m grossen Abstand zum Waldrain

Flora, Fauna und Biotope

Gemäss den verfügbaren Quellen bedeckt das Flurstück keine inventarisierten Objekte des Bundes oder des Kantons auch keine Gebiete mit vorrangigem ökologischem Wert (territoires d'intérêt biologique prioritaires, TIBP) und keine biologischen Verbindungen, die im kantonalen ökologischen Netzwerk (réseau écologique cantonal, REC) aufgeführt sind. Hingegen muss Folgendes in die Überlegungen über das Areal einfließen:

- das Gebiet mit höherem biologischem Wert (territoire d'intérêt biologique supérieur, TIBS) des REC;
- der Parc naturel régional Jura vaudois (PNRJ);
- das Vorhandensein eines Biotops im Waldareal

Zu ergreifende Massnahmen:

Das Gebiet mit höherem biologischem Wert ist eine nachrangige Schutzpriorität. Es sind Empfehlungen zur Begrenzung der Hindernisse auf den Durchgangswegen der Wildtiere auf der Projektfläche vorzusehen. Im Projekt müssen die Vorschriften der Charta 2013-2022 des PNRJ Beachtung finden. In der Nähe des Biotops ist eine begrenzte Beleuchtung vorzusehen.

2.5.3 Landschaften und Ortsbilder

Zur Erinnerung finden Sie nachstehend die Masse der Hauptbebauung:

- > Länge: 54 m
- > Tiefe: 14 m
- > Höhe: 15 m

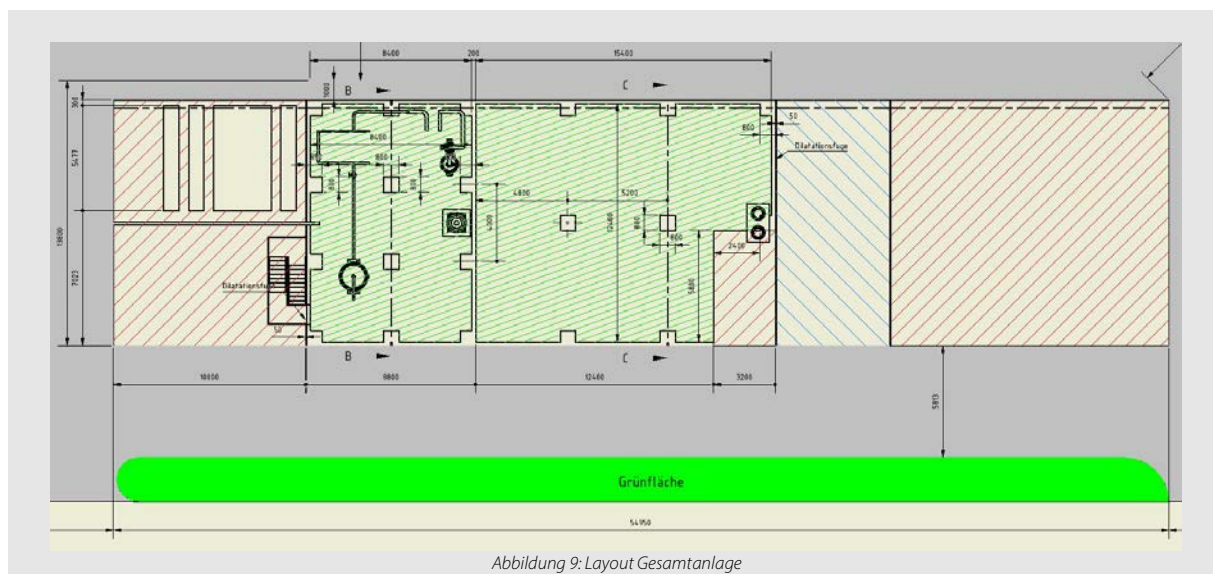


Abbildung 9: Layout Gesamtanlage

Baudenkmäler und archäologische Stätten

Die einzige in der Gemeinde vorhandene Stätte von archäologischem und paläontologischem Wert ist das sogenannte „Abri Freymond“ (PNRJ, S. 27). Es befindet sich nicht in der Nähe des Flurstücks 247.

Zu ergreifende Massnahmen:

Integrationsmassnahmen bezüglich der Gebäude (Fassadenversatz, Fassadenfarbe) sowie Sichtblenden sind bei Erstellung des Teilnutzungsplans zu untersuchen, um im grossen landschaftlichen Rahmen die Belastungen durch die Anlage zu begrenzen, insbesondere von der Kantonstrasse aus.

2.5.4 Übersicht der Sachzwänge

Die Sachzwänge sind nachstehend in einer Tabelle zusammengefasst, aus der die Auswirkungen hervorgehen. Des Weiteren zeigt ein Plan die nicht bebaubaren Areale.

Sachzwangart	Notwendige Studie	Wahrscheinlicher starker Sachzwang	Anmerkung
Raumplanung	X	-	-
Zufahrt	X	-	Sicherheitsmassnahmen bzgl. Strassen und Tragfähigkeit
Umweltbelastungen	-	-	-
Schwere Unfälle	-	-	-
Landwirtschaftliche Flächen	-	-	-
Wasser	X	X	Das Projekt ist nur dann akzeptabel, wenn es mit der Zone S3 kompatibel ist und die hydro-geologische Studie das Teilgebiet als Zone S3 definiert
Böden	-	-	-
Naturgefahren	-	-	-
Abfälle	-	-	-
Lärmbelästigung	-	-	-
Wald	X	-	Vermessung des Waldrains
Fauna	-	-	-
Denkmäler-Landschaft	X	-	Studie im Rahmen des Teilnutzungsplans

Tabelle 2: Zusammenfassung der Sachzwänge

2.5.5 Zwänge bezüglich der Ansiedlung

Nachstehende Landkarte zeigt auf, dass Anpassungen des Projektes noch notwendig sind. Es soll sich dahingehend integrieren, dass die überbaute Fläche maximal begrenzt wird. Die in einigen Bereichen vorgesehenen Anlagen ragen nämlich in den Waldrandbereich hinaus, der nicht bebaubar ist.

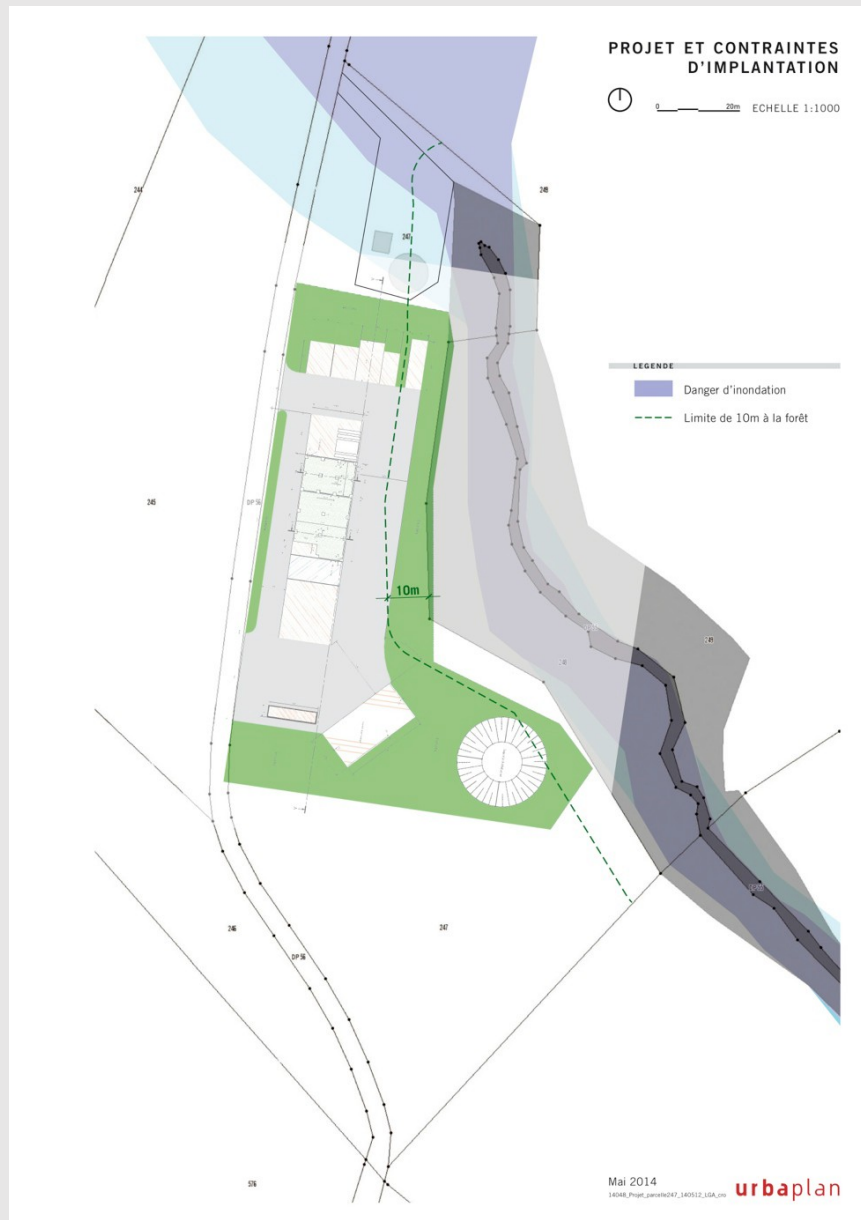


Abbildung 10: Projekt und Sachzwänge bezüglich der Ansiedlung

2.5.6 Bundesgesetz über die Raumplanung

Unter Vorbehalt der Anwendung der revidierten RPV berücksichtigt das Projekt bezüglich der Raumplanung die Ziele und Prinzipien aus dem Bundesgesetz über die Raumplanung den 8 Hauptthemen entsprechend (Artikel 1 und 3 RPG, Raumplanungsgesetz):

- Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen.
- Schaffung und Erhalt der harmonisch gestalteten Siedlungen.
- Entwicklung des sozialen Lebens und Dezentralisierung.
- Erhalt der Beschaffungsquellen.
- Orientierung der Siedlungsentwicklung ins Innere der Siedlungen, ohne die Qualität des Lebensraumes zu verringern.

- Schaffung einer kompakten Siedlung.
- Sinnvolle Aufteilung der Wohn- und Arbeitsorte sowie Planung vorrangig auf Standorten, die mit öffentlichen Verkehrsmitteln gut erreichbar sind.
- Auf Bauland: Zur besseren Nutzung von Brachland, von ungenügend genutzten Flächen oder von Möglichkeiten zu Verdichtung von Lebensräumen Massnahmen ergreifen.

2.5.7 Richtplan des Kantons Waadt

Das Projekt geht mit den Vorgaben des Richtplans des Kantons Waadt konform. Es entspricht vollumfänglich den Zielsetzungen der Massnahme F51 „Energieressourcen und rationeller Energieverbrauch“.

2.5.8 Regionaler Richtplan des Bezirks Morges

Eine Studie des Regionalen Richtplans des Bezirks Morges wurde 2011 mit dem Ziel initiiert, die groben Richtlinien der regionalen Entwicklung zu definieren. Der strategische Teil ist in Arbeit. Vorliegendes Projekt ist in allen Teilen mit dem Projekt des Regionalen Richtplans des Bezirks Morges kompatibel.

2.5.9 Kantonaler Richtplan Venoge

Die Gemeinde Mont-la-Ville ist im kantonalen Richtplan Venoge enthalten. Das Gebiet gehört zur Fläche 4 „Wassereinzugsgebiet Venoge“, für das folgende Schutzmassnahmen getroffen wurden:

- Sanierungsmassnahmen (Verbot, Schadstoffe einzuleiten und versickern zu lassen und Verbot, entlang der Ufer unkontrolliert Abfälle abzulagern)
- Fortführung des laufenden Programms zur Abwasserbehandlung
- Verbot, landwirtschaftliche Schadstoffe einzuleiten
- Begrenzung der Konzentration des in Wasserläufe eingeleiteten Oberflächenwassers
- Unterstützung beim Bau von Oberflächenwasserspeichieranlagen
- Verbot, Grund- sowie Quell- und Brunnenwasser zu entnehmen, ausser für die Einspeisung in die Hauptverteilernetze

Aus dem Projekt gehen keine Belastungen für das Grundwasser hervor. Die Behandlung des Oberflächenwassers muss sich nach o.g. Prinzipien richten und folglich ist eine Rückhalte- und Versickerungsvorrichtung für das Oberflächenwasser vorzusehen.

2.6 VORGEHENSWEISE

2.6.1 Planungen und parallel laufende Studien

1. Vorläufige Zustimmung (2 Monate)

- Zustellung des vorliegenden Dokuments an die Behörde zwecks Konsultation

2. Überprüfungen (noch zu definieren)

- Vereinbarung mit der zuständigen Stelle bezüglich des Prinzips, das Projekt unter Vorbehalt einer hydrogeologischen Studie durchzuführen
- Kick-Off für die hydrologische Studie
- Besprechungen mit der Gemeinde im Rahmen der Suche nach Ausgleichsflächen

3. Aufstellen des Teilnutzungsplans zwecks Zuordnung als Sondergebiet (2 Monate)

A. Zusammenstellen der für den Teilnutzungsplan benötigten Unterlagen:

- Bestellung eines Katasterplanes
- Zusammenstellen der Unterlagen (Plan, Ordnung, R47OAT)

4. Vorausgehende Prüfung (3 Monate)

5. Letzte Kontrolle (1 Monat)

6. Öffentliches Einspruchsverfahren und Nachfassaktion (2 Monate)

- Öffentliche Informationsveranstaltung
- Öffentliches Einspruchsverfahren im Rahmen des Teilnutzungsplans (30 Tage)
- Bearbeitung der Einsprüche
- Einigungsverhandlungen

7. Genehmigung durch den Gemeinderat (2 Monate)

- Niederschrift der Vorankündigung
- Genehmigung durch den Gemeinderat

8. Vorausgehende Zustimmung (2 Monate)

- Unterschrift durch die Vorsteherin des Departements
- Einspruchs- und Referendumsfrist (30 Tage)

9. Inkrafttreten

Insgesamt dauert der Prozess nach Eingang der vorläufigen Zustimmung des Bundes bis zum Inkrafttreten des Plans ca. ein Jahr. Diese Planung erfolgt unter Vorbehalt der folgenden Punkte:

- Hydrogeologische Studie
- Vorausgehende Prüfung durch die Dienststellen
- Anzahl der eingereichten Einsprüche

3 ROHSTOFF HOLZ

3.1 KLASSIFIZIERUNG VON HOLZ

Die Klassifizierung der wichtigsten Energieholzsortimente erfolgt üblicherweise nach den folgenden Kriterien:

1. Klassifizierung nach physischer Form

- Stückholz
- Schnitzel
- Pellets

2. Klassifizierung nach Herkunft

- Waldholz
- Landschaftsholz
- Restholz
- Altholz

3. Klassifizierung nach Luftreinhalte-Verordnung LRV

- Holzbrennstoffe
 - o Naturbelassenes Holz
 - o Restholz
- Nicht-Holzbrennstoffe
 - o Altholz
 - o Problematische Holzabfälle

Für die Planung der SWISS-SNG-Anlage in Mont-la-Ville werden grundsätzlich Schnitzel aus naturbelassenem Holz in Form von Wald- oder Landschaftsholz betrachtet. Restholz wäre bei entsprechender Verfügbarkeit nutzbar und könnte sich, je nach Marktlage, positiv auf den durchschnittlichen Holzpreis auswirken. Von der Verwendung von Altholz ist aus anlage- und bewilligungstechnischer Sicht abzusehen.

3.2 METHODIK

Methodisch geht die vorliegende Studie davon aus, dass das für das Projekt LIGNOGAZ benötigte Energieholz ausschliesslich aus dem Kanton Waadt stammt und ausschliesslich aus dem Sortiment „Waldholz“ besteht. Wegen der geografischen Nähe wird auch noch ein Blick in den benachbarten Kanton Freiburg geworfen. Aus der Gemeinde selbst könnten potenziell etwa 10% des Holzbedarfs für die SWISS-SNG-Anlage beigesteuert werden.

Der Kanton Waadt hat eine produktive Waldfläche von insgesamt 93'189 ha. Das entspricht 8.5% der produktiven Waldfläche der Schweiz (1'100'803 ha; BAFU 2013).

In einem ersten Schritt wird das verfügbare Energieholz aufgrund verschiedener Quellen und Berechnungsmethoden hergeleitet. In einem zweiten Schritt wird die aktuelle Energieholznutzung anhand der Schweizerischen Holzenergiestatistik hergeleitet. Die anschliessende Gegenüberstellung von Energieholzpotenzial und Energieholznutzung zeigt auf, wie gross das noch frei verfügbare Energieholzpotenzial ist. Das nächste Kapitel befasst sich mit den Bereitstellungskosten, wobei hier ausschliesslich auf bestehende Studien und Untersuchungen zurückgegriffen wird. Schliesslich erfolgt eine Betrachtung konkreter Angebote.

Es wird mit folgenden Umrechnungsfaktoren gerechnet:

Festmeter	Schüttraummeter	Endenergie	Endenergie
[m ³]	[Sm ³]	[kWh]	[GJ]
1.0	2.8	2'450	8.64

Tabelle 3: Verwendete Umrechnungsfaktoren

3.3 VERFÜGBARKEITEN

Die Schweiz verfügt über eine Waldfläche von 12'447 km² (Ref.), was zirka 30% der Landesfläche entspricht. Der kommerziell verwertbare Holzzuwachs beträgt 9.5 Mio. m³/Jahr, die Holznutzung 8.6 Mio. m³/Jahr und der Holzverbrauch ca. 7.5 Mio. m³/Jahr. Somit ergibt sich in Kombination mit der jährlichen Zunahme der Waldfläche von ca. 0.4% pro Jahr (entsprechend zirka 50 km²/Jahr resp. 1.5 m²/Sekunde) ein Zuwachsüberschuss. Dieser stellt ein enormes Nutzungspotenzial dar, insbesondere im Jura, welcher einen Waldflächenanteil > 40% aufweist.

3.3.1 Energieholzpotenzial Schweiz

Nussbaumer (2013) schätzt, dass im Jahr 2008 insgesamt 2.1 Mio. m³ (Festmeter) Waldholz energetisch genutzt wurden, und dass sich die Nutzung bis ins Jahr 2020 um zusätzliche 3.1 Mio. m³ auf insgesamt 5.2 Mio. m³ steigern lassen könnte.

Sortiment	2008			2020		
	Mio. m ³ /a	Pj/a	% GEV	Mio. m ³ /a	Pj/a	% GEV
Energieholz Wald	2.1	18.1	2.0	3.1	26.8	3.0
Flurholz	0.9	7.8	0.9	1.2	10.4	1.2
Restholz Verarbeitung	0.7	6.0	0.7	1.1	9.5	1.1
Altholz	0.3	2.6	0.3	0.6	5.2	0.6
Altpapier	0.3	2.6	0.3	0.3	2.6	0.3
Total	4.3	37.2	4.1	6.3	54.4	6.0

Tabelle 4: Energieholzverbrauch 2008 und Potenzial bis 2020 für die gesamte Schweiz in Mio. m³/a bzw. in Pj/a. %GEV = Anteil am Gesamtenergieverbrauch (Quelle: Nussbaumer, Th. 2013).

Das BAFU (2011) kommt in seiner Studie aus dem Jahr 2011 zu leicht tieferen Werten und einer zusätzlichen Nutzungsmenge von 2.878 Mio m³:

	Nutzung 2010	Potenzial total	Potenzial noch frei
	[m ³ /Jahr]	[m ³ /Jahr]	[m ³ /Jahr]
Waldholz	2'109'854	4'988'250	2'878'396
Restholz	1'185'936	1'250'000	64'064
Altholz	1'064'808	1'320'000	255'192
Total	4'360'598	7'558'250	3'197'652

Tabelle 5: Nutzung 2010 und Potenzial gemäss BAFU 2010 (Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald).

3.3.2 Kanton Waadt

Bricht man die gesamtschweizerischen Zahlen gemäss Tabelle 2 proportional zum Anteil der produktiven Waldfläche auf den Kanton Waadt herunter, ergibt sich ein noch freies Energieholzpotenzial (nur Waldholz) von 244'663 m³ (Festmeter) bzw. 685'058 Srm³ (Schüttraummeter) bzw. 2'114'000 GJ Endenergie. Dies entspricht in etwa der 20-fachen Menge des Bedarfs der geplanten 2.67-MW-SWISS-SNG-Anlage.

Thees (2009) hat bereits im Jahr 2003 für das damalige Projekt „ECOGAS – Autofahren und Heizen mit Biomasse“ eine erste Auswertung des Schweizerischen Landesforstinventars LFI hinsichtlich des Energieholzpotenzials erstellt, aus welcher dann die Publikation von 2009 resultierte. Betrachtet man den pessimistischsten Fall (Szenario A, ohne Vorratsabbau), lässt sich für den Kanton Waadt, verteilt auf die verschiedenen Forstregionen und inklusive aktueller Nutzung, ein Energieholzpotenzial von 377'976 m³ bzw. 3'265'713 GJ abschätzen:

Forstregion	Waldfläche	Energieholzmenge pro ha/Jahr	Energieholzmenge total
	[ha]	[m ³ /ha Jahr]	[m ³ /Jahr]
Jura	24'229	2.7	65'419
Mittelland	42'867	6.5	278'636
Voralpen	11'183	2.1	23'484
Alpen	14'910	0.7	10'437
TOTAL	93'189		377'976

Tabelle 6: Herleitung Energieholzpotenzial Kanton Waadt (Quelle Thees 2009)

Etwas vorsichtiger wird das gesamthaft verfügbare Potenzial aus Waldholz im Kanton Waadt durch die Verantwortlichen des Kantons selber beurteilt. Dieses liegt zwischen 1'240'000 GJ bzw. 402'000 Srm³ bzw. 143'571 m³ (pessimistischer Fall) und 2'260'000 GJ bzw. 732'000 Srm³ bzw. 261'429 m³ (optimistischer Fall). In diesen Zahlen ist die aktuelle Nutzung ebenfalls enthalten (vgl. dazu 3.4).

3.3.3 Kanton Freiburg

Für den Kanton Freiburg wurde im Jahr 2007 eine Energieholz-Potenzialstudie erarbeitet. Diese zeigte auf, dass bei einem Preis von 5.5 Rp./kWh zusätzlich zum 2007 bereits genutzten bzw. dem damals geplanten Verbrauch aus den Wäldern des Kantons Freiburg noch rund 150'000 MWh bzw. 528'000 GJ bzw. 171'000 Srm³ bzw. 61'071 m³ Waldholz für energetische Zwecke zur Verfügung stehen.

3.4 AKTUELLE NUTZUNG VON ENERGIEHOLZ IM KANTON WAADT

Im Rahmen der Schweizerischen Holzenergiestatistik (Primas 2013) wird der aktuelle Stand der Holzenergienutzung in der Schweiz seit 1990 anhand des Anlagenparks jedes Jahr nachgeführt. Dabei erfolgen auch Auswertungen der einzelnen Kantone. Für den Kanton Waadt ergibt sich per 31. Dezember 2012 folgende Energieholznutzung, verteilt auf die einzelnen Anlagenkategorien der Schweizerischen Holzenergiestatistik:

Kategorie	Anzahl Anlagen	Holzverbrauch	davon Waldholz	
		[m ³ /Jahr]	[m ³ /Jahr]	[GJ/Jahr]
Geschlossene Cheminées	7'383	4'898	3'918	33'852
Cheminéeöfen	10'973	13'691	10'953	94'634
Zimmeröfen	1'486	1'531	1'148	9'919
Pelletöfen (Wohnbereich)	301	466	0	0
Kachelöfen	8'888	18'216	14'573	125'911
Holzkochherde	4'046	7'373	6'635	57'326
Zentralheizungsherde	532	5'269	4'742	40'971
Stückholzkessel < 50 kW	1'086	12'908	9'036	78'071
Stückholzkessel > 50 kW	86	1'032	825	7'128
Doppel-/Wechselbrandkessel	271	966	725	6'264
Schnitzelheizungen <50 kW	70	1'743	1'656	14'308
Pelletheizungen <50 kW	441	8'749	0	0
Schnitzelheizungen 50–300 kW, ausserhalb HVA	138	12'367	11'130	96'163
Pelletheizungen 50–300 kW	20	1'570	0	0
Schnitzelheizungen 50–300 kW, innerhalb HVA	86	7'238	0	0
Schnitzelheizungen 300–500 kW, ausserhalb HVA	23	6'213	5'281	45'628
Pelletheizungen 300–500 kW	3	237	0	0
Schnitzelheizungen 300–500 kW, innerhalb HVA	11	2'387	0	0
Schnitzelheizungen >500 kW, ausserhalb HVA	18	18'582	14'866	128'442
Pelletheizungen >500 kW	3	456	0	0
Schnitzelheizungen >500 kW, innerhalb HVA	6	6'947	0	0
Holz-WKK-Anlagen (Stromerzeugung)	3	14'673	3'788	32'728
Total	35'874	147'512	89'276	771'345

Tabelle 7: Aktuelle Nutzung von Energieholz im Kanton Waadt
gemäss Schweizerischer Holzenergiestatistik (Primas 2013).

Gemäss Schweizerischer Holzenergiestatistik liegt die aktuelle Holzenergienutzung im Kanton Waadt bei 147'512 m³ bzw. 1'274'504 GJ pro Jahr. Davon entfallen 89'276 m³ bzw. 771'345 GJ auf Waldholz.

3.5 GEGENÜBERSTELLUNG NUTZUNG UND POTENZIAL

Eine Gegenüberstellung der aktuellen Nutzung und der Potenziale ergibt folgendes Bild:

Quelle	Nutzung 2012	Potenzial brutto	Potenzial netto
	m ³ /Jahr	m ³ /Jahr	m ³ /Jahr
Holzenergiestatistik (HeS)	89'276		
HeS/Thees 2009	89'276	377'976	288'700
HeS/BG Ingenieure SA, optimistisch	89'276	261'429	172'153
HeS/BG Ingenieure SA, pessimistisch	89'276	143'571	54'295

Tabelle 8: Gegenüberstellung aktuelle Nutzung und Potenzial von Energieholz im Kanton Waadt nach verschiedenen Quellen (Potenzial netto = Potenzial noch verfügbar).

Im schlechtesten Fall besteht im Kanton Waadt noch ein verfügbares Potenzial von jährlich 54'295 m³ bzw. 152'026 Sm³ Waldholz. Dies entspricht ca. dem vierfachen derjenigen Menge, welche das Projekt LIGNOGAZ benötigt.

3.6 KOSTEN

3.6.1 Allgemeine Angaben aus Literatur und Empfehlungen

Für den Kanton Freiburg wurde im Jahr 2007 eine Energieholz-Potenzialstudie erarbeitet. Gemäss Holdigaz (2013) liegt der kostendeckende Holzschnitzelpreis für den Forstbetrieb der Gemeinde Mont-la-Ville bei 14.72 Rp./kWh (exkl. MWSt.). Dieser Preis liegt deutlich über den heute üblichen Preisen, zudem ist die Herleitung aufgrund der vorhandenen Unterlagen nicht klar. Mit Sicherheit nicht korrekt wäre es, wenn als Basis die durchschnittlichen, sich auf den ganzen Forstbetrieb und über alle Sortimente (insbesondere Nutzholz) bezogenen Produktionskosten (CHF 83.-/m³) gewählt werden.

Auch wenn sich in gewissen Regionen, zu welchen der Kanton Waadt jedoch (noch) nicht gehört, der Energieholzmarkt langsam von einem ausgeprägten Angebotsmarkt zu einem Nachfragemarkt wandelt, sind die Energieholzpreise nach wie vor Gestehungskostenpreise und (noch) keine Marktpreise.

Für das übliche Produktionsverfahren (gute Erschliessung, Hacken ausserhalb Bestand) lassen sich die Gestehungskosten folgendermassen zusammenfassen (Holzenergie Schweiz 2013):

Vorgang	Ort	Wald	Heizung	Anteil Kosten Waldhackholz	Eingesetzte Maschinen
		Bestand	Waldstrasse	Fr./Srm	
Fällen				8-12	Motormanuell
Vorliefern (Ganzbaum)					Schlepper mit Funkseilwinde
Hacken (mit Nachfahren)				11-15**	Hacker auf LKW gebaut
Schnitzeltransport				4-8	LKW, Container
Betriebskosten	Geschäftsführung, Rückstellungen, Verwaltung etc.			1-2	
Erzeugungskosten	Ab Stufe Hacken			16-25	
Erzeugungskosten	Total			24-37	

Tabelle 9: Produktionskosten (CHF/Srm³) für gut erschlossene Lagen.

Bei einem Energieinhalt von 875 kWh/Srm³ und einem Jahresnutzungsgrad der Anlage von 85% ergibt sich folgender Energieholzpreis, gemessen nach der Wärmeerzeugung:

$$\begin{aligned} &(\text{CHF } 24.-/875) \times (1/0.85) = 3.2 \text{ Rp./kWh} \\ &\quad \text{bis} \\ &(\text{CHF } 37.-/875) \times (1/0.85) = 5.0 \text{ Rp./kWh} \end{aligned}$$

Die Preisempfehlungen des Schweizerischen Waldwirtschaftsverbandes (Waldwirtschaft Schweiz) für den Winter 2013/14 präsentieren sich folgendermassen:

Richtpreise für Energieholz in Energieholz-Hackschnitzeln zu Beginn der Holzmarktkampagne 2013/2014 (franko Silo inkl. Ascherücknahme, ohne MWST)	
Abrechnung nach Volumen	
Sortiment	CHF/Rm ¹⁾
	2013/2014
Laubholz:	
frisch	40.– bis 46.–
trocken ²⁾	44.– bis 51.–
Nadelholz:	
frisch	27.– bis 33.–
trocken ²⁾	32.– bis 38.–
Abrechnung mit Wärmebezugsmessung	
Sortiment	Rp./kWh
	2013/2014
Grünschnitzel (frisch) ²⁾	5,2 bis 6,2
trockene Schnitzel ³⁾	6,6 bis 7,2
Qualischnitzel ⁴⁾	7,4 bis 8,2

Gemeinsame Empfehlung von: Waldwirtschaft Schweiz WVS, Holzenergie Schweiz, Interessengemeinschaft professioneller Energieholzhersteller IPE, Holzindustrie Schweiz HIS, Forstunternehmer Schweiz FUS

¹⁾ Rm = m³ geschüttete Schnitzel

²⁾ Wassergehalt w (Restfeuchte) 45 bis 55%

³⁾ w 25 bis 35%

⁴⁾ w unter 18%

*Tabelle 10: Gemeinsame Preisempfehlungen der Waldbesitzer und der Unternehmer.
Entsprechend ihrem empfehlenden Charakter liegen die Werte erfahrungsgemäss
10 bis 20 Prozent über den heute am Markt effektiv erzielbaren Preisen.*

3.7 ABSICHTSERKLÄRUNGEN FÜR HOLZLIEFERUNGEN

3.7.1 Angebot FORETNERGIE SA, Montricher

Von der Firma FORETNERGIE SA, 1147 Montricher, liegt ein Angebot, datiert vom 10. Oktober 2013, für die Lieferung von 20'000 bis 29'000 Srm^3 pro Jahr zu einem Preis von CHF 40.-/ Srm^3 vor. Das Angebot berücksichtigt den regionalen Aspekt und geht davon aus, dass das Holz aus einem Umkreis von lediglich 11 km um das Dorf Mont-la-Ville herum stammt. Beim Anbieter handelt es sich um einen erfahrenen Energieholzversorger, welcher schon seit vielen Jahren im Markt vertreten ist und unter dessen Referenzen sich einige Anlagen der ersten Generation befinden (z.B. Arboretum Aubonne, Waffenplatz Bière).

Der von FORETNERGIE SA offerierte Preis von CHF 40.-/ Srm^3 entspricht umgerechnet ($875 \text{ kWh}/\text{Srm}^3$, Jahresnutzungsgrad Wärmezeugung 85%) einem Preis von 5.4 Rp./kWh (exkl. MWSt. und gemessen nach dem Kessel). Bei einem Kesselwirkungsgrad von 90% entspricht das einem Holzpreis vor dem Kessel von 4.9 Rp./kWh.

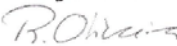
FORETNERGIE
•••••

OFFRE DE FOURNITURE DE BOIS ENERGIE

Objet :	Plaquettes forestières vertes.
Quantité :	env. 7 à 10'000 tonnes de bois par année, ce qui représente env. 20 à 29'000 m^3 plaquettes par année.
Origine des bois :	Dans un rayon de 11 km à vol d'oiseau autour de Mont-la-Ville. En collaboration avec les services forestiers régionaux.
Déchetage :	Par les entreprises Spycher et Sodefor.
Qualité :	A définir. 70 % feuillu et 30 % résineux
Stockage :	Prévoir une aire de stockage pour les bois ronds afin de pouvoir les déchetage sur place (dimensions à discuter ultérieurement).
Taille silo :	Prévoir un silo d'une capacité de 10 jours de consommation (la taille du silo est importante, car elle conditionne une partie non négligeable du prix).
Facteurs :	1 m^3 bois rond = 2,4 m^3 plaquettes 1 m^3 plaquette = 350 kg
Durée du contrat :	10 ans, puis renouvelable tacitement pour 2 ans.
Prix indicatif :	40.- le m^3 (hors TVA)
Livraison :	Franco Mont-la-Ville par camion benne de 35 m^3 ou par semi-remorque de 70 m^3 prévoir les accès pour les camions.
Indexation :	Activée dès la 2 ^{ème} année, sur la base du tableau Energie-bois Suisse présenté en annexe.
Remarques :	Notre société, bénéficiant d'une certification FSC, est en mesure de fournir du bois provenant de forêts exploitées de manière durable et respectant les normes environnementales.

Nous vous remercions pour votre appel d'offre et nous restons bien évidemment à votre disposition pour tout complément d'information ou toute question sur notre courrier.

Dans l'attente de votre réponse, nous vous prions d'agréer, Madame, nos salutations distinguées.

FORETNERGIE SA
 Rodrigue Oliveira


FORETNERGIE SA 6, CH. DES RIPPES 1147 MONTRICHER TEL. 021 809 41 41 FAX 021 864 50 58
 MAIL info@foretnergie.ch SITE www.foretnergie.ch CHE - 113.344.840 TVA

Abbildung 11: Angebot FORETNERGIE SA, Montricher, 10. Oktober 2013.

3.7.2 Angebot Schmuki SA, Lucens

Für diesen Bericht wurde ein weiteres Angebot bei der Firma Schmuki SA, Lucens, eingeholt. Die Firma Schmuki SA produziert und vermarktet seit 1986 Holzschnitzel und zählt zu den Gründungsmitgliedern der Interessengemeinschaft professioneller Energieholzversorger IPE, einem Netzwerk von rund 25 Holzschnitzelproduzenten. Die Firma Schmuki SA offeriert die Holzschnitzel für die Anlage in Mont-la-Ville zu einem Preis von CHF 38.-/Srm³, was bei den gleichen Umrechnungsparametern wie oben (875 kWh/Srm³, Jahresnutzungsgrad Wärmeerzeugung 85%) 5.1 Rp./kWh entspricht (exklusive Mehrwertsteuer, gemessen nach dem Kessel). Bei einem Kesselwirkungsgrad von 90% entspricht dies einem Holzpreis vor dem Kessel von 4.6 Rp./kWh.



Abbildung 12: Angebot Schmuki SA, Lucens, 6. Januar 2014.

3.8 SCHLUSSFOLGERUNGEN ROHSTOFF HOLZ

Die Auswertung der vorhandenen Grundlagen und Untersuchungen zeigt, dass das noch verfügbare regionale Energieholzpotenzial problemlos ausreicht, um die geplante Methanisierungsanlage in Mont-la-Ville nachhaltig mit Waldholzschnitzeln zu versorgen.

Anhand zweier konkreter Angebote von erfahrenen Unternehmern aus der Region lässt sich zeigen, dass ein Preis von 4.6 Rp./kWh bis 4.9 Rp./kWh erzielbar ist.

Dass diese Preise durchaus realistisch sind, zeigt eine Ausschreibung vom Frühjahr 2012 für ein in Sisseln AG geplantes Holzheizkraftwerk. Dabei ging es um eine grössere Menge von 320'000 Srm³/Jahr. Die insgesamt vier eingeholten Angebote lagen zwischen 4.3 Rp./kWh (Firma Baumgartner Transporte AG, Lindau) und 7.0 Rp./kWh (Firma Lignocalor Seeland AG, Rosshäusern), jeweils gemessen nach dem Kessel und exkl. Mehrwertsteuer.

4 PREISE ERNEUERBARE ENERGIE-GASE IN DER SCHWEIZ

4.1 BIOGASPREISE SCHWEIZ

Die Preise für Biogas werden von den jeweiligen lokalen Gasversorgern festgesetzt. Diese beziehen das Biogas aus eigenen und dritten Quellen. Ein direkter Bezug beim Produzenten, z.B. einer Vergärungsanlage, ist, wenn überhaupt, nur in Form vom Treibstoff an einer Tankstelle möglich.

Einzelne Gasversorger bieten Biogas für Nicht-Kunden an (sprich Kunden anderer Versorger). Dies erfolgt über eine Art Zertifikatsystem. Dem Kunden wird dabei ein sog. ökologischer Mehrwert in Rechnung gestellt. Für den Gegenwert garantiert der Biogasanbieter, dass Biogas produziert und in sein eigenes Netz eingespeist wird.

Beispielhaft anbei die Endkundenpreise für Biogasprodukte des Schweizer Marktführers Erdgas Zürich:

	Leistungs-preis	Erdgas-Preis	Erdgas-Preis 5% Biogas	Erdgas-Preis 20% Biogas	Preis 100% Biogas
	Jahr	kWh Ho	kWh Ho	kWh Ho	kWh Ho
Haushaltsanwendung (Kochen)					
Erdgas Haushalt	CHF 56.90	15,6 Rp.	16,1 Rp.	17,3 Rp.	23,3 Rp.
Heizung und Wasseraufbereitung bis 50 kW Leistung					
unter 10'000 kWh/Jahr	CHF 100.00	9,0 Rp.	9,5 Rp.	10,7 Rp.	16,7 Rp.
10'000 bis 49'999 kWh/Jahr	CHF 150.00	8,5 Rp.	9,0 Rp.	10,2 Rp.	16,2 Rp.
ab 50'000 kWh/Jahr	CHF 450.00	7,9 Rp.	8,4 Rp.	9,6 Rp.	15,6 Rp.
ab 50 kW Leistung	CHF 34.00 / kw	6,6 Rp.	7,1 Rp.	8,3 Rp.	14,3 Rp.
ab 300 kW Leistung (abschaltbare Anlagen)	CHF 15.50 / kw	6,6 Rp.	7,1 Rp.	8,3 Rp.	14,3 Rp.
Gewerbliche und industrielle Anwendung					
bis 300 kW Leistung	CHF 17.00 / kw	6,0 Rp.	6,5 Rp.	7,7 Rp.	13,7 Rp.
ab 300 kW Leistung (abschaltbare Anlagen)	CHF 11.20 / kw	6,0 Rp.	6,5 Rp.	7,7 Rp.	13,7 Rp.

Tabelle 11: Endkundenpreise Erdgas Zürich

(Quelle: erdgas zürich, 2014 - www.erdgaszuerich.ch/produkte-preise)

Die vorgenannten Preise gelten für alle Städte und Gemeinden innerhalb des Direktversorgungs-gebiets von Erdgas Zürich und verstehen sich exkl. MWSt., inkl. CO₂ -Abgabe (1,093 Rp./kWh Ho). Bei Produkten mit einem Biogas-Anteil ist die Reduktion der CO₂ -Abgabe bereits im Preis berücksichtigt. Preisstand: Januar 2014

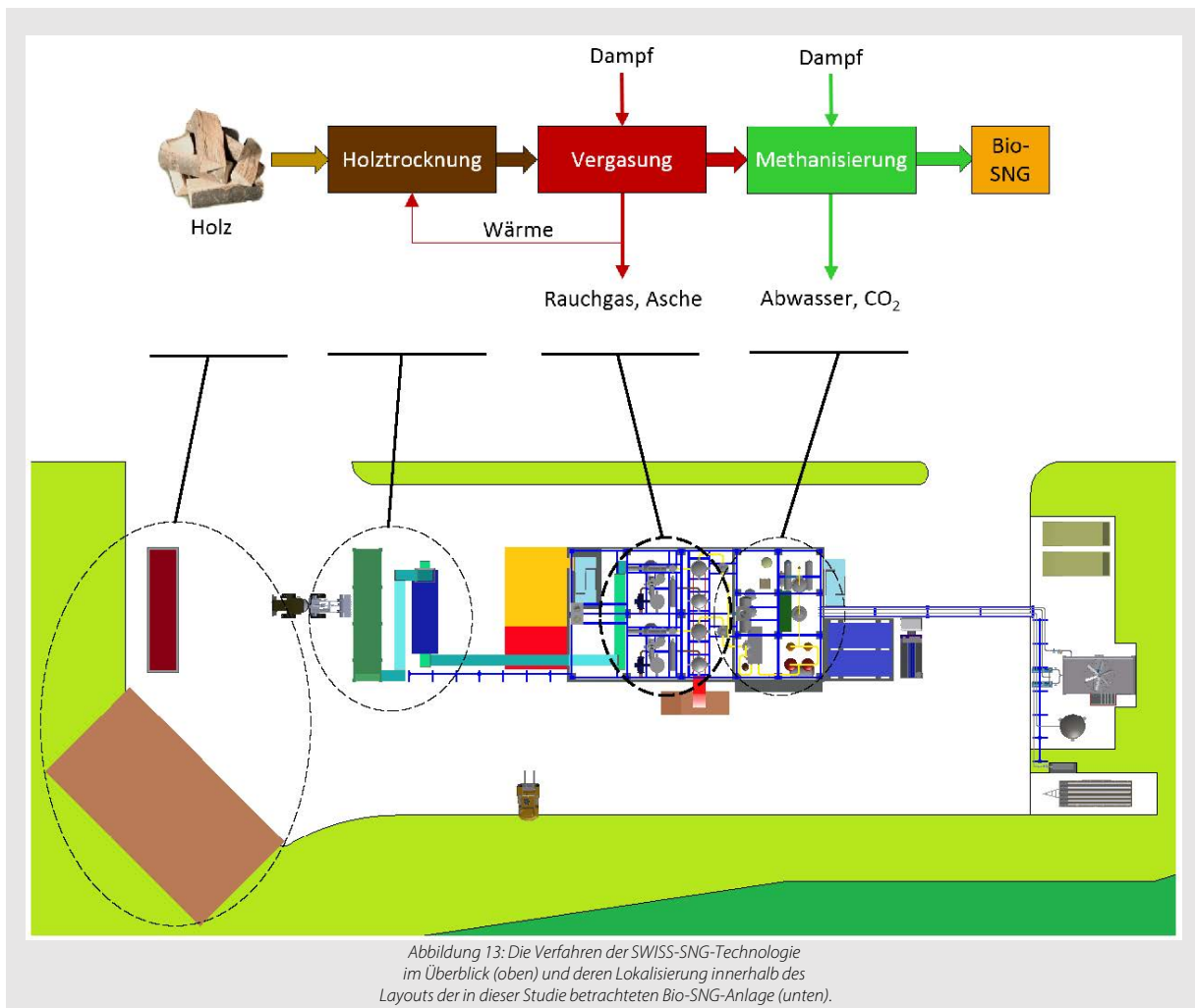
Im Vergleich dazu verrechnet das ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) für eine KW/h Strom aus erneuerbarer Energie je nach Quelle zwischen 11.4 Rp. (Wasserkraft für Geschäftskunden) und 65 Rp. (Solarstrom für Privat- und Geschäftskunden). Quelle: ewz, 2014 (www.ewz.ch/stromprodukte)

5 VERFAHRENSTECHNISCHE KONZEPTIONIERUNG DER ANLAGE

Mithilfe der SWISS-SNG-Technologie wird aus Holz ein synthetisches Erdgas (*Bio-SNG*) erzeugt. Die Technologie beruht auf einer Kombination von Verfahren zur Holzvergasung mit anschließender Methanisierung des Holzgases. Im Kern besteht sie aus den folgenden drei Verfahrensabschnitten:

- Holztrocknung
- Vergasung
- Methanisierung

Abb. 13 verdeutlicht den prinzipiellen Prozessablauf der SWISS-SNG-Technologie und zeigt zugleich die Lokalisierung der einzelnen Schritte innerhalb der in dieser Studie betrachteten Bio-SNG-Anlage.



Frische Holzsnitzel werden zur Anlage angeliefert und zunächst getrocknet. Zur Holztrocknung wird überschüssige Prozesswärme genutzt. Die getrockneten Holzsnitzel werden durch einen Vergasungsprozess mithilfe von Dampf zu einem energiereichen Produktgas umgewandelt – das sogenannte *Holzgas*. Bei der Methanisierung wird im Anschluss das Holzgas mithilfe von Wasser (Dampf) in einem katalytischen Prozess zu synthetischem Erdgas umgewandelt. Als Abfallströme fallen hauptsächlich Rauchgas und Asche aus dem Vergasungsprozess sowie Abwasser und Kohlendioxid aus der Methanisierung an. Alle übrigen Abfallströme werden prozessintern recycelt.

Prinzipiell ist die SWISS-SNG-Technologie unabhängig vom Vergasertyp. Es werden lediglich Mindestanforderungen hinsichtlich der Zusammensetzung an das produzierte Holzgas gestellt. Die Methanisierung selbst geht auf einen katalytischen Prozess zurück, der vom *Paul Scherrer Institut* (Schweiz) patentiert und gemeinsam mit der *CTU Clean Technology Universe AG* weiterentwickelt, im industriellen Massstab erfolgreich erprobt und optimiert wurde.

In der vorliegenden Studie befasst sich die verfahrenstechnische Konzeptionierung vor allem mit der Bilanzierung der einzelnen Prozessschritte sowie der Dimensionierung der dazugehörigen Apparate. Hierbei müssen unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigt werden wie z.B. die Platzverhältnisse am Standort, die Infrastruktur sowie das geforderte Anlagegrössenspektrum. Daraus resultieren die folgenden Hauptaufgaben:

a) Holztrocknung:

- Evaluierung eines geeigneten Trocknungsverfahrens in Kombination mit der Annahme und Lagerung der Hackschnitzel
- Aufzeigen der Wirkungsgradverbesserung der Bio-SNG-Erzeugung durch Nutzung von Prozessabwärme zur Holztrocknung

b) Vergasung:

- Evaluierung und Dimensionierung eines geeigneten Vergasersystems für die am Standort verfügbare Holzmenge

c) Methanisierung:

- Konzept- und Leistungsabgleich an das gewählte Holzvergasungssystem

Für diese drei Bereiche gilt es, ein schlüssiges Gesamtkonzept für die Anlage aufzustellen, unter Berücksichtigung einer effizienten stofflichen und energetischen Integration von Prozessströmen (z.B. optimierte interne Nutzung von Prozessabwärme). Risiken für Umwelt- und Sicherheit werden bei der Erstellung des Gesamtkonzeptes im Rahmen einer Umwelt- und Risikoanalyse untersucht und allenfalls durch geeignete Massnahmen auf ein akzeptables Mass reduziert. Details hierzu sind dem Anhang Abschnitt 11 zu entnehmen.

Auf Basis der Konzeptionierung werden die Investitions- und Betriebskosten der Anlage ermittelt. Der Detaillierungsgrad wird dabei so gewählt, dass eine verlässliche Kostenschätzung mit einer Unschärfe von $\pm 15\%$ abgegeben werden kann.

5.1 HOLZTROCKNUNG

Der Rohstoff für den Vergasungsprozess ist Holz, das in Form von Hackschnitzeln zur Anlage angeliefert wird. Die Feuchte der Hackschnitzel besitzt einen grossen Einfluss auf die Effizienz des Vergasungsprozesses. Feuchtes Holz verursacht eine geringere Effizienz und eine starke Schwankungsbreite des Vergasungsprozesses. Da jedoch genügend Prozessabwärme zur Verfügung steht, kann diese – wird sie zur Holztrocknung genutzt – die Effizienz des Vergasungsprozesses entscheidend verbessern. Damit ist die Anlage in der Lage, ein Bio-SNG von gleichbleibend hoher Qualität zu erzeugen, und dies unabhängig von der Qualität des angelieferten Holzes. Eine Holztrocknung bietet daher eine Vielzahl an Vorteilen für die Bio-SNG-Erzeugung. Das vorliegende Kapitel befasst sich aus diesem Grunde intensiv mit den Grundlagen der Holztrocknung sowie dem Einfluss der Holzfeuchte auf den Vergasungsprozess. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Annahme und Zwischenlagerung der angelieferten Holzhackschnitzel zur Anlage eingegangen.

5.1.1 Grundlagen zur Holztrocknung

Holz ist ein Naturprodukt, wodurch dessen Eigenschaften gewissen Schwankungen unterworfen sind. Die chemischen Eigenschaften von Holz einer bestimmten Baumart variieren nur in engen Grenzen. Abweichungen können lediglich durch unterschiedliche Rindenanteile entstehen. Verschiedene Holzarten können dagegen deutlich unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, die vor allem aus unterschiedlichen Harzgehalten, Feuchtegehalten und/oder Ascheanteilen resultieren. Auch die Art und Dauer der Lagerung des Holzes vor der Anlieferung spielt eine grosse Rolle.

Holz mit einem Wassergehalt von 15% bis 20% (entspricht einer Feuchte von 18% bis 25%) wird als "lufttrocken" bezeichnet. Feuchtes bzw. frisch eingeschlagenes Holz besitzt einen Wassergehalt von bis zu 50% (entspricht 100% Feuchte). Tab. 12 fasst die wichtigsten Begriffe und Konventionen im Zusammenhang mit Holz zusammen.

Begriff	Erklärung
Feuchte	Masse des Wassers bezogen auf die Trockenmasse des Holzes: $\text{Holzfeuchte} = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse Trockensubstanz}}$
Wassergehalt	Masse des Wassers bezogen auf die Gesamtmasse des Holzes: $\text{Wassergehalt} = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse Wasser} + \text{Masse Trockensubstanz}}$
Angaben zum Feuchtegehalt	– Absolut trocken (atro): entspricht der Trockenmasse – Lufttrocken: Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von 15% bis 20% (entspricht 18% bis 25% Feuchte) – Gelagert unter Dach: Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von 20% bis 30% (entspricht 25% bis 45% Feuchte) – Frisch eingeschlagen, direkt aus dem Wald: Hackschnitzel mit 35% bis 50% Wassergehalt (50% bis 100% Feuchte)
Brennwert	Energie, die bei vollständiger Verbrennung eines Brennstoffes und Kondensation des gebildeten Wasserdampfes frei wird
Heizwert	Der Heizwert berücksichtigt die Kondensationswärme des Wasserdampfes in den Verbrennungsgasen nicht. Er ist um diesen Betrag kleiner als der Brennwert.

Tabelle 12: Häufig verwendete Begriffe und Konventionen im Zusammenhang mit Holz

Weshalb Holz trocknen?

Die Verdampfungswärme von Wasser ist im Vergleich zu derjenigen anderer chemischer Substanzen sehr hoch. Im Vergasungsprozess muss das gesamte Wasser aus dem Holz verdampft werden. Dabei spielt es energetisch nahezu keine Rolle, ob das Holz vor oder während des Vergasungsprozesses getrocknet wird. Je feuchter das Holz ist, umso mehr Energie muss allerdings für diesen Verdampfungsprozess aufgebracht werden. Stammt die Energie aus dem Vergasungsprozess, kann dies bei sehr feuchtem Holz sogar zu einem Absinken der Vergasungstemperatur führen.

Dem könnte entgegengewirkt werden, indem z.B. ein grösserer Anteil des Brennstoffes oxidiert wird (d.h. ein grösserer Teil des Holzes verbrannt wird) oder mehr Zusatzbrennstoff (z.B. Stützgas) eingesetzt wird. Nachteil dieser Massnahmen ist, dass der Wirkungsgrad der Vergasung sinkt. Zudem ist es weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll, Energie für den Trocknungsprozess über den Einsatz von zusätzlichem Brennstoff zu erzeugen.

Anders sieht die Situation aus, wenn Abwärme aus dem Prozess auf ausreichendem Temperaturniveau zur Verfügung steht. Praktischerweise liefert der Vergasungsprozess ausreichend Abwärme auf dem erforderlichen Temperaturniveau. Daher ist es durchaus sinnvoll, überschüssige Prozesswärme zur Holztrocknung zu nutzen, wie in den folgenden Abschnitten detaillierter aufgezeigt wird.

Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert

Der Heizwert von luftgetrocknetem Holz (20% Wassergehalt, 25% Feuchte) beträgt etwa 4 kWh/kg (Abb. 14). Bei feuchtem, frisch eingeschlagenem Holz (50% Wassergehalt, 100% Feuchte) beträgt der Heizwert dagegen nur 2 kWh/kg. Durch eine Trocknung des Holzes lässt sich damit der Heizwert pro kg Holz deutlich erhöhen.

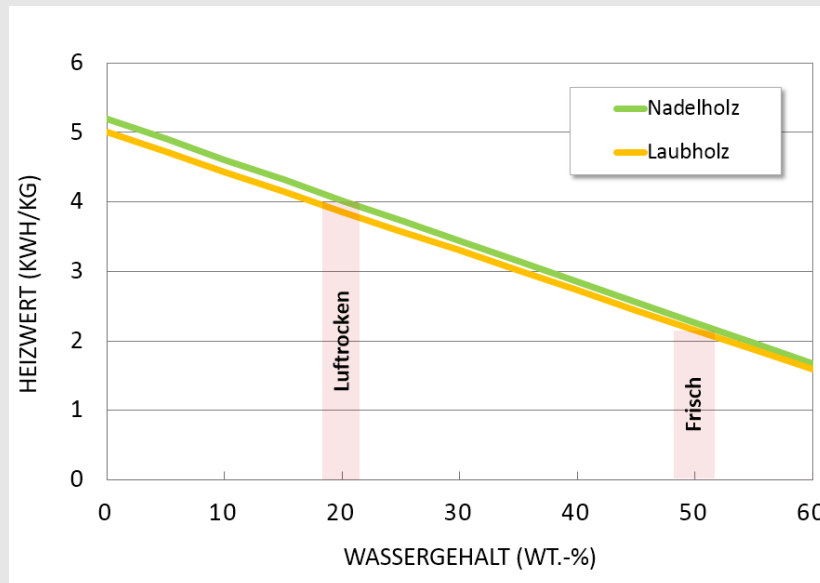


Abbildung 14: Abhängigkeit des Heizwertes vom Wassergehalt des Holzes

Zur Bestimmung des Wassergehaltes kann die Näherungsformel nach (Recknagel, Sprenger, & Schramek, 2000) herangezogen werden:

$$H_U = 34.8 c + 93.9 h + 10.5 s + 6.3 n - 10.8 o - 2.5 w$$

mit	H_U	- Heizwert	in MJ/kg
	c	- Gehalt an Kohlenstoff	in kg/kg
	h	- Gehalt an Wasserstoff	in kg/kg (ohne Wasser)
	n	- Gehalt an Stickstoff	in kg/kg
	o	- Gehalt an Sauerstoff	in kg/kg (ohne Wasser)
	s	- Gehalt an Schwefel	in kg/kg
	w	- Gehalt an Wasser	in kg/kg

Die Näherungsformel zeigt, wie sich die Feuchte auf den Heizwert auswirkt. Setzt man die Zusammensetzung für trockenes Holz ein (Hofbauer H., 2014), so vereinfacht sich die Formel wie folgt:

$$H_U = 18.6 - 2.5 w$$

mit	$c = 50.63\%$
	$h = 6.02\%$
	$n = 0.35\%$
	$o = 43.27\%$ (Rest)
	$s = 0.03\%$
	w = Gehalt an Wasser in kg/kg

Bei der Betrachtung sollte der Aschegehalt und das Ascheverhalten nicht unerwähnt bleiben. Bei der thermischen Nutzung von Biomasse bleibt immer Asche zurück. Diese besteht bei vollständigem Ausbrand hauptsächlich aus nicht flüchtigen Oxiden von Silicium, Phosphor, Eisen, Aluminium, Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium. Bei Holz ist der Ascheschmelzpunkt so hoch, dass die Asche später im Vergaser nicht verklebt und daher problemlos ausgetragen werden kann. Ein hoher Rindenanteil wirkt sich jedoch negativ auf die Vergasung aus.

Bei Energiepflanzen wie *Miscanthus* liegt der Ascheschmelzpunkt ca. 200°C tiefer. Abhängig vom

Vergasungsverfahren kann diese Asche zusammenbacken und kann dann nicht mehr ausgetragen werden (biobib, 2014). Allerdings treten diese Probleme eher bei Festbettvergasern auf als bei Wirbelschichtvergasern, da Ersterer mit höheren Energiedichten arbeiten und die Temperaturen im Vergleich zu Wirbelschichtvergasern schwieriger zu regeln sind.

Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Kaltgaswirkungsgrad der Vergasung

Der Kaltgaswirkungsgrad eines Vergasers beschreibt das Verhältnis zwischen der "Kaltgasleistung" des produzierten Holzgases zur "Heizwertleistung" des eingesetzten Holzes:

$$\eta_{\text{Kaltgas}} = \frac{\dot{m}_{\text{Holzgas}} * H_u^{\text{Holzgas}}}{\dot{m}_{\text{Holz}} * H_u^{\text{Holz}}}$$

Der Kaltgaswirkungsgrad ist somit ein Mass dafür, wie viel der chemisch im Holz enthaltenen Energie später als chemische Energie im Holzgas zur weiteren Nutzung zur Verfügung steht. Je höher der Wirkungsgrad, umso mehr chemische Energie ist im Holzgas enthalten und steht damit für die Umwandlung zum Bio-SNG zur Verfügung.

Abb. 15 zeigt die Abhängigkeit des Kaltgaswirkungsgrades vom Wassergehalt des eingesetzten Holzes. Das Diagramm gilt für den in dieser Studie betrachteten FICFB-Vergaser, der aus einer Vergasungswirbelschicht mit angeschlossener Verbrennungswirbelschicht besteht und als Vergasungsmittel Wasserdampf einsetzt.

- Für **feuchtes, frisch eingeschlagenes Holz** (50% Wassergehalt) beträgt der Kaltgaswirkungsgrad nur etwa 48%. Der tiefe Wert resultiert in erster Linie daraus, dass während der Vergasung ein signifikanter Anteil der "Heizwertleistung" des Holzes zum Verdampfen des im Holz gebundenen Wassers aufgewandt werden muss. Zugleich ergibt sich ein vergleichsweise hoher Wasserdampfgehalt im Holzgas, da mehr Wasserdampf für den Vergasungsprozess eingesetzt werden muss.
- Bei Verwendung von **lufttrockenem Holz** (20% Wassergehalt) steigt der Kaltgaswirkungsgrad auf etwa 75%. Das trockene Holz enthält signifikant weniger Wasser als feuchtes Holz, wodurch deutlich weniger Energie zum Verdampfen des im Holz gebundenen Wassers aufgewandt werden muss. Dies resultiert in einem höheren Heizwert des Holzgases und einem tieferen Wasserdampfgehalt im Holzgas.

Der Einsatz von trockenem Holz für die Vergasung führt demzufolge zu einer signifikanten Erhöhung des Kaltgaswirkungsgrades im Vergleich zu feuchtem Holz.

Erfahrungsgemäss ergibt sich eine Obergrenze von etwa 75% für Vergasertypen dieser Art. Diese obere Grenze resultiert daraus, dass für die Erreichung der Vergasungstemperatur immer Energie aus dem Holz oder aus externen Quellen eingesetzt werden muss, die letztendlich in die Berechnung des Wirkungsgrades als Aufwand eingeht.

Neben der Holzfeuchte beeinflusst auch die Vergasungstemperatur den Kaltgaswirkungsgrad. Dieser sinkt in einem Temperaturbereich von 700°C bis 1'000°C von etwas über 75% auf unter 60% (Schuster, Weigl, Kaiser, Friedl, & Hofbauer, 2000). Dies liegt vor allem darin begründet, dass mit zunehmender Vergasungstemperatur vermehrt Holzgas in den Verbrennungsteil des Vergasers zurückgeführt werden muss.

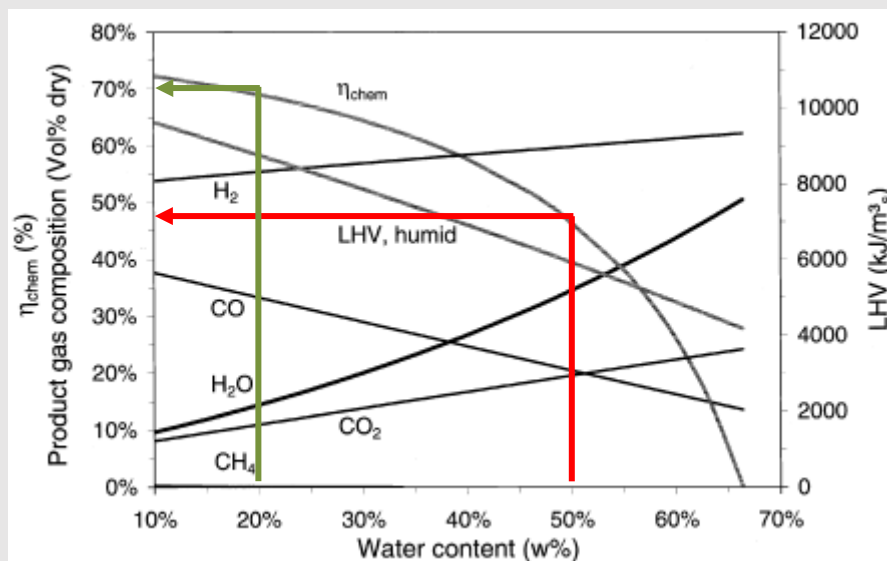


Abbildung 15: Einfluss des Wassergehaltes des Holzes auf Zusammensetzung des Holzgases sowie den Kaltgaswirkungsgrad $\eta_{Kaltgas}$ am Beispiel des in dieser Studie verwendeten FICFB-Vergasers nach (Schuster, Weigl, Kaiser, Friedl, & Hofbauer, 2000).

Zusammenhang zwischen Wassergehalt und CO-Ausbeute im Holzgas

Abb. 15 zeigt zusätzlich den Einfluss des Wassergehaltes im Holz auf die Zusammensetzung des vom Vergaser produzierten Holzgases. Mit zunehmendem Wassergehalt im Holz verschiebt sich demnach das Gleichgewicht des Vergasungsprozesses in Richtung H₂ und CO₂. Der Anteil an CO im Holzgas sinkt dagegen. CO ist aber zugleich der wichtigste Ausgangsstoff für die Methanisierung des Holzgases zum Bio-SNG. Der Einsatz von feuchtem Holz im Vergleich zu trockenem Holz vermindert demzufolge auch die CO-Ausbeute im Holzgas, was letztendlich zu einer geringeren Bio-SNG-Ausbeute führt.

Fazit

Zusammenfassend ergibt sich eine Vielzahl an Gründen, die für eine Trocknung der Holzhackschnitzel unter Nutzung überschüssiger Prozessabwärme sprechen:

1. Reduktion der Schwankungsbreite in der Holzgaserzeugung
2. Steigerung der Zuverlässigkeit der Vergasungsanlage
3. Höherer Kaltgaswirkungsgrad des Vergasungsprozesses
4. Höhere CO-Ausbeute im Holzgas (Edukt für die Bio-SNG-Erzeugung)

Die Holztrocknung führt somit zu einer Steigerung der Effizienz der gesamten Bio-SNG-Anlage und trägt zu einer gleichbleibend hohen Bio-SNG-Produktion bei.

5.1.2 Beschreibung der Verfahrensabschnitte

Die Prozessschritte der Holzannahme und -trocknung sind in Abb. 16 dargestellt und werden nachfolgend näher erläutert.

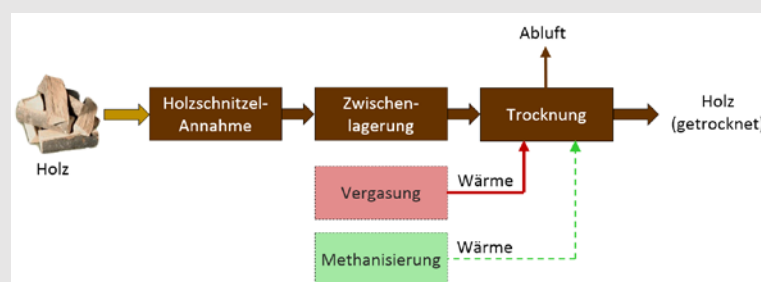
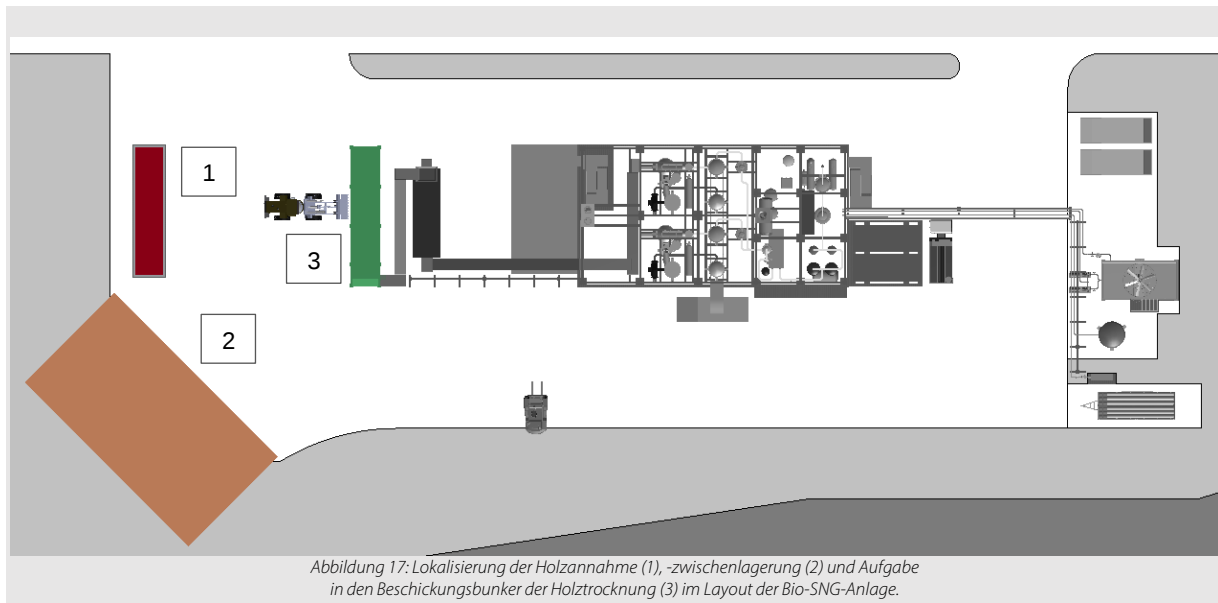


Abbildung 16: Prozessschritte der Holzannahme und -trocknung

Holzsnitzelannahme und -zwischenlagerung

Abb. 17 zeigt die Lokalisierung der Prozessschritte zur Holzannahme und -zwischenlagerung Layout der Bio-SNG-Anlage.



Die Holzsnitzel werden per LKW zur Anlage angeliefert. Der LKW fährt bei der Anlieferung auf eine Lastwagenwaage, um das Bruttogewicht zu bestimmen. Danach entleert er die Holzsnitzel in ein überdachtes Zwischenlager. Abschliessend wird der LKW zurückgewogen und aus der Differenz die Liefermenge bestimmt.

Neben der Menge spielt die Feuchte des Holzes eine entscheidende Rolle für den Energieinhalt einer Lieferung. Daher ist es sinnvoll, bei der Anlieferung an mehreren Stellen die Feuchte oder den Wassergehalt zu messen. Hierzu bietet der Markt eine Vielzahl an Messgeräten, die meistens über Einstechstifte die Leitfähigkeit messen und daraus den Wassergehalt berechnen. Geräte, die nach dem dielektrischen Prinzip arbeiten, also nur die Oberfläche messen, sind weniger gut geeignet.

Genauer sind allerdings Feuchteanalysatoren, die eine aufgegebene Schnitzelprobe wägen und z.B. mittels Halogenlampe bis zur Gewichtskonstanz trocknen. Der Wassergehalt wird aus der Massedifferenz bestimmt.

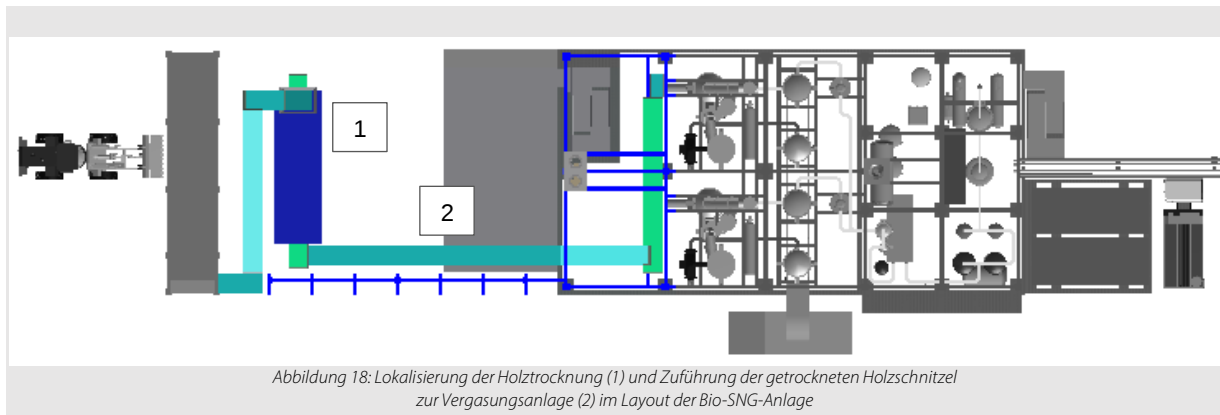
Waldholz weist bei der Anlieferung je nach Art und Dauer der Lagerung eine Restfeuchtigkeit auf, die eine Gärung des Materials ermöglicht. Bei dieser erwärmt sich das Material, was zur Trocknung führt. Die Holzsnitzel werden der Einfachheit halber auf einen überdachten Platz geschüttet und dort zwischengelagert. Das überdachte Zwischenlager bietet ausreichend Volumen, um zumindest den erforderlichen Vorrat für ein Wochenende bereitzustellen. Durch die offene Lagerung der frischen Holzsnitzel werden die Probleme umgangen, die bei deren Lagerung in Grünschnitzelsilos auftreten können. Hier sei besonders auf die Erstickungsgefahr in solchen Silos aufgrund der Luftverdrängung durch Gärgase hingewiesen.

Vom Zwischenlager werden die Schnitzel mit einem Schaufellader in den Beschickungsbunker für die nachfolgende Holz Trocknung befördert. Dieser wird nach dem Leitfaden "Grünschnitzelsilos" der SUVA mit Zwangslüftung und Absturzsicherung ausgeführt. Obwohl die Verweilzeit der Schnitzel für die Gärung im Bunker zu kurz ist, werden die geforderten Sicherheitsvorkehrungen der SUVA trotzdem ergriffen.

Durch einen hydraulisch angetriebenen Schubboden werden die Holzsnitzel auf einen Hochförderer ausgetragen, der diese zum Trockner transportiert. Dadurch, dass die Schnitzel von oben in den Zwischenbunker geschüttet werden und unten durch den Schubboden wieder ausgetragen werden, wird eine Rückvermischung vermieden; was zuerst in den Zwischenbunker gelangt, wird auch zuerst wieder ausgetragen (First in, First out).

Trocknung der Holzschnitzel

Abb. 18 zeigt die Lokalisierung der Holz Trocknung sowie die Zuführung der getrockneten Holzschnitzel zur Vergasungsanlage innerhalb des Layouts der Bio-SNG-Anlage.



Die Holzschnitzel werden durch den Schubboden im Zwischenbunker auf einen Steilförderer ausgetragen, der diese auf den darauffolgenden Lamellentrockner transportiert. Dort werden die Holzschnitzel durch ein Schubsystem auf die einzelnen Elemente verteilt, die durch die Lamellen begrenzt werden. Diese Lamellen werden durch die Heissluft durchströmt. Dadurch werden die entlangstreifenden Holz hackschnitzel erwärmt und getrocknet. Unten gelangen sie dann in das Ausschubsystem. Vom Ausschubsystem werden die Schnitzel mittels Fördersystem zum Vergaser gefördert.

Die Zufuhr zum Trockner wird über das Niveau im Trockner gesteuert. Der Austrag aus dem Trockner richtet sich nach dem Bedarf des Vergasungsprozesses.

5.2 HOLZVERGASUNG

Die Holzvergasung ist ein thermischer Zersetzungsprozess, bei dem die getrockneten Holz hackschnitzel in ein energiereiches Produktgas (Holzgas) und einen festen Rückstand (Kohle, Koks) umgesetzt werden. Die Stoffumwandlung erfolgt hierbei durch chemisch-physikalische Prozesse, die durch eine hohe Temperatur und das Einbringen eines sogenannten "Vergasungsmittels" induziert werden. Als Produkte kommen im Holzgas vor allem Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2), Wasser (H_2O) und Wasserstoff (H_2) vor. Daneben sind eine ganze Reihe sogenannter "Teere" enthalten, die aus höhermolekularen, kondensierbaren Kohlenwasserstoffen bestehen. Diese Teere sind unerwünscht, da sie die nachfolgenden Prozessschritte stören und müssen daher vom Holzgas abgetrennt werden.

Es gibt eine Vielzahl an Vergasertypen, die sich vor allem in der Bauweise, der Art und Weise des Temperatureintrags, dem eingesetzten Vergasungsmittel sowie der Zusammensetzung des Holzgases unterscheiden. Für die SWISS-SNG-Technologie ist es massgebend, ein möglichst stickstofffreies Holzgas zu erzeugen, da eine Stickstoffabtrennung für den Gesamtprozess nicht rentabel wäre. Gleichzeitig gelten gewisse Mindestanforderungen hinsichtlich des CO/H_2 -Verhältnisses im Holzgas, um eine Methanisierung überhaupt zu ermöglichen.

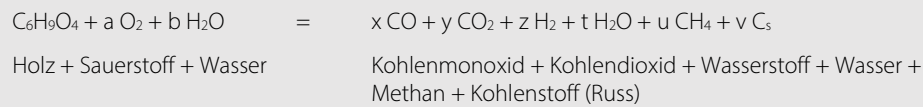
Der vorliegende Abschnitt befasst sich daher neben einer Einführung in die Grundlagen des Vergasungsprozesses mit der Evaluierung eines geeigneten Holzvergasers für die Bio-SNG-Anlage.

5.2.1 Grundlagen der Holzvergasung

5.2.1.1 Chemisch-physikalische Vorgänge

Der Vergasungsprozess ist ein thermischer Zersetzungsprozess des Holzes, der bei hohen Temperaturen stattfindet und durch ein sog. "Vergasungsmittel" induziert wird. Die Holzvergasung wurde bereits Ende des 18. Jahrhunderts entwickelt. Für einen kurzen historischen Abriss sei an dieser Stelle auf den Anhang Abschnitt 9 verwiesen.

Vereinfacht lässt sich der Vergasungsprozess von Holz nach (Chrysostome & Lemasle, 1986) durch folgende Summengleichung darstellen:



Das Holz wird hierbei durch die Summenformel $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4$ dargestellt. Diese vereinfachte Summenformel berücksichtigt nicht, dass Holz aus den weitaus komplexeren Verbindungen Lignin und Zellulose aufgebaut ist und weitere Elemente wie z.B. Schwefel und Chlor enthalten kann. Für die Erklärung und Berechnung des Vergasungsprozesses ist sie jedoch ausreichend.

Bisher wurde nur die Summengleichung der Vergasung betrachtet. In der Praxis läuft die Vergasung jedoch in mehreren nacheinander und parallel ablaufenden Reaktionen ab, die sich vereinfacht durch die folgenden vier Hauptgruppen zusammenfassen lassen:

- 1) Trocknung
- 2) Pyrolyse
- 3) Oxidation
- 4) Reduktion

Trocknung

Die thermische Trocknung findet im Temperaturbereich zwischen 100°C und 200°C statt. Hierbei verdampft überwiegend physikalisch gebundenes Wasser, das gemeinsam mit dem Holz in den Vergaser eingetragen wird.

Pyrolyse

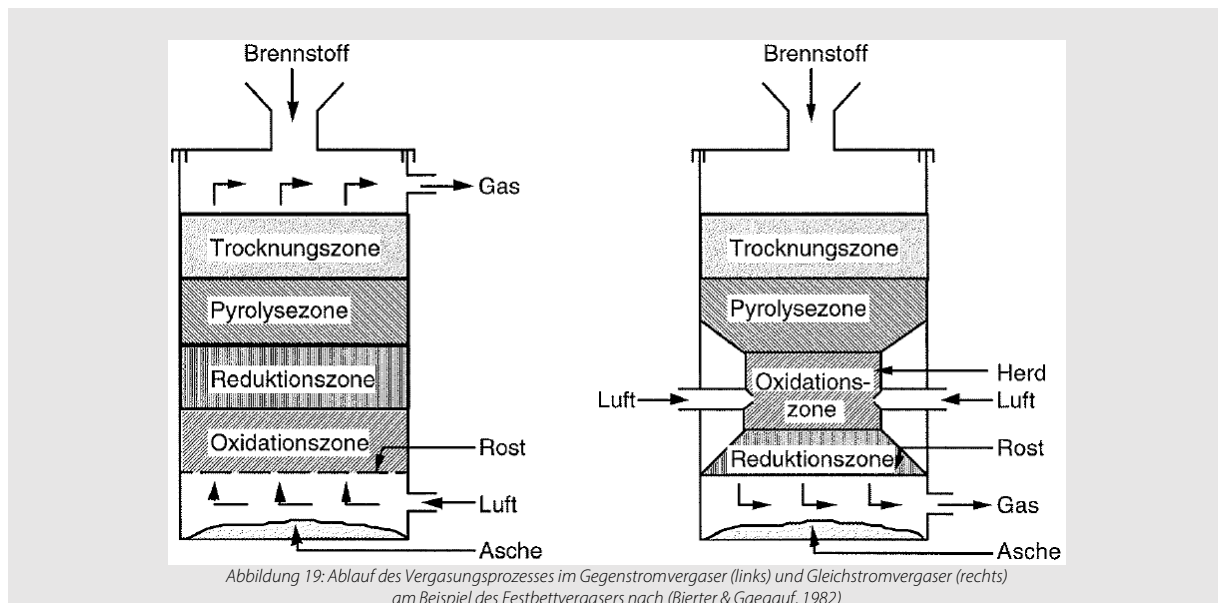
Die Pyrolyse schliesst sich an die Trocknung an. Bei ihr handelt es sich um eine Aufspaltung des Holzes durch Zufuhr von thermischer Energie im Temperaturbereich zwischen 200°C und 600°C (sog. *thermische Zersetzung*). Dabei werden vor allem die Verbindungen der drei Hauptbestandteile des Holzes Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufgebrochen. Es entsteht ein Gas mit mittlerem Heizwert, ein komplex zusammengesetztes Pyrolyseöl und Kohlenstoff.

Die wesentlichen chemisch-physikalischen Vorgänge während der Pyrolyse von Biomasse sind in Tab. 13 zusammengefasst.

Temperatur	Physikalische Vorgänge
250°C	Depolymerisation, Reduktion, Abspaltung von Reaktionswasser, CO, CO ₂ und H ₂ S
300°C	Abspaltung von Cl unter Bildung von HCl
340°C	Bruch aliphatischer Bindungen, Beginn der Abspaltung von CH ₄ und Aliphaten
400°C	Bruch der C-O- und C-N-Bindungen
< 600°C	Cracken von Bitumenstoffen zu thermodynamisch stabileren Stoffen. Entstehung von Aromaten aus Hydroaromaten
> 600°C	Olefinbildung, Dimerisierung zu Butenderivaten mit anschließender Dehydrierung zu Butadien, Dien-Reaktion mit Ethen zu Cyclohexanderivaten, thermische Aromatisierung zu Benzol und höheren Aromaten

Tabelle 13: Chemisch-physikalische Vorgänge während der Pyrolyse nach (Hamm, 1993)

Der Ablauf der auf die Pyrolyse folgenden Teilschritte hängt von der Bauform des Vergasers ab. Durchlaufen Holz und Vergasungsmittel den Vergaser in der gleichen Richtung, so spricht man von einem *Gleichstromvergaser*. Durchläuft das Vergasungsmittel dagegen den Vergaser im Gegenstrom zum Holz, so spricht man von einem *Gegenstromvergaser*. Dementsprechend finden die Teilschritte der Vergasung aus der Sicht des Holzes im Gleichstromvergaser in der Reihenfolge Trocknung, Pyrolyse, Oxidation und Reduktion ab. Beim Gegenstromvergaser laufen sie dagegen in der Reihenfolge Trocknung, Pyrolyse, Reduktion und Oxidation ab.



Oxidation

Bei der Oxidation wird der in der Pyrolyse gebildete Kohlenstoff oxidiert. Hierfür muss dem Vergaser ein Oxidationsmittel zugeführt werden (sog. "Vergasungsmittel"). Bei vielen Vergasern wird Luft oder reiner Sauerstoff für diese Zwecke eingesetzt.

Die während des Vergasungsprozesses ablaufende Oxidation ist mit der Verbrennung verwandt. Allerdings wird bei der Vergasung kein vollständiger Umsatz des Kohlenstoffes angestrebt, da die Bildung von Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) erwünscht ist. Aus diesem Grunde wird das Oxidationsmittel bei der Vergasung unterstöchiometrisch zudosiert, wodurch nur eine partielle Oxidation abläuft und keine vollständige Verbrennung. Als Nebenprodukte entstehen Holzkohle und Russ. Während der partiellen Oxidation wird ebenso wie bei der Verbrennung thermische Energie freigesetzt.

Die wesentlich beteiligten Reaktionen sind wie folgt:

Oxidation von Kohlenstoff:	$C + O_2 = CO_2$	$\Delta H_R = -394 \text{ kJ/mol}$
Oxidation von CO:	$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2$	$\Delta H_R = -283 \text{ kJ/mol}$
Oxidation von H ₂ :	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O \text{ (Dampf)}$	$\Delta H_R = -242 \text{ kJ/mol}$
Partielle Verbrennung:	$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	$\Delta H_R = -111 \text{ kJ/mol}$
	$-CH_2- + \frac{1}{2} O_2 = CO + H_2$	$\Delta H_R = -92 \text{ kJ/mol}$

Reduktion

Die während der Oxidation freiwerdende thermische Energie ermöglicht den Ablauf der Reduktion, bei der das eigentliche Holzgas gebildet wird. Die Reduktion findet an der in den vorherigen Schritten gebildeten Holzkohle statt, vornehmlich durch Reduktion des Kohlenstoffes mit Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O). Im geringen Ausmass findet eine Reduktion von Kohlenmonoxid (CO) bzw. Methanisierung statt.

Die folgenden Reaktionen sind u.a. an der Reduktion beteiligt:

Boudouard-Reaktion:	$C + CO_2 = 2 CO$	$\Delta H_R = 173 \text{ kJ/mol}$
Heterogene Wassergasshift-Reaktion:	$C + H_2O = CO + H_2$	$\Delta H_R = 131 \text{ kJ/mol}$
	$-CH_2- + H_2O = CO + 2 H_2$	$\Delta H_R = 151 \text{ kJ/mol}$
Homogene Wassergasshift-Reaktion:	$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	$\Delta H_R = -41 \text{ kJ/mol}$
Methanbildung:	$C + 2 H_2 = CH_4$	$\Delta H_R = -74 \text{ kJ/mol}$
Methanisierung:	$CO + 3 H_2 = CH_4 + H_2O$	$\Delta H_R = -206 \text{ kJ/mol}$

Die Reaktionsenthalpien ΔH_R der Hauptreaktionen sind im Wesentlichen positiv, d.h. es handelt sich um endotherm ablaufende Reaktionen. Damit diese Reaktionen ablaufen, muss thermische Energie zugeführt werden. Wie bereits erwähnt, stammt diese Energie von der Oxidation.

5.2.1.2 Oxidations- bzw. Vergasungsmittel

Bereits im vorherigen Abschnitt wurde erwähnt, dass für den Vergasungsprozess ein Oxidations- bzw. Vergasungsmittel erforderlich ist. Infrage kommen Sauerstoff (O_2) oder Wasser (H_2O).

Sauerstoff als Vergasungsmittel

Wird auf ein Vergasungsmittel gänzlich verzichtet, so muss dem Prozess die erforderliche thermische Energie von aussen zugeführt werden. Da der Oxidationsprozess nicht ablaufen kann, handelt es sich in solchen Fällen um eine reine Pyrolyse. Als Produkte entstehen vor allem höhermolekulare, organische Verbindungen wie Öle und Teere, aber auch Holzkohle, Kohlenmonoxid und Wasser.

Sauerstoff ist das am meisten verwendete Oxidationsmittel für die Vergasung. In der Praxis sind grundsätzlich zwei Quellen für den Sauerstoff verfügbar:

a) Vergasung mit Luft:

Trockene Luft besteht zu knapp 21 vol.-% aus Sauerstoff. Die Vergasung mit Luft bietet sich vor allem aus Gründen der Verfügbarkeit an, da Luft ohne weitere Vorbehandlung eingesetzt wird. Stickstoff ist mit knapp 78 vol.-% der Hauptbestandteil von Luft. Dementsprechend enthält das Holzgas einen sehr grossen Anteil an Stickstoff (ca. 50 vol.-%). Der Energieinhalt des Holzgases sinkt dadurch deutlich (etwa auf die Hälfte im Vergleich zu Vergasern, die nicht mit Luft als Vergasungsmittel arbeiten).

b) Vergasung mit reinem Sauerstoff:

Die Vergasung mit reinem Sauerstoff bietet den Vorteil, dass kein unerwünschter Stickstoff im Holzgas enthalten ist. Derartige Vergaser sind jedoch, insbesondere im kleineren Anlagengrössenbereich, aufgrund des hohen Aufwandes für die Luftzerlegung kaum wirtschaftlich.

Wasser als Vergasungsmittel

Als Alternative zum reinen Sauerstoff wird aus Kostengründen oft Wasserdampf als Vergasungsmittel eingesetzt. Die Vergasung mit Wasserdampf benötigt allerdings eine Energiezufuhr von aussen, da im Vergleich zum Einsatz von Sauerstoff das Wasser zunächst aufgespalten werden muss. Derartige Vergasungsprozesse, bei denen eine Energiezufuhr von aussen erfolgt, werden auch als *allotherme* Vergasung bezeichnet. Im Gegenzug dazu wird bei der *autothermen* Vergasung die benötigte Wärme durch den Prozess selbst erzeugt.

In der Praxis werden allotherme Wasserdampfvergaser heute zweistufig geplant. In der ersten Stufe wird das Holz mit Wasserdampf partiell vergast. Als Produkte entstehen u.a. Holzgas und Holzkohle. Die Holzkohle wird in einer räumlich getrennten zweiten Stufe mit Luft verbrannt, wobei die für den Vergasungsprozess erforderliche Wärme erzeugt wird. Für den Transport dieser Wärme aus der Verbrennungsstufe in die Vergasungsstufe wird entweder ein Wärmetauscher oder ein Wärmeträgermedium eingesetzt, das zwischen den beiden Stufen zirkuliert. Streng genommen wird die Energie somit nicht von aussen zugeführt, sondern durch die Verbrennung der festen Produkte aus der Vergasung ausserhalb des Vergasungsreaktors erzeugt.

Zusammenhang zwischen Art des Vergasungsmittels und Einsatz von trockenem Holz

Bei Vergasern, die mit Luft als Vergasungsmittel arbeiten, ist eine Trocknung des Holzes nur bis zu einem bestimmten Grad sinnvoll. Bei zu trockenem Holz fehlt die Feuchte für die während der Reduktion stattfindenden Wassergasshift-Reaktion, wodurch der Wasserstoffgehalt abnimmt und die Vergasungstemperatur steigt. Dieser Temperaturanstieg ist bei Festbettvergasern schwer zu kontrollieren. Die Trocknung des Holzes kann sich somit bei Festbettvergasern ab einem gewissen Grad negativ auf den Prozess auswirken.

Beim Einsatz von Wasserdampf dagegen können Vergaser effizienter mit trockenem Holz arbeiten. Da durch den Dampf sowohl der Wasser- als auch der Energieeintrag von aussen erfolgt, kann durch die Vergasung von trockenem Holz ein energiereiches Holzgas erzeugt werden.

5.2.1.3 Grundbauformen von Vergasern

Der untere Leistungsbereich der Vergaser wird im Wesentlichen von sog. *Festbettvergasern* abgedeckt, der obere Leistungsbereich dagegen von *Wirbelschichtvergasern*.

Festbettvergasers

Festbettvergasers sind sehr weit verbreitet, weil sie apparatetechnisch vergleichsweise einfach auszuführen sind. Sie werden als Gleichstrom-, Gegenstrom- oder Querstromvergasers ausgeführt. Die Bezeichnung richtet sich nach der Art und Weise der Führung des Vergasungsmittels im Bezug zum Holz durch den Vergaser. Als Vergasungsmittel wird am häufigsten Luft eingesetzt.

Abb. 19 zeigt den Ablauf des Vergasungsprozesses am Beispiel eines Gegenstromvergasers und eines Gleichstromvergasers. Da bei Gleichstromvergasern das Holz die einzelnen Prozesse der Vergasung gleichmässig von oben nach unten durchläuft, findet ein nahezu vollständiger Umsatz des im Holz enthaltenen Kohlenstoffes statt. Es gelangen nur geringe Mengen an Teere in das Holzgas, da der Grossteil hiervon in der Oxidationszone oxidiert wird. Gegenstrom- und Querstromvergasers erzeugen demgegenüber ein sehr teerreiches Holzgas, da aufgrund der räumlichen Abfolge der Reduktions- und Oxidationszone die Produkte der Pyrolyse nicht vollständig oxidiert werden können (vgl. hierzu Abschnitt 5.2.1.1). Derartiges Holzgas eignet sich hauptsächlich zur direkten Verbrennung.

Wirbelschichtvergasers

Bei Wirbelschichtvergasern wird das Holz mithilfe des Vergasungsmittels fluidisiert (d.h. verwirbelt bzw. aufgewirbelt). Wirbelschichtvergasers besitzen den Vorteil, dass die Temperatur systembedingt gut zu regeln ist, aufgrund einer gleichmässigeren Verteilung innerhalb des Wirbelbettes. Gegenüber Festbettvergasern bieten sie den Vorteil, dass die einzelnen Teilprozesse der Vergasung innerhalb der Wirbelschicht nicht räumlich voneinander getrennt ablaufen, d.h. es findet eine homogene Verteilung statt. Im Vergleich zu Gleichstrom-Festbettvergasern weisen jedoch auch Wirbelschichtvergasers einen höheren Teergehalt auf, da auch hier die Reduktion teilweise räumlich vor der Oxidation abläuft. Dem kann entgegengewirkt werden, indem parallel zum Holz ein katalytisch aktiver Wärmeträger mitverwirbelt wird. Dieser fördert den Abbau von teerhaltigen Komponenten, wodurch auch bei Wirbelschichtvergasern tiefe Teergehalte im Holzgas erzielbar sind.

5.2.2 Evaluierung eines geeigneten Holzvergasungssystems

Auf den ersten Blick scheint es eine nahezu unbegrenzte Auswahl an Vergasersystemen für die Holzvergasung zu geben. Bei näherer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass ein Grossteil dieser Vergasers für die vorliegende Anlage nicht infrage kommen. Dies hat verschiedene Ursachen, die in diesem Abschnitt näher diskutiert werden.

Methodik und Bewertungskriterien

Für die Evaluierung eines geeigneten Vergasersystems wurde ein systematischer Ansatz gewählt, der in Abb. 20 in Form eines Flussdiagrammes dargestellt ist.

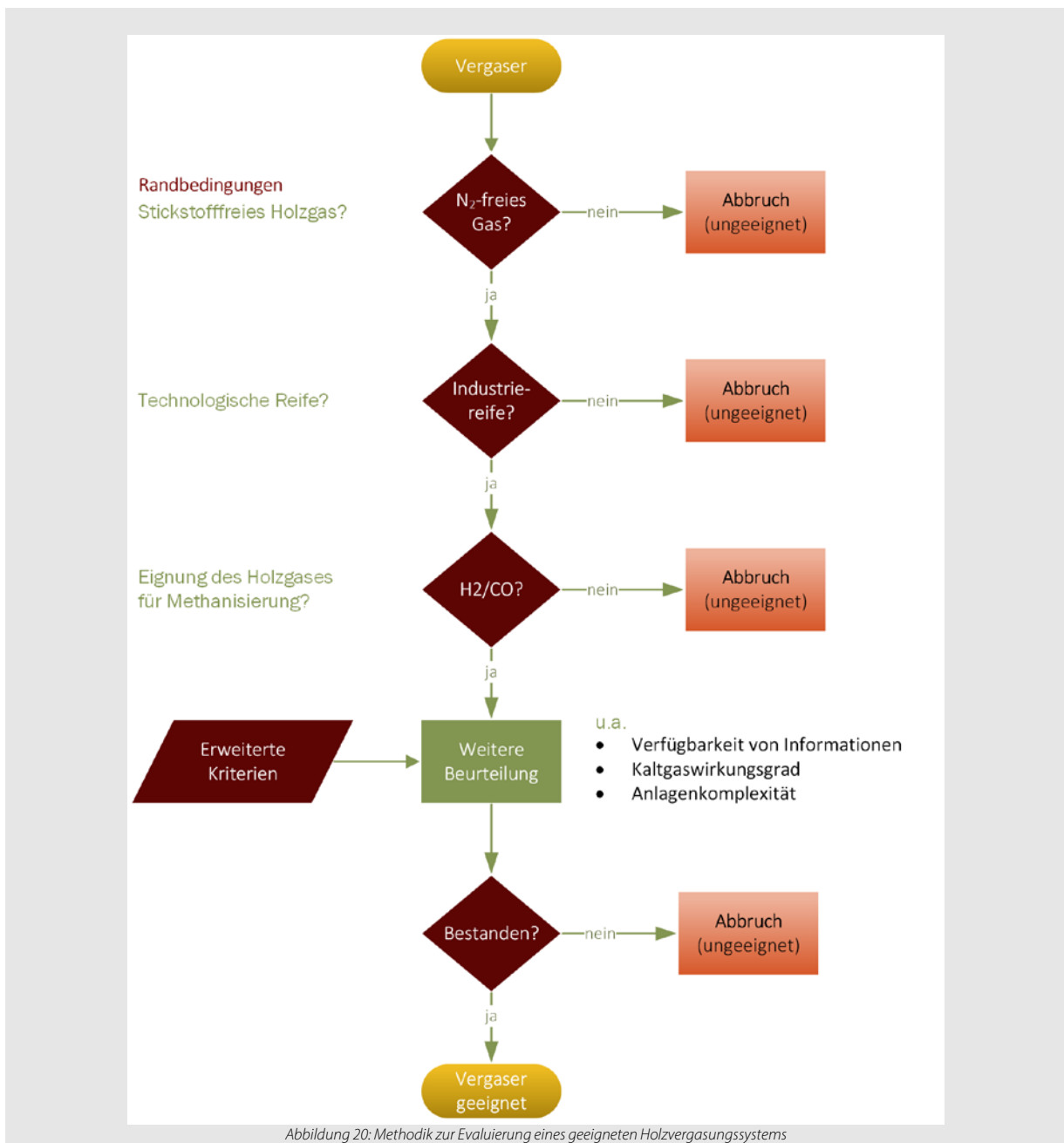


Abbildung 20: Methodik zur Evaluierung eines geeigneten Holzvergassungssystems

Damit ein Vergaser überhaupt für eine weiterführende Beurteilung infrage kommt, muss er zunächst drei Eingangsrandbedingungen erfüllen (sog. K.O.-Kriterien):

1) Stickstofffreies Holzgas?

Der Vergaser muss ein weitgehend stickstofffreies Holzgas produzieren. Stickstoff ist reaktionsträge und weist eine tiefe Siedetemperatur auf, weshalb er sich nur schwer aus dem Holzgas abtrennen lässt. Der Aufwand für eine Stickstoffabtrennung durch z.B. Membran- oder Tieftemperaturzerlegung würde den Gesamtprozess unwirtschaftlich machen. Daher fallen im Prinzip alle Vergaser, die Luft als Vergasungsmittel verwenden, von vornherein weg, obwohl eine Vielzahl hiervon in der Praxis erfolgreich kommerziell betrieben wird (Luft besteht zu 4/5 aus Stickstoff).

2) Technologische Reife?

Der Vergaser muss eine gewisse technologische Reife besitzen. Unterschieden wird zwischen Versuchs-/Labormassstab, Pilot-/Demonstrationsmassstab und kommerziellem Betrieb. Erfüllt ein Vergaser nicht wenigstens das mittlere Kriterium, so gilt er als ungeeignet.

3) Eignung des Holzgases für die Methanisierung?

Das Holzgas muss einen gewissen Mindestgehalt an Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) aufweisen, um eine Methanisierung überhaupt zu ermöglichen. Manche Vergaser produzieren beispielsweise ein sehr wasserstoffhaltiges Gas, welches direkt verstromt wird. Solche Vergaser sind jedoch für eine Methanisierung ungeeignet, da Wasserstoff und Kohlenmonoxid als Edukte für die Methanbildung erforderlich sind.

Sobald ein Vergaser eines der oben genannten K.O.-Kriterien nicht erfüllt, gilt er als ungeeignet und wird nicht weiter betrachtet. Besteht ein Vergaser alle drei Kriterien, erfolgt eine weitergehende Beurteilung gemäss der in Tab. 14 aufgeführten Bewertungskriterien.

Wertezuordnung			
	-	+	++
Eingangsbewertung (K.O.-Kriterien):			
Stickstofffreies Gas?	> 4 vol.-% N ₂		< 4 vol.-% N ₂
Technologische Reife?	Labor-/Pilotmassstab (< 1'000 h)	Pilot-/Demonstrationsmassstab (> 1'000 h)	kommerzieller Betrieb (Industriereife)
Holzgasqualität? (Eignung für Methanisierung)	schlecht (sehr aufwendige Aufbereitung erforderlich)	mittel (aufwendige Aufbereitung erforderlich)	gut (moderate Aufbereitung erforderlich)
Weitere Kriterien:			
Verfügbarkeit öffentlich zugänglicher Information?	kaum bis nicht	schwer	sehr gut, viele Publikationen
Kaltgaswirkungsgrad?	niedrig (< 70%)	mittel (70%)	hoch (≥ 75%)
Anlagenkomplexität?	sehr hoch	mittel	gering

Tabelle 14: Bewertungs- und K.O.-Kriterien für Evaluierung des Holzvergassungssystems

Auswahl eines geeigneten Holzvergassungssystems

Mit der im vorherigen Abschnitt besprochenen Methodik wurden die am Markt gängigen, verfügbaren Vergasertypen beurteilt. Die Resultate dieser Evaluierung sind in Tab. 15 zusammengefasst.

Auffallend ist, dass etwa ein Drittel der Holzvergassungssysteme bereits von vornherein nicht in Betracht kommen, da sie kein weitgehend stickstofffreies Holzgas erzeugen. Ein weiteres Viertel der Holzvergassungssysteme verfügt über keine hinreichende technologische Reife, d.h. diese Vergaser befinden sich aktuell überwiegend noch im Labor- und Pilotmassstab.

Ein Drittel der Holzvergassungssysteme erfüllt die ersten beiden Randbedingungen, d.h. sie produzieren ein weitgehend stickstofffreies Holzgas und verfügen über eine hinreichende technologische Reife. Allerdings erfüllen sie die Anforderungen hinsichtlich der Holzgasqualität nicht. Hierbei weist der überwiegende Anteil dieser Gruppe ein Holzgas mit viel zu geringem Kohlenmonoxidgehalt auf. Das Gas ist sehr wasserstoffreich und kommt somit für eine Methanisierung nicht in Betracht.

Letztendlich bestehen die folgenden beiden Holzvergasungssysteme die drei Eingangsrandbedingungen der Evaluierung:

- a) der Heatpipe-Reformer von AGNION und
- b) der FICFB-Vergaser von REPOTEC/TU WIEN.

Der Heatpipe-Reformer von AGNION kam im Jahre 2007 auf den Markt, die Entwicklung läuft bereits seit 1999. Für technische Details zum Verfahren sei an dieser Stelle auf den Anhang Abschnitt 9.2.1 (Seite 95) verwiesen. Im Jahre 2012 wurde eine kommerziell betriebene Demonstrationsanlage in Grassau (Deutschland) und ebenfalls 2012 die erste Kundenanlage in Auer (I) in Betrieb genommen.

Der FICFB-Vergaser wurde von REPOTEC gemeinsam mit der TU WIEN entwickelt. Dieser Vergasertyp ist derzeit der einzige Holzvergasertyp, der in grösseren Leistungsklassen erfolgreich kommerziell betrieben wird. Der bekannteste Vergaser dieses Typs ist das Biomassekraftwerk in Güssing (Österreich), welches seit 2002 erfolgreich betrieben wird. Seither wurden viele Kinderkrankheiten beseitigt. Angesichts der langen Betriebsdauer kann auf eine sehr umfangreiche Betriebserfahrung zugegriffen werden. Aufgrund der regen Forschungstätigkeit mit der Vergasungsanlage am Standort und des erzeugten Holzgases existiert ein sehr umfangreiches und öffentlich verfügbares Datenmaterial. Auch die in dieser Studie betrachtete Wirbelschichtmethanisierung wurde am Standort in Güssing in Verbindung mit dem Vergaser erfolgreich getestet und betrieben (vgl. Abschnitt 10.2).

Fazit

Die Vergaserevaluation hat ergeben, dass für die vorliegende Studie nur zwei Holzvergasungstypen infrage kommen. Bei der Mehrheit der übrigen Holzvergasungstypen eignet sich entweder das Holzgas nicht für eine Methanisierung oder die Anlagen verfügen über noch keine hinreichende technologische Reife. Sie können daher nicht in Betracht gezogen werden.

Leider war AGNION nicht willens oder in der Lage, ein Angebot für diese Studie zu unterbreiten. Daher wird der FICFB-Vergaser von REPOTEC/TU WIEN gewählt. Diese Wahl besitzt den Vorteil, dass zahlreiche Betriebserfahrungen mit der Methanisierung des Holzgases von diesem Vergasertyp existieren.

Entwickler bzw. Technologieinhaber	Technologie	Grundprinzip	Stickstoffreies Holzgas?	Technologische Reife?	Holzgas-qualität?	Informationen?	Kaltgas-wirkungsgrad?	Anlagen-komplexität?
Range Fuels	K2	Flugstrom	- (k.A.)					
Carbona	RENUGAS	Stationäre Wirbelschicht	-					
Foster Wheeler Energy	Ecogas	Stationäre Wirbelschicht	-					
Enerkem	BIOSYN	Stationäre Wirbelschicht	-					
Foster Wheeler Energy	Foster Wheeler atmospheric CFB	Zirkulierende Wirbelschicht	-					
VVBGC	CHRISGAS CFB conversion	Zirkulierende Wirbelschicht	-					
VTT	UCG	Zirkulierende Wirbelschicht	-					
Fraunhofer UMSICHT	BHPP	Zirkulierende Wirbelschicht	-					
Startech Environmental Corporation	PCS	Plasma	-					
CHOREN	Carbo-V	Flugstrom	++	-				
Mitsubishi Heavy Industrie	BGMS	Flugstrom	++	-				
Iowa State University	BECON	Stationäre Wirbelschicht	++	-				
CUTEC Institute	CUTEC	Zirkulierende Wirbelschicht	++	-				
ECN	MILENA	Doppelwirbelschicht	++	-				
Solena Group	SPGV/IPGCC	Plasma	++	-				
Pearson Technology	Pearson Technology Process	Flugstrom	++	+	-			
ThermoChem Recovery International	"Pulse-enhanced" BFB gasifier	Stationäre Wirbelschicht	++	+	-			
Uhde	High Temperature Winkler	Zirkulierende Wirbelschicht	++	+	-			
SilvaGas Corporation	SilvaGas biomass gasification process	Doppelwirbelschicht	++	+	-			
Taylor Biomass Energy	Taylor Gasification Process	Doppelwirbelschicht	++	+	-			
Plasco Energy Group Inc	Plasco Conversion System	Plasma	++	+	-			
InEnTec LLC	Plasma Enhanced Melter (PEM)	Plasma	++	+	-			
FZK/KIT	"bioliq"	Flugstrom	++	++	-			
Westinghouse Plasma Corp	PGVR	Plasma	++	++	-			
Agnion	Heatpipe-Reformer	Doppelwirbelschicht	++	+	+	+	++	+
REPOTEC/TU WIEN	FICFB	Doppelwirbelschicht	++	++	++	++	++	+

¹⁾ Der Technologieinhaber ist nicht zwangsläufig identisch mit dem Anbieter des Vergasers am Markt. Teilweise werden Lizenzen vergeben, sodass mehrere Anbieter am Markt verfügbar sind, die unterschiedliche Leistungsklassen anbieten.

Tabelle 15: Evaluierung eines geeigneten Holzvergasungssystems im Detail

5.2.3 Beschreibung des ausgewählten FICFB-Vergasers

Die Lokalisierung der Holzvergasungsanlage im Layout der Bio-SNG-Anlage ist in Abb. 21 dargestellt. Die einzelnen Prozessschritte des gewählten FICFB-Vergasers werden nachfolgend näher besprochen.

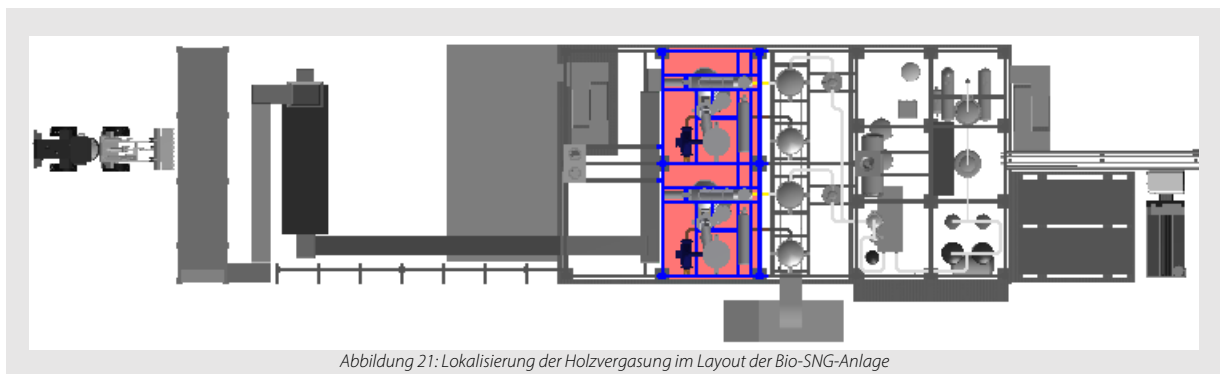


Abbildung 21: Lokalisierung der Holzvergasung im Layout der Bio-SNG-Anlage

Beim FICFB-Vergaser (sog. *Fast Internally Circulating Fluidised Bed*) handelt es sich um eine Doppelwirbelschichtvergasung. Das Verfahren wurde von der Firma REPOTEC gemeinsam mit der TU Wien entwickelt. Der prinzipielle Prozessablauf beim FICFB-Vergaser ist in Abb. 22 als Blockfließbild dargestellt und wird nachfolgend näher erläutert.

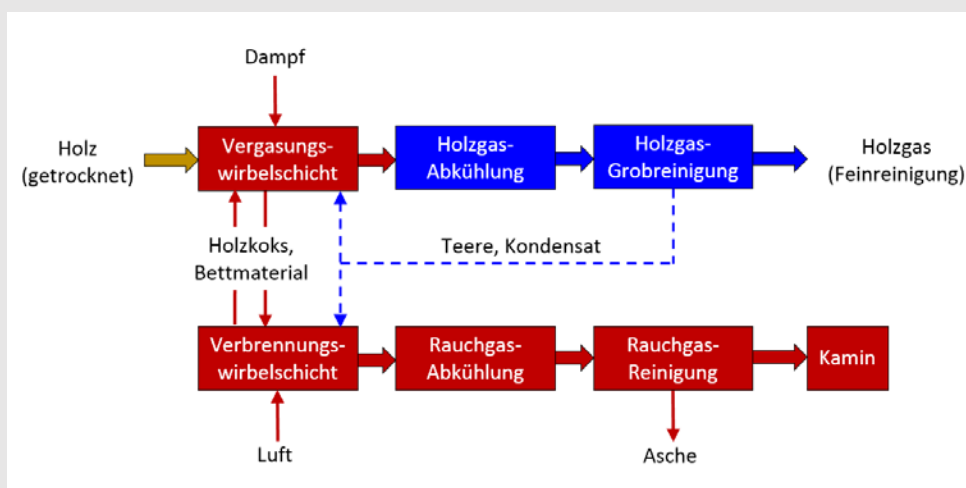


Abbildung 22: Verfahrensabschnitte des gewählten FICFB-Vergasers

Die Doppelwirbelschicht besteht aus zwei Kammern, der eigentlichen Vergasungswirbelschicht (stationäre Wirbelschicht) und der Verbrennungswirbelschicht (zirkulierende Wirbelschicht). Der prinzipielle Aufbau der beiden Wirbelschichten ist in Abb. 23 schematisch dargestellt.

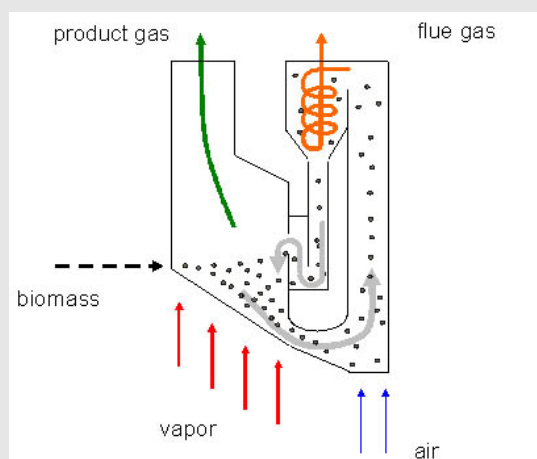


Abbildung 23: Prinzipieller Aufbau des FICFB-Vergasers

Vergasungswirbelschicht

Die vorgetrockneten Holzschnitzel (Biomasse) werden in die Vergasungswirbelschicht eingebracht, wobei sich innerhalb kurzer Zeit heisses Bettmaterial aus der Verbrennungswirbelschicht mit ihnen vermischt. Dabei wird die im Bettmaterial gespeicherte Wärmeenergie auf die Holzschnitzel übertragen, was den Ablauf der Vergasungsreaktionen bei Temperaturen von 900°C ermöglicht.

Die Vergasungsreaktion findet bei Atmosphärendruck statt. Dies birgt gegenüber Vergasungsprozessen bei Überdruck sicherheitstechnische Vorteile, da im Falle einer Leckage weder brennbares und gesundheitsschädliches Holzgas austreten noch Luft aus der Umgebung in den Vergaser eintreten kann.

Das produzierte Holzgas tritt mit etwa 850°C aus der Vergasungswirbelschicht aus, wird auf etwa 150°C abgekühlt und anschliessend zur Holzgas-Grobreinigung weitergeleitet.

Verbrennungswirbelschicht

Die Vergasungswirbelschicht wird durch einen eingebauten Düsenboden mit überhitztem Wasserdampf fluidisiert. Nicht vergaste Bestandteile der Holzschnitzel (sog. *Holzkoks*) wandern mit dem Bettmaterial über einen fluidisierten Verbindungskanal in die Verbrennungswirbelschicht. Diese ist als expandierende schnelle Wirbelschicht ausgebildet und wird mit vorgewärmter Luft betrieben. Durch die Verbrennung des Holzkokes wird das Bettmaterial auf ca. 950°C aufgeheizt. Zur Temperaturregelung wird ein Teil des von der Vergasungswirbelschicht produzierten Holzgases in die Verbrennungswirbelschicht zurückgeführt und dort in der Stützflamme verbrannt. Alternativ kann ein Zusatzbrennstoff verwendet werden. Zum Anfahren der Anlage ist ein Anfahrbrenner installiert.

Als zirkulierendes Bettmaterial wird ein Wärmeträger eingesetzt, bestehend aus einem inerten Sand oder katalytisch aktivem Material zur Reduktion von Teeren (z.B. Olivin).

Das Rauchgas aus der Verbrennungswirbelschicht wird in einem Heissgaszyklon entstaubt. Die abgeschiedenen Partikel werden über einen Siphon in die Vergasungswirbelschicht zurückbefördert und tragen damit die Wärme für die Vergasung ein.

Das Rauchgas gelangt in eine Nachbrennkammer, wodurch die zur Erreichung der garantierten Abgasemissionswerte notwendige Verweilzeit gewährleistet ist. Die in der Verbrennungswirbelschicht anfallenden groben Inertbestandteile (sog. *Bettasche*) werden ausgeschleust, gekühlt und in einen Container abgefüllt.

Das Rauchgas aus der Verbrennungswirbelschicht wird dreistufig gekühlt, wobei die Wärme u.a. zur Vorwärmung der Verbrennungsluft sowie zur Dampfüberhitzung genutzt wird. Das Rauchgas wird dabei von 950°C auf 150°C abgekühlt.

Abschliessend wird das Rauchgas in einem Gewebefilter entstaubt. Dieser Filter wird mittels Druckluftpulsen abgereinigt. Auf der Reingasseite des Filters befindet sich ein Rauchgasgebläse, welches das Rauchgas zum Kamin fördert.

Holzgas-Grobreinigung

Die Lokalisierung der Holzgas-Grobreinigung im Layout der Bio-SNG-Anlage ist in Abb. 24 dargestellt.

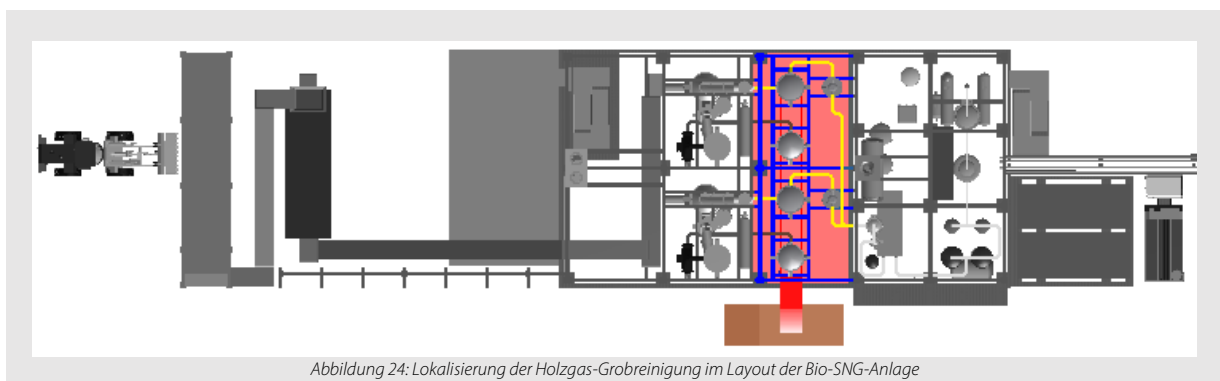


Abbildung 24: Lokalisierung der Holzgas-Grobreinigung im Layout der Bio-SNG-Anlage

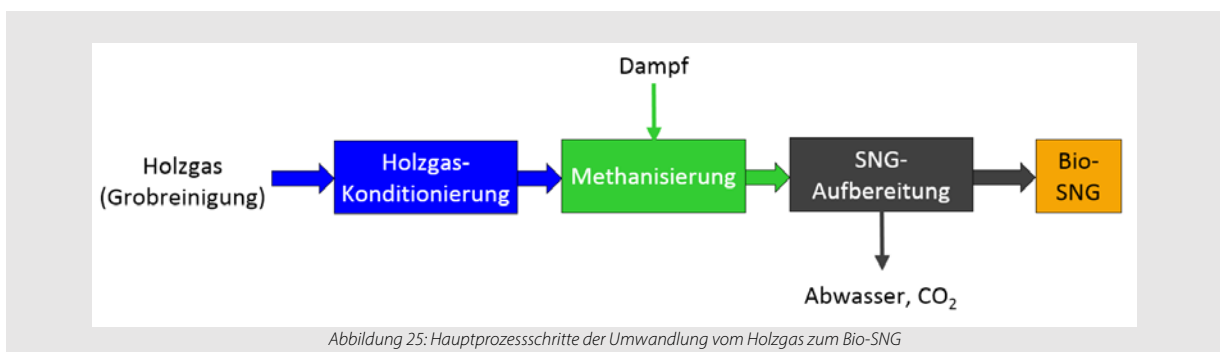
Das Holzgas tritt mit etwa 850°C aus der Vergasungswirbelschicht aus und wird anschliessend auf etwa 150°C abgekühlt. Der Kühler besteht aus zwei Kühlstufen. Die zweite Kühlstufe ist redundant ausgeführt, um eine höhere Verfügbarkeit zu gewährleisten. Die dabei gewonnene Wärme wird zur Holz Trocknung eingesetzt. Eine hohe Gasgeschwindigkeit und hohe Oberflächentemperatur im Kühler verringern die Verschmutzungsneigung.

Nach der Kühlung wird das Holzgas in einem Filter entstaubt. Der Filter wird mittels Stickstoffpulsen abgereinigt. Der abgeschiedene Staub (sog. *Flugkoks*) wird wegen seines Gehaltes an brennbaren Substanzen zurück in die Verbrennungswirbelschicht geführt (Flugkoksrückführung).

Nach der Filtration wird das Holzgas in einem Gaswäscher weiter abgekühlt, wobei kondensierbare Teere und Kondensatwasser abgeschieden werden. Als Waschmedium wird ein organisches Ester eingesetzt. Das anfallende Kondensat wird vom Boden des Wäschersumpfes abgezogen und zur Dampferzeugung genutzt.

5.3 METHANISIERUNG

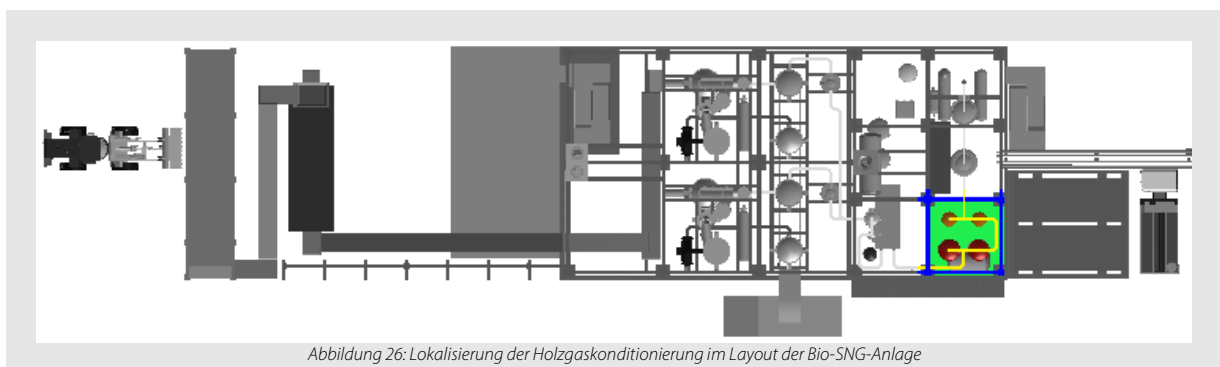
Die Methanisierung ist der zweite Schritt des Umwandlungsprozesses vom Holz zum Bio-SNG. Dabei durchläuft das vom Vergaser produzierte Holzgas im Wesentlichen die in Abb. 25 dargestellten Prozessschritte.



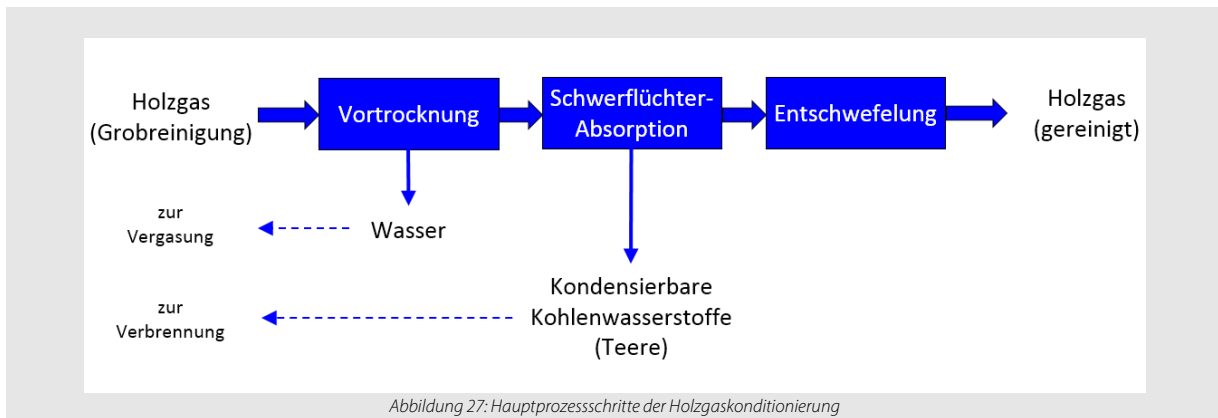
5.3.1 Holzgaskonditionierung

Das in der Vergasungsanlage vorgereinigte Holzgas enthält immer noch eine ganze Reihe an Verunreinigungen und unerwünschten Begleitstoffen, die in den nachfolgenden Prozessschritten zu Störungen führen könnten bzw. diese gar zum Erliegen bringen könnten. In erster Linie handelt es sich um kondensierbare Kohlenwasserstoffe (sog. *Teere*), Schwefelverbindungen hauptsächlich in Form von Schwefelwasserstoff (H_2S) und Carbonylsulfid (COS) sowie Ammoniak (NH_3). Das Holzgas muss daher zunächst einer Feinreinigung unterzogen werden (sog. *Konditionierung*), um alle unerwünschten Komponenten aus dem Holzgas zu entfernen. Dabei werden die Anforderungen an den Abreinigungsgrad für die jeweilige Komponente massgeblich durch die nachfolgenden Prozessschritte der Methanisierung bestimmt.

Abb. 26 zeigt die Lokalisierung der Holzgaskonditionierung im Layout der Bio-SNG-Anlage. Auf die einzelnen Prozessabschnitte wird im Folgenden näher eingegangen.



Die Hauptprozessschritte der Holzgaskonditionierung sind in Abb. 27 dargestellt und werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.



5.3.1.1 Vortrocknung des Holzgases

Das aus der Vergasung kommende Holzgas ist mit Wasser gesättigt. Da Wasser die nachfolgenden Prozessschritte im erheblichen Masse stören kann, wird es durch Abkühlung des Gases bis auf einen gewissen Taupunkt aus dem Holzgas entfernt. Hierbei kondensieren im geringen Masse auch ein Teil der im Holzgas enthaltenen schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffe mit aus (sog. *Teere*). Diese werden von der wässrigen Phase getrennt und ebenso wie das kondensierte Wasser zurück zur Vergasungsanlage geführt. Dort wird das Wasser nach einer Aufbereitung wieder zur Dampferzeugung und somit wieder für den Vergasungsprozess genutzt, d.h. das Wasser wird prozessintern recycelt. Da die kondensierten Teere einen hohen Heizwert besitzen, werden sie der Verbrennungswirbelschicht zugeführt. Auf diese Weise wird der Gesamtwirkungsgrad der Anlage nicht beeinträchtigt, anders als wenn diese energiereichen Kondensate als Abfallprodukte aus dem Prozess ausgeschleust würden.

5.3.1.2 Schwerflüchter-Absorption

Das Holzgas enthält eine ganze Reihe an Kohlenwasserstoffen, die unterhalb von 100°C bis 250°C kondensieren. Werden diese Teere nicht entfernt, so entstehen an kalten Oberflächen durch Kondensation feste oder sehr zähflüssige Ablagerungen innerhalb von Anlageteilen. Nachfolgende Prozessschritte könnten dementsprechend erheblich gestört bzw. gar zum Erliegen gebracht werden. Daher ist es wichtig, diese Teere aus dem Holzgas zu entfernen.

Die Entfernung der Teere aus dem Holzgas erfolgt durch eine *Schwerflüchter-Absorption*. Ziel ist es, alle unerwünschten Teere nahezu vollständig aus dem Holzgas abzuscheiden. Zu diesem Zweck wird das vorgetrocknete Holzgas in eine Absorptionskolonne geführt. Auf seinem Weg durch die Kolonne werden die unerwünschten Teere mithilfe einer Waschflüssigkeit aus dem Holzgas "förmlich" herausgewaschen.

Das Holzgas verlässt die Absorptionskolonne im oberen Bereich der Kolonne, während die mit den Kohlenwasserstoffen beladene Waschflüssigkeit im unteren Bereich abgezogen und zu einer Desorptionskolonne geführt wird. Dort wird die Waschflüssigkeit durch Abtrennung der Teere regeneriert und schliesslich wieder zurück zur Absorptionskolonne geführt.

Die Kombination aus Absorptions- und Desorptionskolonne ermöglicht eine Kreislaufführung der Waschflüssigkeit. Durch das zyklische Beladen und Regenerieren der Waschflüssigkeit wird eine konstant hohe Abscheideleistung der Absorptionskolonne gewährleistet bei gleichzeitiger Minimierung des Waschmitteleinsatzes.

5.3.1.3 Entschwefelung

Schwefelverbindungen stellen eine grosse Gefahr für den Katalysator der Methanisierung dar. Sie zerstören die katalytisch aktiven Zentren, die auf der Oberfläche des Katalysators verteilt sind und führen dadurch unweigerlich zu einer irreversiblen Deaktivierung des Katalysators. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer sog. *Vergiftung* des Katalysators. Aus diesem Grunde ist eine sorgfältige Schwefelabtrennung aus dem Holzgas massgebend für eine lange Betriebsdauer des Katalysators bei gleichzeitig hoher Aktivität.

Die Entfernung der Schwefelverbindungen aus dem Holzgas erfolgt durch die folgenden beiden Prozessschritte:

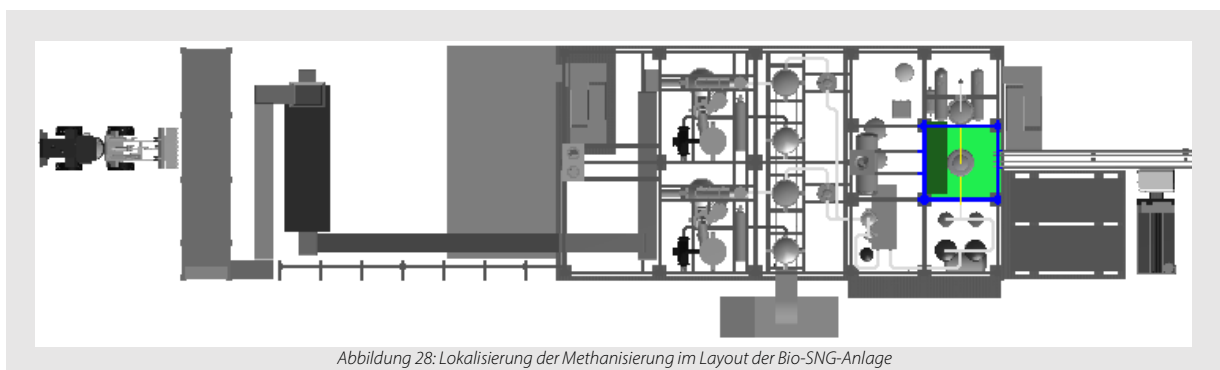
- Fein-Entschwefelung auf tiefem Temperaturniveau in einem Adsorber mit speziell für die Abscheideaufgabe geeigneter Aktivkohle
- Feinst-Entschwefelung auf höherem Temperaturniveau in einem Zinkoxid-Adsorber zur Beseitigung von Spuren an Schwefelwasserstoffverbindungen unterhalb eines definierten Grenzwertes aus dem Holzgas

Die Entfernung der Schwefelverbindungen bildet den Abschluss der Holzgaskonditionierung, d.h. alle potenziell störenden Verunreinigungen für die Methanisierung sind nach Abschluss dieses Prozessschrittes aus dem Holzgas entfernt.

5.3.2 Methanisierung

Die Methanisierung ist das Kernstück der Umwandlung des Holzgases zum Bio-SNG. Hierbei wird das Kohlenstoffmonoxid aus dem Holzgas zu Methan umgesetzt. Als Nebenprodukte fallen Kohlenstoffdioxid und Wasser an, weshalb das in der Methanisierung gebildete Gas zunächst als "Roh-SNG" bezeichnet wird.

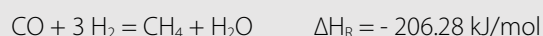
Die Lokalisierung der Methanisierung im Layout der Anlage ist in Abb. 28 dargestellt. Auf einzelne Aspekte der Methanisierung wird nachfolgend näher eingegangen.



5.3.2.1 Grundlagen der Wirbelschichtmethanisierung

Chemische Grundlagen

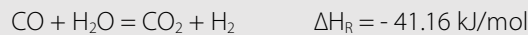
Die Methanisierung ist eine heterogen katalysierte Reaktion von Kohlenmonoxid (CO) mit Wasserstoff (H₂) zu einem Gemisch aus Methan (CH₄) und Wasser (H₂O).



Im ideal stöchiometrischen Fall reagieren Kohlenmonoxid und Wasserstoff im Verhältnis von 1:3 miteinander, d.h. für den Umsatz von einem Molekül Kohlenmonoxid werden drei Moleküle Wasserstoff benötigt. Das Holzgas enthält zwar eine signifikante Menge Wasserstoff, allerdings nicht ausreichend für das erforderliche CO/H₂-Verhältnis.

Die fehlende Menge an Wasserstoff wird durch die Wassergasshift-Reaktion erzeugt. Für diese Zwecke muss dem Prozess Wasser zugeführt werden. Da der Katalysator beide Reaktionen katalysiert, kann die Shift-Reaktion parallel zur Methanisierung im selben Reaktor durchgeführt werden.

Bei der Wassergasshift-Reaktion reagieren Kohlenmonoxid (CO) und Wasser (H₂O) zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂).



Es ist ersichtlich, dass beide Reaktionen Kohlenmonoxid (CO) als Ausgangsstoff benötigen, d.h. das für die Bildung des fehlenden Wasserstoffs verwendete Kohlenmonoxid wird nicht in Methan umgesetzt. Parallel dazu entsteht neben Methan (CH₄) auch Kohlendioxid (CO₂), das in einem späteren Prozessschritte vom Methan abzutrennen ist.

Bei beiden Reaktionen handelt es sich um Gleichgewichtsreaktionen. Die Wassergasshift-Reaktion ist eine Reaktion ohne Volumenänderung und damit druckunabhängig. Das Gleichgewicht wird im Temperaturbereich zwischen 250°C bis 800°C nicht signifikant von der Temperatur beeinflusst. Damit beeinflussen die Prozessbedingungen Druck und Temperatur in erster Linie nur noch die Methanisierung.

Die Methanisierung beginnt oberhalb von 600°C in die umgekehrte Richtung abzulaufen (sog. *Dampfreformierung*). Oberhalb von 800°C ist zudem mit einer thermischen Zersetzung des Methans zu rechnen, wobei sich Kohlenstoff bildet, der zu einer Schädigung des Katalysators führen kann. Dieses Phänomen kann auftreten, sollte es während der Reaktion zu lokalen Temperaturspitzen (sog. *Hot Spot*) innerhalb des Reaktors kommen.

Wirbelschichtverfahren

Die Methanisierung ist stark exotherm, was zur Bildung von Wärme während der Reaktion führt. Um hohe Temperaturen und damit eine Schädigung des Katalysators zu verhindern, muss die Wärme aus dem Reaktor abgeführt werden. Aus diesem Grunde wird die Methanisierung in einem Wirbelschichtreaktor durchgeführt, der über einen integrierten Wärmetauscher verfügt.

Die eingesetzte Wirbelschichtmethanisierung wurde von CTU gemeinsam mit dem Paul Scherrer Institut entwickelt und im industriellen Massstab erfolgreich technisch erprobt und optimiert (siehe hierzu Abschnitt 10.2 im Anhang). Gegenüber der konventionellen Festbettmethanisierung bietet die Wirbelschichtmethanisierung eine ganze Reihe an Vorteilen, die in Tab. 16 zusammengefasst sind. Für Grundlagen zur Festbett- und Wirbelschichtmethanisierung sei an dieser Stelle auf den Anhang (Abschnitt 10.2 Seite 98) verwiesen. Die wohl wichtigsten Vorteile sind die einstufige Reaktorausführung und die isotherme Reaktionsführung. Dadurch werden sowohl Material als auch Katalysator im erheblichen Masse eingespart. Nachteil ist, dass die Hochskalierung sehr anspruchsvoll und ein abriebfester Katalysator erforderlich ist. Auf diesem Gebiet hat CTU gemeinsam mit dem PSI inzwischen ein grosses Mass an Erfahrung gewinnen können.

	Festbettreaktor	Wirbelschichtreaktor
Vorteile	– Stand der Technik für Kohlevergasung – Vergleichsweise einfache Konstruktion	– Einstufig – Isotherm (guter Wärmetransport durch integrierten Wärmetauscher) – Vermeidung der Katalysator-deaktivierung (unempfindlich bei Anwesenheit von Olefinen)
Nachteile	– Mehrstufig – Adiabatisch (schlechter Wärmetransport; "Hot Spots") – Thermische Spannungen im Apparat – Deaktivierung des Katalysators (insbesondere bei Anwesenheit von Olefinen)	– Hochskalierung anspruchsvoll – Abriebfester Katalysator erforderlich

Tabelle 16: Vor- und Nachteile der Methanisierung im Festbett- und Wirbelschichtreaktor

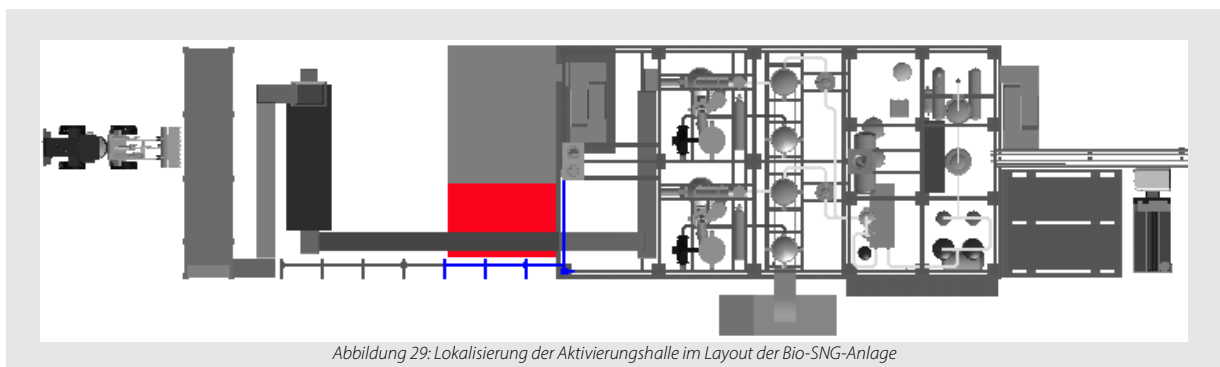
5.3.2.2 Katalysator-Handling

Die Methanisierung von Holzgas ist eine katalytische Reaktion. Der Einsatz eines Katalysators erlaubt die Durchführung der Reaktion bei moderaten Druck- und Temperaturverhältnissen. Allerdings unterliegen solche heterogenen Katalysatoren naturgemäß einer gewissen Deaktivierung, so dass sie von Zeit zu Zeit ausgetauscht werden muss. Für die betrachtete Anlage ist ein Katalysatoraustausch einmal jährlich vorgesehen.

Der frische, noch unbenutzte Katalysator wird in einer katalytisch passiven Form zur Anlage geliefert und muss dort in die katalytische aktive Form überführt werden. Für diese Zwecke gibt es einen mobilen Aktivierungsreaktor, in dem der passive Katalysator zunächst aktiviert und im Anschluss in den Methanisierungsreaktor gefüllt wird.

Katalysatoraktivierung

Die Aktivierung des Katalysators findet unter Berücksichtigung von Sicherheits- und Umweltaspekten in einer separaten Halle statt. Die Lokalisierung dieser Aktivierungshalle im Layout der Anlage ist in Abb. 29 dargestellt.



In der Aktivierungshalle wird der transportable Aktivierungsreaktor befüllt. Im Anschluss erfolgt die Aktivierung, die im eigentlichen Sinne eine Reduktion des Katalysators bei einem definierten Temperaturprogramm ist.

Aufgrund seines Schwermetallgehaltes wird der Katalysator als karzinogen und allergieauslösend eingestuft. Daher werden spezielle Schutzmassnahmen getroffen, um die mit dem Katalysator arbeitenden Personen zu schützen (z.B. persönliche Schutzausrüstung). Hier zeigt sich der Vorteil der Aktivierungshalle, die eine räumliche Trennung des Katalysator-Handlings vom übrigen Teil der Anlage gestattet.

Im reduzierten Zustand ist der Katalysator sehr sauerstoffempfindlich, da Sauerstoff wieder zu einer Passivierung des Materials führen würde. Dies wird durch zusätzliche Schutzvorkehrungen verhindert wie z.B. eine redundante Verfügbarkeit von Inertgas sowie eine auf Dauer technisch dichte Ausführung der Aktivierungseinheit. Bis zum Zeitpunkt der Befüllung in den Methanisierungsreaktor verbleibt der aktivierte Katalysator daher in einer inerten Gasatmosphäre, die messtechnisch permanent überwacht wird.

Nach Ablauf seiner Lebenszeit wird der gebrauchte Katalysator innerhalb des Methanisierungsreaktors mit einem Stickstoff/Luft-Gemisch langsam oxidiert. Diese Passivierung ermöglicht ein gefahrloses Entleeren des Reaktors, bevor das Material der Entsorgung zugeführt werden kann. Er stellt aufgrund seines Metallgehaltes auch in dieser Form noch einen Wert dar.

Grundsätzlich sind alle in die Befüllung und Entleerung von Aktivierungs- und Methanisierungsreaktor involvierten Systeme und Anlagenbereiche so ausgeführt, dass ein sicherer Umgang mit dem Material unter Berücksichtigung des Personen- und Umweltschutzes möglich ist. Hierzu zählen neben den bereits oben genannten Massnahmen vor allem spezielle Kupplungs- und Schleusensysteme, die einen sicheren Materialtransfer von dem einen in den anderen Apparat erlauben.

5.3.3 Roh-SNG-Aufbereitung

Nach der Methanisierung ist eine Aufbereitung des Gases erforderlich, bevor es in das lokale Erdgasnetz eingespeist werden kann. Hierbei gilt es in erster Linie, die während der Methanisierung gebildeten Nebenprodukte aus dem Gas abzutrennen, um die erforderlichen Reinheitskriterien für die Einspeisung ins Erdgasnetz zu erreichen. Abb. 30 zeigt die Lokalisierung der Roh-SNG-Aufbereitung im Layout der Bio-SNG-Anlage.



Abbildung 30: Lokalisierung der Roh-SNG-Aufbereitung im Layout der Bio-SNG-Anlage

In Abb. 31 sind die Prozessschritte der Roh-SNG-Aufbereitung dargestellt, die im Wesentlichen aus den folgenden Schritten bestehen:

- 1) CO₂-Abtrennung
- 2) Trocknung
- 3) H₂-Abtrennung
- 4) Odorierung inkl. Gasanalyse

Nach Abschluss dieser Aufbereitungskette erfolgt die Einspeisung des Bio-SNGs in das Erdgasnetz am Standort.

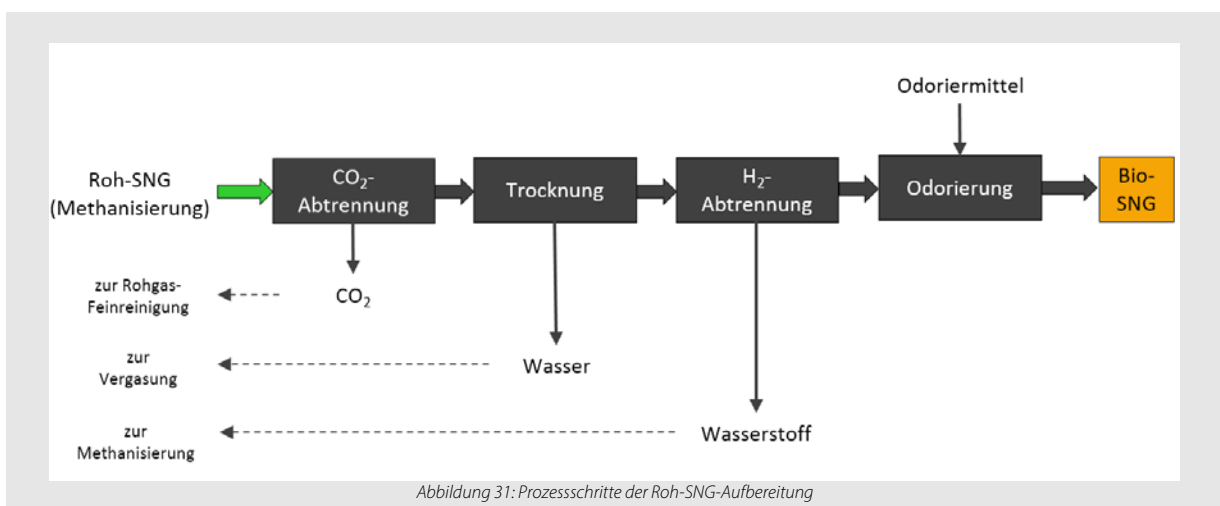


Abbildung 31: Prozessschritte der Roh-SNG-Aufbereitung

CO₂-Abtrennung mittels Aminwäsche

Bei der vorliegenden Bio-SNG-Anlage sind bereits im Vorfeld des Prozessverlaufes typische Verunreinigungen wie beispielsweise organische und anorganische Schwefelverbindungen aus dem Biogas entfernt worden. Daher kann mit der Aminwäsche ein Verfahren zur CO₂-Abtrennung eingesetzt werden, das rein selektiv bzgl. des abzutrennenden Kohlendioxids ist.

Bei der *Aminwäsche* wird das CO₂ durch eine chemische Absorption aus dem Roh-SNG entfernt. Hierbei geht das CO₂ eine chemisch-reversible Verbindung mit dem Waschmittel ein, welches aus einer wässrigen Aminlösung besteht. Weitere Details zur Aminwäsche sind im Anhang Abschnitt 10.3 enthalten. Das Verfahren ist Stand der Technik und weit verbreitet in der Erdgas-Industrie ('sour gas sweetening').

Da es sich bei dieser Form der CO₂-Abtrennung um eine chemische Reaktion und keinen rein physikalischen Stoffaustausch handelt, tritt kein "Methan-Schlupf" auf. Etwaig im Waschmittel physikalisch gelöste Kohlenwasserstoffe werden vor der Regeneration des Waschmittels ausgetrieben (Flash-Tank) und prozessintern recycelt. Dadurch kann eine praktisch vollständige Abtrennung des CO₂ aus dem Roh-SNG erreicht werden bei gleichzeitig hoher Reinheit des abgeschiedenen Kohlendioxids.

Trocknung des Roh-SNGs

Eine Zusammenfassung technologisch geeigneter Trocknungsverfahren befindet sich im Anhang Abschnitt 10.3.2.

Für die in dieser Studie betrachtete Anlagengrösse ergab eine Kombination aus Kondensations- und Adsorptionstrocknung die wirtschaftlichste Lösung, um den geforderten Taupunkt zu erreichen. Dabei dient die Kondensationstrocknung gleichzeitig als Vorreinigung, um eine mögliche Kontamination der nachfolgenden Adsorptionstrocknungsstufe mit Aminlösung zu vermeiden.

H₂-Abtrennung

Wasserstoff wird mithilfe eines Membrantrennverfahrens aus dem Bio-SNG abgetrennt. Details zu den Grundlagen von Membrantrennverfahren sind im Anhang Abschnitt 10.3.3 enthalten. Das Verfahren ist ein vergleichsweise neues Verfahren im Zusammenhang mit der Aufbereitung von Biogas bzw. Bio-SNG, wurde aber bereits in der Pilot- und Demonstrationsanlage in Güssing/AT erfolgreich praktisch erprobt und optimiert.

Gegenüber anderen Verfahren zur Wasserstoffabtrennung bietet die Membrantrennung eine Vielzahl an Vorteilen wie beispielsweise:

- kompakte und platzsparende Bauform
- einfacher Betrieb bei moderaten Bedingungen
- höhere Effizienz der Methanisierung durch Rückführung des wasserstoffreichen Permeats
- kein "Methan-Schlupf" (Permeat wird zur Methanisierung zurückgeführt)
- verschleiss- und wartungsarm
- keine zusätzlichen Chemikalien für den Betrieb erforderlich
- keine externen Eingriffe während des Betriebes erforderlich

Odorierung

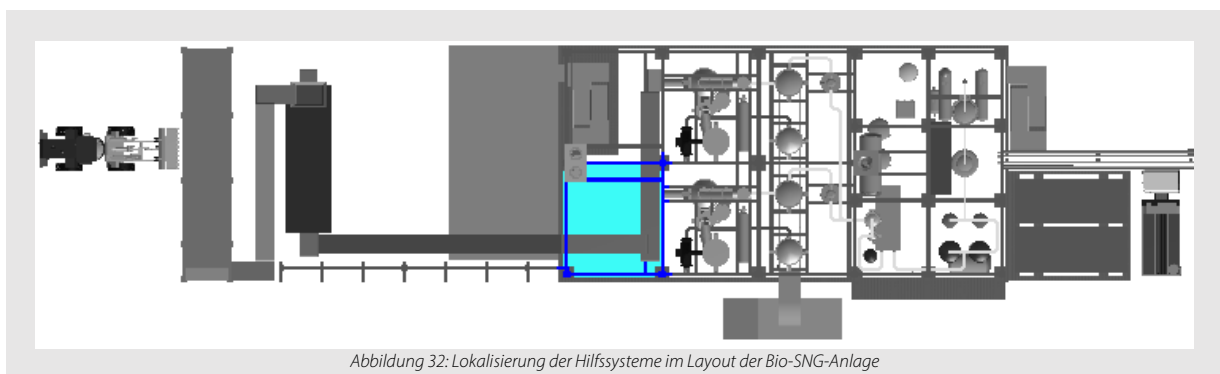
Die Odorierung des Bio-SNGs ist eine Sicherheitsmassnahme, da Methan ein farbloses und geruchloses Gas ist. Um Leckagen erdgasführender Anlagenteile geruchstechnisch wahrnehmen zu können, wird dem Gas aus diesem Grunde ein Warngeruch hinzugefügt.

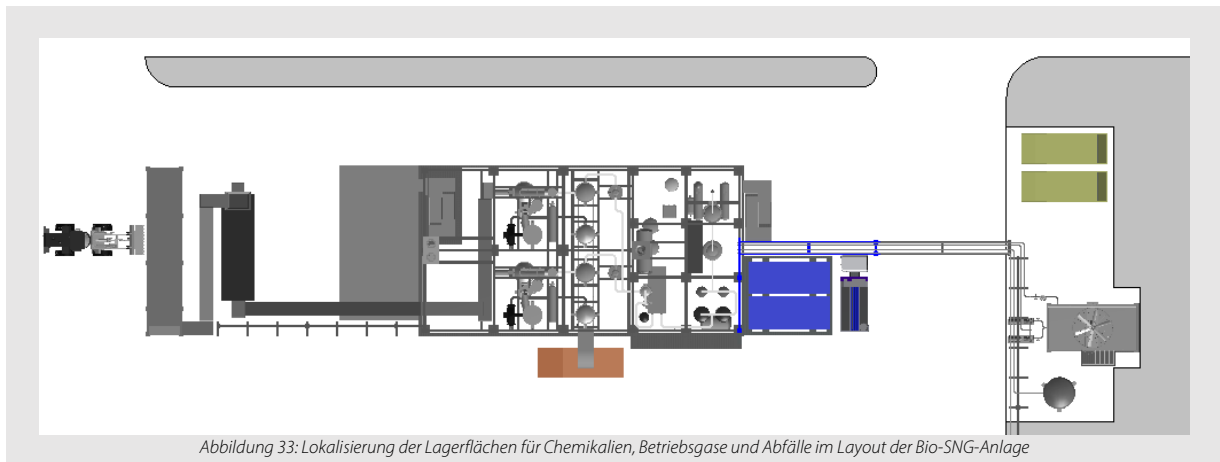
Die Odorierung erfolgt gemäss SVGW-Richtlinie G11 für die Gasodorierung. In der Odorierungseinheit inbegriffen ist die Überwachung und Protokollierung der Bio-SNG-Eigenschaften zwecks Einspeisung in das lokale Erdgasnetz.

5.4 HILFSSYSTEME

Hilfssysteme sind für die Bereitstellung und Verteilung sämtlicher in der Anlage benötigten Hilfsstoffströme und -energien verantwortlich. Hierzu zählen u.a. die Kühlung oder Beheizung von Gas- und Flüssigkeitsströmen innerhalb der einzelnen Prozessschritte sowie die Bereitstellung von z.B. Strom, Wasser, Inert- und Reaktivgasen. Die Stromversorgung wird gesondert behandelt.

Die Lokalisierung der Hilfssysteme im Layout der Bio-SNG-Anlage ist in Abb. 32 dargestellt. Abb. 33 zeigt die Lokalisierung wichtiger Lagerflächen für Chemikalien, Betriebsgase und Abfälle.





Details zu genauen Verbrauchsmengen an Hilfsmitteln sind dem vertraulichen Anhang zu diesem Bericht zu entnehmen.

Wärmevershub und -auskopplung

Ein effizienter Wärmevershub zum Zwecke der Nutzung von überschüssiger Prozessabwärme ist essenziell für die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Innerhalb der Anlage müssen diverse Gas- und Flüssigkeitsströme abgekühlt oder aufgeheizt werden. Einerseits wird Wärme auf sehr hohem Temperaturniveau erzeugt (z.B. durch die exotherme Methanisierungsreaktion), andererseits ist beispielsweise eine Kühlung auf tiefem Temperaturniveau erforderlich (z.B. Gasverdichter). Für den Gesamtprozess ergeben sich auf diese Weise unterschiedliche Wärmemengen, die auf unterschiedlichen Temperaturniveaus aus dem Prozess ein- und auszukoppeln sind.

Die Wärmeauskopplung und -einkopplung erfolgt mithilfe von Wärmetauschern bzw. -überträgern, wobei die jeweils erforderliche Wärmemenge von einem Wärmeträgermedium aufgenommen bzw. bereitgestellt wird. Es ist naheliegend, die von "heissen" Prozessströmen abgegebene Wärme zu nutzen, um "kalte" Prozessströme aufzuwärmen. Dies trägt zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades der Anlage und zu einer Minimierung des Betriebsmitteleinsatzes bei. Allerdings sind Wärmetauscher sehr kostenintensive Apparate und führen somit zu einem Anstieg der Investitionskosten. Für jede Anlage muss daher ein Kompromiss zwischen einem optimalen Wärmevershub und -auskopplung und den Investitionskosten gefunden werden.

Die folgenden Randbedingungen sind für die betrachtete Anlage zu berücksichtigen:

- Keine Auskopplung von Wärme in ein Fernwärmenetz vorgesehen
- Benötigte Prozesswärme auf sehr hohem Temperaturniveau soll möglichst prozessintern erzeugt werden, d.h. ohne externen Energieeintrag (ausser beim An- und Abfahren der Anlage)
- Überschüssige Prozesswärme auf hohem und mittlerem Temperaturniveau soll zur Trocknung der frischen Holzschnitzel genutzt werden
- Prozesswärme auf tiefem Temperaturniveau nicht nutzbar
- Kleine Anlagengrösse

Insbesondere die kleine Anlagengrösse bedingt eine Obergrenze verfügbarer Investitionskosten für Wärmetauscher. Dadurch geht aus energetischer Sicht ein Teil der Wärme verloren, was aber insofern unkritisch ist, da ausreichend überschüssige Prozesswärme zur Verfügung steht.

Die folgenden Hilfssysteme sind in Abhängigkeit vom Temperaturniveau für den Wärmevershub und die Wärmeauskopplung verantwortlich:

- Thermalölsystem (sehr hohes und hohes Temperaturniveau)
- Heisswassersystem (hohes und mittleres Temperaturniveau)
- Kühlwassersystem (tiefes Temperaturniveau)
- Kaltwassersystem (sehr tiefes Temperaturniveau)

Ein wesentlicher Anteil der überschüssigen Prozesswärme wird – wie bereits im Abschnitt 5.1 erwähnt – zur Trocknung der frischen Holzschnitzel eingesetzt. Dadurch wird der Kaltgaswirkungsgrad der Holzvergasung bzw. die Menge erzeugten Bio-SNGs unabhängig vom Wassergehalt des angelieferten Holzes erhöht.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Auslegung und Dimensionierung der Anlage hat allerdings ergeben, dass nicht – wie ursprünglich angenommen – sämtliche Überschusswärme durch die Holz Trocknung konsumiert wird. Es steht mehr Abwärme zur Verfügung, als durch die Trocknung genutzt werden kann.

Die überschüssige Prozesswärme wird an die Umgebung abgegeben (teilweise über die Holz Trocknungsanlage, teilweise über das Kühlwassersystem).

Zukunftsszenarien für die Verwertung überschüssiger Prozesswärme

Die folgenden Szenarien sind nach aktuellem Stand:

- a) Vergrößerung der Kapazität der Holz Trocknungsanlage, um eine kostengünstige Trocknung von externem Holz zu ermöglichen
- b) Beheizung von Treibhäusern oder Spargel-Feldern (*Option: CO₂-Verwertung*)
- c) Nutzung im naheliegenden Klärwerk

5.5 VERFAHRENSTECHNISCHE AUSLEGUNG

5.5.1 Verfahrensfließbild

Abb. 34 zeigt den Gesamtprozess der Anlage im Verfahrensfließbild. Eine Version hiervon ist dieser Studie im A3-Format als Anlage beigefügt. Dargestellt sind die wichtigsten Apparate, Haupt- und Nebenstoffströme sowie Temperaturbereiche der einzelnen Prozessschritte.

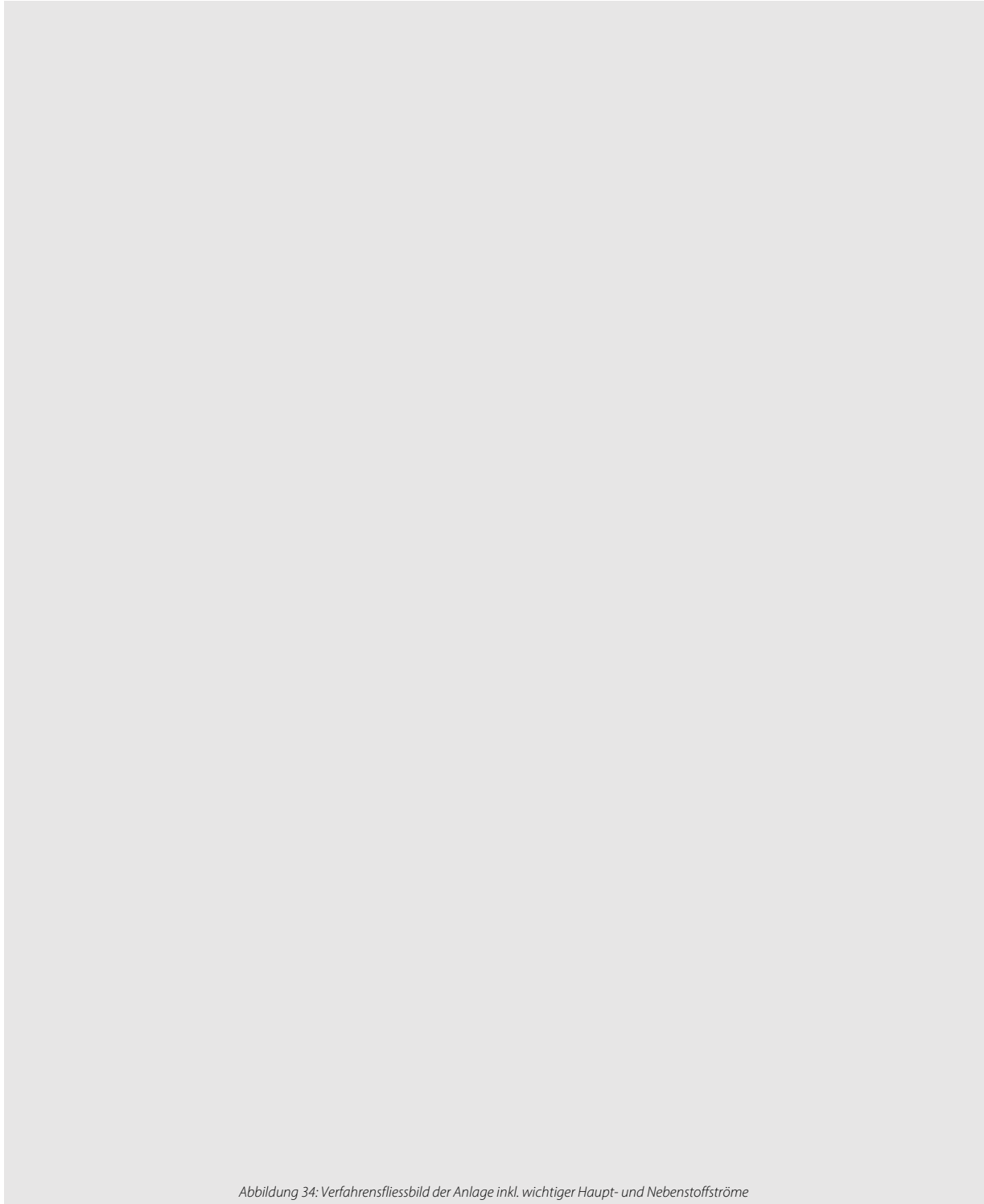


Abbildung 34: Verfahrensfließbild der Anlage inkl. wichtiger Haupt- und Nebenstoffströme

Der obere Teil von Abb. 34 zeigt die Holzannahme, -trocknung sowie die Holzvergasung. Im unteren Teil sind die Holzgasaufbereitung, die Methanisierung sowie die Bio-SNG-Aufbereitung dargestellt.

Die Holzvergasung besteht aus **zwei Linien** gleicher Baugrösse. Im Fließbild ist eine Linie exemplarisch dargestellt. Der Einsatz von zwei Vergaserlinien ist sehr vorteilhaft für den Betrieb der Anlage, insbesondere bei Ausfall des Vergasers:

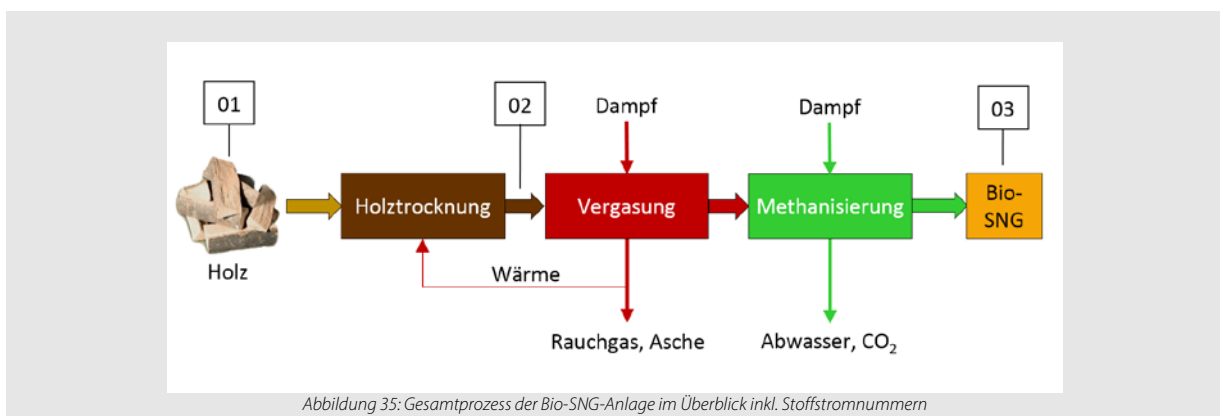
- a) Teillastbetrieb der Methanisierung bei Ausfall einer Vergaserlinie
- b) Kontinuierliche Bio-SNG-Erzeugung
- c) Reduzierung von unnötigem Abbrand von Holzgas über die Fackel auf ein Minimum (schonender Übergang zwischen Teillast- und Volllastbetrieb)
- d) Vermeidung von "Stress" für den Katalysator der Methanisierung durch unnötige An- und Abfahrvorgänge (längere Katalysatorlebensdauer)

Der Einsatz von zwei Vergaserlinien wirkt sich nach heutigem Stand der Technik somit positiv auf den Betrieb der Gesamtanlage aus.

5.5.2 Prozesstechnische Auslegung der Anlage

Basis für die prozesstechnische Auslegung der Anlage ist eine Massen- und Energiebilanz. Auf Basis hiervon erfolgt eine hinreichend genaue Dimensionierung aller erforderlichen Anlagenteile und Apparate, immer unter dem Gesichtspunkt der verfügbaren Datenmenge und Genauigkeit für eine solche Konzeptstudie.

In Abb. 35 ist der Gesamtprozess der Anlage noch einmal im Blockfließbild zusammengefasst, diesmal erweitert um die Stoffstromnummern für die wesentlichen Bilanzgrenzen.



Leistungsklasse der Anlage

Die Auslegung der Anlage entspricht einer Leistungsklasse im Bereich von 3.8 MW bis 4.2 MW Brennstoffwärmeleistung bzgl. des eingesetzten Frischholzes (Wassergehalt 50%) bzw. einer Bio-SNG-Produktion im Bereich von 2.4 bis 2.67 MW (Heizwert).

Der chemische Wirkungsgrad der Anlage beträgt 63.6% bzgl. des eingesetzten Frischholzes. Hierin inbegriffen ist die Nutzung von Prozessabwärme zur Holztrocknung. Da ausreichend Abwärme für die Holztrocknung zur Verfügung steht, ist die Anlage prinzipiell unabhängig hinsichtlich des Feuchtegehaltes des angelieferten Frischholzes. Ferner werden innerhalb der Anlage zahlreiche Prozessströme recirkuliert. Insbesondere die aus dem Holzgas abgetrennten Teere besitzen einen hohen Energieinhalt. Sie werden zurück zur Vergasungsanlage geführt, wo sie innerhalb der Verbrennungswirbelschicht zur energetischen Bereitstellung der für den Vergasungsprozess erforderlichen Wärme beitragen. Hierdurch lässt sich die Effizienz der Vergasungsanlage um etwa 3% steigern, was letztendlich zu einer nicht unerheblichen Reduzierung der erforderlichen Holzmenge für die Anlage führt.

Holzbedarf

Der Eingangsstoff für die Anlage ist frisches Holz, das in Form von Hackschnitzeln zur Anlage angeliefert wird. Tab. 17 fasst die sich aus der Massen- und Energiebilanz ergebenden Mengen für das angelieferte Frischholz und die sich ergebende Holzmenge nach der Trocknung zusammen.

Parameter	Einheit	Frischholz (zur Anlage)	Trockenholz (nach Trocknung)
Stoffstrom		01	02
Menge	t/a	ca. 12'470	ca. 7'600
Wassergehalt	wt.-%	50	18 - 20
Brennstoffwärmeleistung	kWh/kg	2.29	4.15 - 4

Tabelle 17: Holzbedarf der Anlage: Frischholz und verbleibende Holzmenge nach der Holz Trocknung
(vgl. der Stoffstromnummern mit Abb. 35)

Ausgehend von einem Wassergehalt von 50% verliert das Frischholz durch die Trocknung etwa 40% seines Gewichtes. Der Masseverlust entspricht der verdampften Wassermenge während der Trocknung. Dementsprechend nimmt der Heizwert durch die Holz Trocknung zu.

Bio-SNG

Die Eigenschaften des erzeugten Bio-SNGs der Anlage sind in Tab. 18 zusammengefasst. Für den aktuellen Standort sind leider keine konkreten Anforderungen für die lokale Einspeisung des Bio-SNGs am Standort bekannt. Daher werden im Wesentlichen die Vorgaben der G13 (SVGW) berücksichtigt und ausgewählte Aspekte unterhalb der Tabelle näher erläutert.

Parameter	Einheit	Bio-SNG	Bemerkung
Stoffstrom		03	
Menge	Nm3/a	1'927'500	
	Nm3/h	257	
Druck	bar(ü)	< 5	siehe Ergänzung ¹⁾
Temperatur	°C	< 25°C	siehe Ergänzung ¹⁾
Taupunkt bei 5 bar(ü)	--	-8 °C	
Heizwert (H _u)	kWh/Nm3	9.4	
Brennwert (H _o)	kWh/Nm3	10.4	
Wobbe-Index	kWh/Nm3	13.7	
Relative Dichte	--	0.58	
Zusammensetzung			
Wasserstoff	vol.-%	< 2	siehe Ergänzung ²⁾
Sauerstoff	vol.-%	--	
Kohlenmonoxid	vol.-%	< 0.1	
Methan	vol.-%	≥ 94	
Stickstoff	vol.-%	≤ 3	
Gesamtschwefel	mg/Nm3	--	
Nebel, Staub	mg/Nm3	technisch frei	
Odorierung		gemäss G11	

¹⁾ Bekannt ist, dass es sich um ein 5-bar-Netz handelt und die maximale Gastemperatur 25°C nicht überschreiten darf. Dementsprechend wird dieser Grenzwert eingehalten.

²⁾ Ohne eine Wasserstoffabtrennung mittels Membrantrenntechnik würde sich der Wasserstoffgehalt im Bio-SNG auf etwa 4 vol.-% erhöhen. Sollte dieser Wert zulässig sein, kann auf eine Membranabtrennung verzichtet werden.

Tabelle 18: Eigenschaften des erzeugten Bio-SNGs

5.5.3 Verbrauchsmittel

Elektrische Verbräuche

Die mittlere Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher ergibt sich anhand von Erfahrungsdaten zum Anlagenbetrieb sowie der physikalischen Erfordernissen bezüglich Durchsätzen und Druckverhältnissen.

In Tab. 19 sind die elektrischen Verbraucher unterteilt nach den einzelnen Verfahrensabschnitten der Anlage aufgelistet. Die hier aufgeführte mittlere Leistungsaufnahme bezieht sich auf den Volllastbetrieb der Anlage. Im Teillastbetrieb reduziert sich die Leistungsaufnahme entsprechend.

Die grössten Verbraucher sind die Kompressoren der Methanisierungsanlage. Diese werden mit Frequenzumrichtern ausgestattet, so dass sich deren Leistungsaufnahme im Teillastbetrieb reduziert. Dasselbe gilt für die elektrischen Begleitheizungen, die beispielsweise nur während der kalten Jahreszeit in Betrieb sind.

Anlagenabschnitt	Anschlussleistung	Mittlere Leistungsaufnahme
Holzannahme und -zwischenlagerung	17 kW	4 kW
Holzschnitzeltrocknung	6 kW	4 kW
Holzschnitzelzufuhr	20 kW	5 kW
Vergasung	169 kW	102 kW
Holzgaskonditionierung	223 kW	146 kW
Methanisierung	0 kW	0 kW
Roh-SNG-Aufbereitung	240 kW	124 kW
Hilfssysteme	122 kW	48 kW
Summe	797 kW	434 kW

Tabelle 19: Elektrische Verbraucher der Anlage gegliedert in Verfahrensabschnitte:
Installierte Anschlussleistung und mittlere Leistungsaufnahme bei Volllastbetrieb

Dass die mittlere Leistungsaufnahme deutlich geringer ist als die Anschlussleistung, hängt damit zusammen, dass die Leistungsgrössen von Elektromotoren gestuft sind und immer eine ausreichende Reserve eingerechnet wird. Im praktischen Betrieb werden diese Systeme im Teillastbetrieb arbeiten. Zum anderen arbeiten einige Systeme diskontinuierlich. Dies trifft insbesondere auf die Holzschnitzelzufuhr und die Dosierpumpen zu, die im Mittel während ca. 30 Minuten pro Stunde arbeiten.

Betriebsmittel

Die Betriebsmittelverbräuche sind in Tab. 20 zusammengefasst. Sie ergeben sich teils aus der Massen- und Energiebilanz für die einzelnen Hilfsstoffströme, andererseits anhand von Erfahrungswerten für den Anlagenbetrieb.

Verbräuche				
Jahr		1. Jahr	2. Jahr	ab 3. Jahr
Stunden Volllast	h/a	3'000	5'000	7'500
Anfahrvorgänge Vergaser	1/a	36	60	24
Anfahrvorgänge Methanisierung	1/a	18	30	12
Strom	kWh/a	1'279'320	2'132'200	3'198'300
Gase				
Erdgas	kg/a	39'600	66'000	49'500
Druckluft	kg/a	115'663	192'771	289'157
Luft	kg/a	7'348'434	12'247'390	18'371'084
Stickstoff	kg/a	209'007	348'344	354'967
Wasserstoff	kg/a	193	321	241
Flüssigkeiten				
Monoethanolamin	kg/a	179	299	448
Thermoöl	kg/a	654	1'090	1'635
Wäschermedium	kg/a	87'000	145'000	217'500
Wasser	kg/a	881'496	1'469'160	1'810'620
Feststoffe				
Aktivkohle	kg/a	1'139	1'898	2'847
Asche	kg/a	100'000	166'667	250'000
Bettmaterial	kg/a	60'000	100'000	150'000
Inertmaterial	kg/a	32	53	80
Katalysator	kg/a	96	160	240
Molekularsieb	kg/h	53	89	133
Precoatmaterial	kg/a	18'000	30'000	45'000
Zinkoxid	kg/a	310	517	775

Tabelle 20: Betriebsmittelverbräuche der Anlage gestaffelt nach Betriebsjahr

Ein Teil der Betriebsmittel werden für den normalen Anlagenbetrieb benötigt. Hierzu zählen vor allem Strom, Luft und Wasser. Ein weiterer Teil der Betriebsmittel wird für das An- und Abfahren der Anlage benötigt (Vergaserausfall). Hierzu zählen vor allem Stickstoff zum Inertisieren und Erdgas für den Heizbetrieb. Der Verbrauch dieser Betriebsmittel hängt stark von der Anlagenverfügbarkeit ab. Für die hier aufgelisteten Mengen handelt es sich um eine konservative Betrachtung. Die Kosten der Verbrauchsmittel haben einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den kommerziellen Businessplan der Anlage (vgl. dazu die Sensitivitätsanalyse 6.4). In der Praxis gibt es ein grosses Optimierungspotenzial, da mit zunehmender Erfahrung der Betriebsmannschaft und der Zulieferer die Anlageverfügbarkeit stetig zunimmt.

Bei einer dritten Gruppe von Betriebsmittel handelt es sich vor allem um Bettmaterialien, z.B. für die Vergasungsanlage, Entschwefelung und den Methanisierungsreaktor. Diese Feststoffe werden intervallweise eingefüllt und anschliessend ohne kontinuierliche Nachspeisung gebraucht. Nach Ablauf einer Standzeit wird das gesamte Material auf einmal ersetzt. Der Quotient aus eingefüllter Menge und der Standzeit ergibt einen fiktiven stündlichen Verbrauch. Die verbrauchten Materialien werden wenn möglich in der Vergasung weiter genutzt (Kondensate werden zur Dampferzeugung genutzt; die Aktivkohle dient als Brennstoff, usw.) oder sie müssen entsorgt werden (z.B. Asche). Der Katalysator kann als Schwermetallträger mit einer gewissen Wertschöpfung recycelt werden.

5.6 AUTOMATISIERUNGSKONZEPT

Für den Betrieb der Anlage muss eine 400-V-Stromversorgung zur Verfügung stehen. Ausgehend davon werden alle benötigten Gleich- und Wechselstromspannungen erzeugt.

Der hohe Automatisierungsgrad der Anlage erlaubt einen sicheren Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung. Hierzu wird die Steuerung der Gesamtanlage auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) implementiert. Diese ist u. a. mit einer Recheneinheit mit eigenem Programmspeicher und den Modulen für die Kommunikation mit den untergeordneten Steuerungen und Modulen für analoge und digitale Ein- und Ausgänge ausgestattet. Die Integration der Systeme erfolgt über ein Bus-System (SCADA-System, Supervisory Control and Data Acquisition).

Die Steuerung erfasst den Zustand der Anlage, reagiert auf die erfassten Messwerte, speichert die relevanten Daten für eine spätere Auswertung und Protokollierung ab und stellt die Anlage auf den Bildschirmen der Visualisierung bildlich dar.

Die Steuerung warnt bei Grenzwertüberschreitungen optisch auf der Visualisierung und akustisch mittels Signalhorn und Fernalarmierung. Sie regelt die Temperaturen, Drücke und Durchflüsse, so dass Grenzwertüber- oder -unterschreitungen im Normalbetrieb ausbleiben. Bei kritischen Abweichungen warnt sie und schaltet Anlageteile aus, falls dies zur Erhöhung der Sicherheit oder zur Schonung der Anlage erforderlich ist. So sind z.B. alle Pumpen mit einem Trockenlaufschutz ausgerüstet, so dass die Pumpen ausgeschaltet werden, falls das Flüssigkeitsniveau im Vorlagebehälter unter einen kritischen Wert sinkt. Die programmierten Prioritäten der Anlage sind:

1. Schutz von Mensch und Umwelt
2. Schutz der Anlage
3. Schonung des Methanisierungs-Katalysators
4. Unterbrechungsfreier Betrieb der Anlage

Die Steuerung wird in einer Schaltwarte installiert, von der aus die Anlage durch das Bedienpersonal gesteuert werden kann. Einzelne Anlagenkomponenten besitzen zudem eigene Steuerungen. So muss z.B. die Fackel über eine eigene Steuerung (Burner Control Unit, BCU) verfügen, die als Komplettbaustein mit den entsprechenden Zulassungen eingekauft wird. Diese Apparatesteuerungen kommunizieren entweder über den Austausch von digitalen und analogen Signalen oder sie sind über ein Bus-System mit der übergeordneten Steuerung verknüpft. Auf der Anlage werden die drei Möglichkeiten ausgeschöpft.

Die SPS erfasst alle Messwerte der Anlage und speichert diese für die spätere Ansicht oder Auswertung ab. Dies ermöglicht den Nachvollzug des Betriebs. Die erfassten Betriebszustände werden auf der Visualisierung dargestellt, wo die Betriebszustände und -parameter auf Fließbildern und tabellarischen Darstellungen angezeigt werden können.

Im Feld (auf der Anlage verteilt) können weitere Bedienpanels (HMI, Human Machine Interface) installiert werden, die eine Bedienung von Teilen der Anlage an verschiedenen Stellen in der Anlage ermöglichen.

In der Schaltwarte sind sämtliche Schaltschränke mit der Steuerung und allen Geräten (z.B. Frequenzumformern, Thyristoren, usw.) untergebracht. Das Hauptbedienterminal für die Gesamtanlage befindet sich in der Schaltwarte. Von hier aus kann die Anlage überwacht und gesteuert werden.

Die Automatikventile auf der Anlage werden pneumatisch betrieben, so dass sie bei Stromausfall in die vordefinierte sichere Stellung fahren.

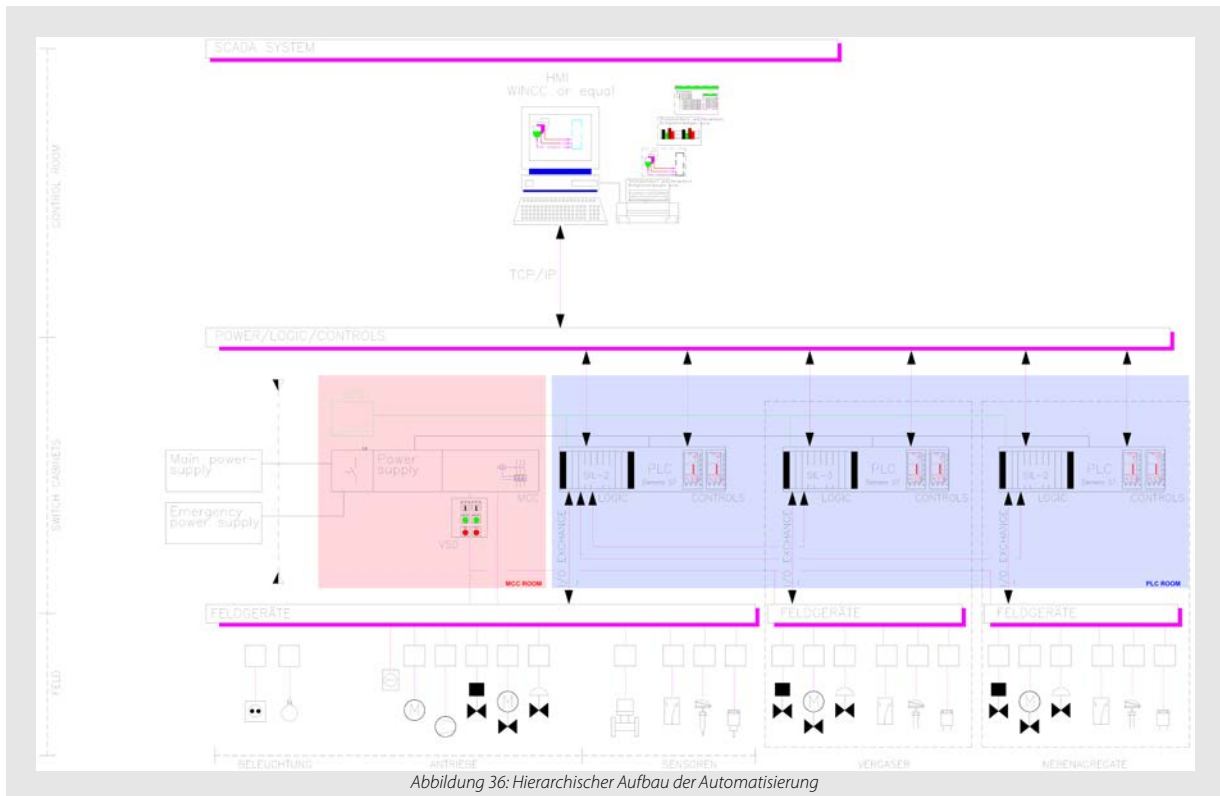
Auf der Anlage verteilt werden Notaus-Schalter installiert, die gemäss Risikoanalyse einzelne Aggregate, Verfahrensabschnitte oder die Gesamtanlage stilllegen. Nach den Regeln der Technik werden für einzelne Aggregate oder Verfahrensabschnitte abschliessbare Revisionsschalter verbaut, die vor einem unbeabsichtigten Anlauf schützen. Aus sicherheitstechnischer Sicht kritische Funktionen werden festverdrahtet. Durch die Festverdrahtung werden sicherheitsrelevante Massnahmen bei zuvor definierten Störungen unter Umgehung jeglicher softwarebasierter Systeme direkt ausgeführt.

Auf der Steuerung sind Sequenzen für das An- und Abfahren der Anlage programmiert. Die Anlage fährt also auf Knopfdruck an, wobei diese Vorgänge trotzdem immer durch einen qualifizierten Mitarbeiter vor Ort überwacht werden müssen.

Die Steuerung der Anlage erlaubt den Fernzugriff für registrierte Computer (durch die MAC-Adresse des Gerätes identifiziert, Media-Access-Control-Adresse). Die zugelassenen Eingriffsmöglichkeiten sind aber aus Sicherheitsgründen sehr beschränkt. Der Fernzugriff ist aber für den Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung erforderlich.

MSR-Hierarchie-Schema

Die Steuerungs-Hierarchie ist sehr flach, da die Gesamtanlage durch eine einzige Industrie-SPS gesteuert wird. Diese kommuniziert über einen Daten-Bus mit der Visualisierungsstation, auf der die Anlage visuell dargestellt wird, die Benutzereingaben erfolgen und die Daten protokolliert werden.



Auf der Betriebsebene werden die übergeordneten Funktionen wie das Finanz- und das Personalwesen sowie die Erfassung und Abrechnung der Brennstofflieferungen und der SNG-Einspeisung behandelt. Es ist aber nicht erforderlich, diese Funktionen in das Automatisierungskonzept einzuschliessen. Daher wird dieser Aspekt hier nicht weiterbehandelt.

Die Leitebene fasst die Steuerung der Gesamtanlage zusammen. Eine übergeordnete Betriebsebene existiert nicht; sie könnte allenfalls die Erfassung der Holzlieferungen über die Waage und der SNG-Einspeisung umfassen.

Auf der Leitebene laufen die übergeordneten Steuerungsaufgaben ab sowie die Kommunikation mit dem Bedienpersonal.

Auf der Zellebene sind Verfahrensabschnitte wie die Schnitzzellagerung, die Trocknung, die Schnitzelzufuhr zum Vergaser, die Vergasung, die Holzgasaufbereitung bis hin zur Bio-SNG-Odorierung und -Einspeisung angesprochen.

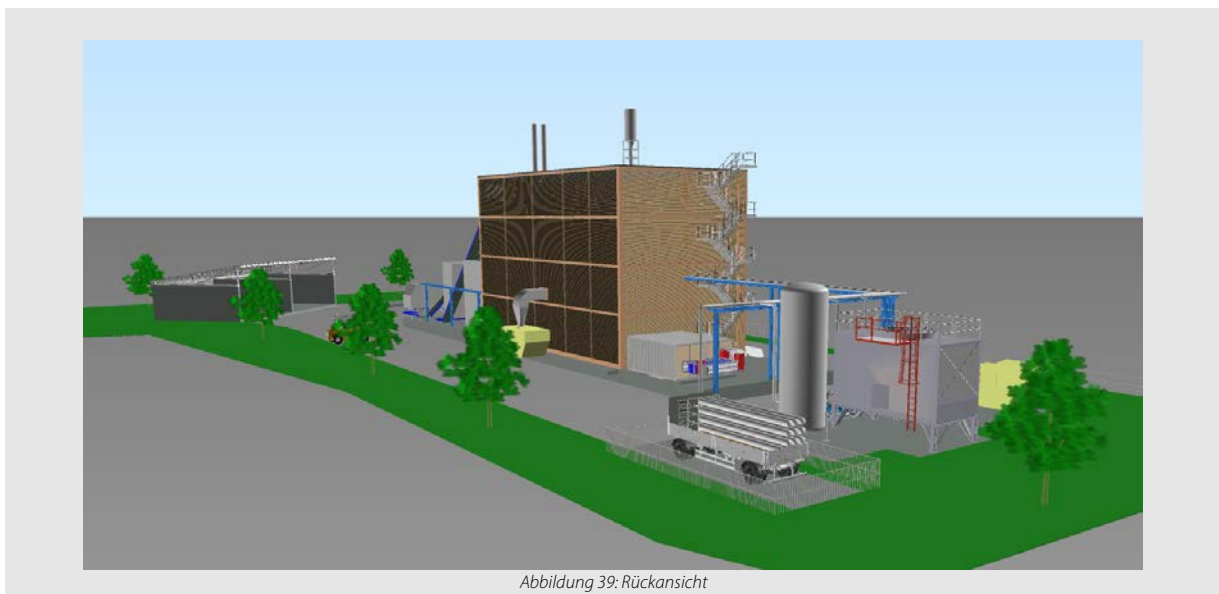
Praktisch alle diese Einheiten auf der Zellebene sind mit Sensoren und/oder Antrieben angeschlossen. Diese sind auf der gesamten Anlage verteilt. Komponenten mit eigener Steuerung kommunizieren entweder über den Austausch analoger und digitaler Signale oder mittels Bus mit der übergeordneten Steuerung.

5.7 ANLAGENGESTALTUNG

5.7.1 Layout

Kapitel 5 beinhaltet bereits die Lokalisierung der einzelnen Prozessabschnitte innerhalb des Layouts der Bio-SNG-Anlage. Nachfolgend wird daher lediglich ein Überblick über das Layout gegeben. Für Details sei an dieser Stelle auf das Kapitel 5 verwiesen.

Der Vorschlag für den Aufstellungsplan sieht eine Grundfläche von $L = 120\text{ m}$ und $B = 30\text{ m}$ vor. Die Gesamthöhe beträgt inklusive Fackel ungefähr 27 m . Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Layout der SWISS-SNG-Anlage aus verschiedenen Perspektiven. Weitere Anforderungen wie z.B. ein Löschwasserrückhaltebecken sind zwar berücksichtigt, in den Darstellungen aber nicht sichtbar.



5.7.2 Geländeerschliessung

Unter der Annahme, dass die Anlage entsprechend obigem Layout (vgl. 5.7.1) erstellt werden kann, sind folgende baulichen Massnahmen zu ergreifen:

Beschrieb der baulichen Anlagen

BKP		
2	Gebäude	
20	Erdarbeiten, Baugrube, Kieskoffer	Erdarbeiten / Aushub für Kofferungen Platz und Foundationen / Bodenplatten der Bauten und Anlagen inkl. Regenrückhaltebecken, Grobplanie als Arbeitsfläche
21	Rohbau 1	
211	Baumeisterarbeiten inkl. Verwaltung und Nebenbauten	Stahlbetonarbeiten und vorgefertigte Raumzellengebäude für die Verwaltung Containeranlage 2-geschossig (8 Einheiten 6.05 m x 2.43 m, lichte Raumhöhe 2.50 m)
213	Montagebau in Stahl, inkl. Hülle, Rohrbrücken, Dach über Holzschnitzzellager	Erstellen aller Stahlbaukonstruktionen, inkl. Lastübernehmeracks für Produktionsanlagen, 2 Treppentürme, Gitterrostbeläge auf allen Geschossen, Flachdach und einfache Fassadenverkleidung, nicht wärme gedämmt (z.B. sägerohe Holzbretter) Korrosionsschutz Stahlbauteile: C3 Korrosivitätskategorie mässig
23	Elektroanlagen	Lichtinstallation in Gebäuden und Platzbeleuchtung
25	Sanitäranlagen	Warm- und Kaltwasserversorgung, WC-Anlagen und Duschen
26	Transportanlagen	
	Fahrzeugwaage	Lieferung und Montage einer Fahrzeugwaage für 40 Tonnen
4	Umgebung / Tiefbau	
40	Terraingestaltung	Erdbewegungen, Kieskoffer für Zufahrtsstrasse, inkl. Anteil Abtransport und Deponiegebühren
44	Werkleitungen inkl. Regenrückhaltebecken	Schmutz- und Regenwasserentwässerung, Anschluss an Regenrückhaltebecken, Leerrohre für Elektro, Telecom, Frischwasseranschluss an Parzellengrenze
46	Strassen, Beläge	
461	Platz	Schwarzbelag für Schwerverkehr inkl. Randabschlüssen und Entwässerung über Einlaufschächte
462		Schwarzbelag für Schwerverkehr, Entwässerung ins Gelände
5	Honorare und Nebenkosten	Honorare, Bewilligungsgebühren, Bauzeitversicherungen, allgem. Nebenkosten
	nicht eingerechnet sind:	Zufahrtsstrasse(n) Alle Produktions-, Förder- und Lageranlagen (exkl. Schnitzzellager) Elektroinstallation der Produktionsanlagen Möblierung Verwaltungsgebäude

Tabelle 21: Beschrieb der baulichen Anlagen

6 BUSINESSPLAN

Der vorliegende kommerzielle Businessplan soll aufzeigen, ob und wie die Realisierung der SWISS-SNG-Anlage am Standort Mont-la-Ville umgesetzt werden kann.

Voraussetzung dafür sind verlässliche Daten zu den Investitions- und Betriebskosten. Selbstredend haben auch die Art der Finanzierung, die Kapitalkosten sowie die Abschreibungsdauer der Anlage einen Einfluss auf den Businessplan. Diese Grössen variieren jedoch von Investor zu Investor und folgen den unterschiedlichsten Rahmenbedingungen. So spielen Kapitalzinsen, Vorstellungen zur Eigenkapitalrentabilität oder auch steuerliche Überlegungen eine grosse Rolle. Aus diesem Grund basiert der vorliegende Businessplan auf der Betrachtungsstufe 'operativer Gewinn' (EBITDA). Damit ist gewährleistet, dass ausschliesslich der eigentliche Betrieb betrachtet wird und die Aspekte des 'Financial Engineering' dem jeweiligen Investor überlassen sind.

Der potenzielle Investor sollte aufgrund des Businessplanes eine fundierte Entscheidung zur Weiterverfolgung des Projektes treffen können. Dazu wurde ein Berechnungswerkzeug erarbeitet, das es erlaubt, die unterschiedlichsten Szenarien zu simulieren. Um den Einfluss der verschiedenen Parameter der Investitions- und Betriebskosten auf dem Businessplan darzustellen, wurde zudem eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

6.1 ÜBERSICHT INVESTITIONSKOSTEN

Die Investitionskosten umfassen die Geländeerschliessung (vgl. dazu 5.7.2), d.h., die Erstellung der nötigen Hoch- und Tiefbau-Infrastruktur auf der Parzelle. Nicht inbegriffen ist der Anschluss der Parzelle an Strassen-, Wasser-, Abwasser-, Strom- und Telekommunikations-Infrastruktur. Ebenso nicht eingerechnet sind die Kosten für das Gelände selbst (Kauf oder Pacht).

Bei der vorliegenden Betrachtung handelt es sich zum Teil um Schätzpreise (Engineering; Installation; Inbetriebnahme; Standardteile), zum Teil um Angebote von potenziellen Lieferanten (Vergasereinheit komplett; sämtliche Hauptkomponenten der Methanisierung und der Nebensysteme). Zu beachten ist, dass es sich um die erste Anlage in dieser Form (vollautomatisiert für kommerzielle Nutzung) handelt und daher weder Erfahrungswerte noch Repetitiveffekte in die Preisbildung eingeflossen sind. Mit anderen Worten, es ist davon auszugehen, dass eine Erstanlage wegen des Neuheitsgrades um 15% bis 20% über dem Wert liegen dürfte, welcher im dannzumal etablierten Markt massgebend sein sollte.

Die Herstellkosten der einzelnen Anlagelose inkl. Montage und Inbetriebnahme stellen sich wie folgt dar:

Holzschnitzelannahme und Trocknung	CHF	800'000
Vergasereinheit	CHF	5'500'000
Methanisierungseinheit	CHF	3'300'000
Nebensysteme	CHF	6'600'000
Erschliessungskosten	CHF	1'000'000
Baukosten (Beton- und Stahlbau)	CHF	1'800'000
Total Herstellkosten	CHF	19'000'000

Tabelle 22: Herstellkosten der Anlage

Je nachdem, wie das Projekt realisiert würde, ist mit folgenden Zuschlägen zu obigen Kosten zu rechnen:

- a) Investor tritt selbst als Generalunternehmer auf: ~ 10%
- b) Investor beauftragt einen Generalunternehmer: ~ 15%
- c) Lieferanten bilden ein Konsortium und agieren als Generalunternehmer: ~ 20%

Zusammengefasst kann zu den Investitionskosten einer Erstanlage gesagt werden, dass diese sich je nach Ausführungskonstellation auf zwischen CHF 21 Mio. und CHF 23 Mio. belaufen.

Für weitere Anlagen dürften sich die Kosten wie gesagt um 15% bis 20%, d.h., je nach Konstellation auf CHF 16.5 Mio. bis CHF 19.5 Mio. senken lassen.

Für die nachfolgende Renditeberechnung wird von einem durchschnittlichen Erstanlagenpreis von CHF 22 Mio. ausgegangen.

6.2 ÜBERSICHT BETRIEBSKOSTEN

Die Betriebskosten beinhalten sämtliche für den Vollbetrieb der Anlage notwendigen Kosten. Der grösste Einzelposten betrifft den Rohstoff Holz. Die Kosten dafür betragen gemäss vorliegenden Offerten 4.6 Rp/KW (vgl. 3.8). Die Kosten für Betriebsmittel umfassen alle übrigen für den Betrieb notwendigen Mittel wie Strom, Stickstoff, Wäschermedien sowie deren fachgerechte Entsorgung (vgl. 5.5.3). Die Personalkosten beinhalten die Löhne und Sozialleistungen für vier Vollzeitangestellte. Ab dem dritten Betriebsjahr stehen zudem CHF 170'000 / Jahr für Unterhalt im Sinne von Ersatzteilen zur Verfügung. Der Arbeitsaufwand für den Unterhalt ist in den Personalkosten enthalten.

Die Betriebskosten, in Reihenfolge ihrer Höhe, setzen sich wie folgt zusammen:

Holz	CHF p.a.	1'450'000
Betriebsmittel (Strom, Katalysator, etc.)	CHF p.a.	930'000
Personalkosten	CHF p.a.	400'000
Unterhalt (ab dem 3. Betriebsjahr)	CHF p.a.	170'000
Diverses (Versicherung, Kommunikation, etc.)	CHF p.a.	125'000
Total Betriebskosten	CHF p.a.	3'075'000

Tabelle 23: Betriebskosten der Anlage

6.3 RENTABILITÄTS-BETRACHTUNG

Die Rentabilitätsrechnung geht davon aus, dass die Anlage erst im dritten Betriebsjahr die avisierte Verfügbarkeit von 85% (entspricht 7'500 Betriebsstunden p.a.) erreicht. Annahmegemäss beträgt die Verfügbarkeit im ersten Betriebsjahr 34%, im zweiten 57% und ab dem dritten Betriebsjahr 85%.

Ebenso sind Kosten für externe Unterstützung des Betriebspersonals eingerechnet. Es sind dies CHF 100'000 im ersten Betriebsjahr, CHF 50'000 im zweiten, CHF 20'000 im dritten Betriebsjahr, danach CHF 10'000 p.a.

Gestehungskosten Bio-SNG-Erstanlage

Grundsätzlich ist zu sagen, dass es sich bei einer SWISS-SNG-Anlage um ein Kraftwerk handelt. Entsprechend ist von einer langen Lebens- und Nutzungsdauer und damit auch Amortisationszeit auszugehen.

Je nach Hintergrund und Herkunft des potenziellen Investors sind zudem unterschiedliche Renditevorstellungen gegeben. Im Allgemeinen kann jedoch gesagt werden, dass die Renditeansprüche an Kraftwerke im Bereich der erneuerbaren Energien eher bescheiden sind, nicht zuletzt auch dank der grossen Nachfrage nach solchen Investitionsmöglichkeiten.

Im vorliegenden Fall wird die Optik der Schweizerischen Gaswirtschaft als Besteller der Studie eingenommen. Das Hauptinteresse liegt dabei auf den Gestehungskosten des Bio-SNG.

Als Massgrösse für die Rentabilität der Investition wurde die Methode des internen Zinssatzes (IRR: Internal Rate of Return) bei einer angenommenen Betriebsdauer von 20 Jahren gewählt. Die Methode des internen Zinssatzes eignet sich in der Praxis gut zur Beurteilung von Einzelinvestitionen in unvollständig definierten Szenarien. Massgrösse ist eine gewünschte Mindestrendite. Übersteigt der Zinssatz diese Mindestrendite, so ist die Investition für sich genommen sinnvoll. Setzt man die Rendite auf null, so resultieren die Gestehungskosten des Bio-SNG.

Setzt man dem Berechnungsmodell die oben genannten Parameter aus der Investitions- und Betriebskostenrechnung zugrunde und geht ferner von einer Rendite (IRR, 20 Jahre) von +/- null aus, so resultiert ein Gestehungspreis des Bio-SNG vom 20 Rp./KWh (Ho) bei einer Erstanlage.

Untenstehend aufgeführt die Kapazitäts- und Produktionszahlen der Anlage, der resultierende Interne Zinssatz sowie die dazugehörige Erfolgsrechnung für die Bauzeit 2015/16 sowie die ersten fünf Betriebsjahre. Die hinterlegte Gesamtrechnung umfasst die angegebene Abschreibungsdauer von 20 Jahren.

KAPAZITÄT UND PRODUKTION

Investition Anlage	CHFk	(22'000.0)
Abschreibedauer	Jahre	20.0
Kapazität der Anlage	kW	4'200.0
Anlageverfügbarkeit in %	%	85.6%
Wirkungsgrad Prozess	%	63.6%
Preis je kW: Holz	CHF	(0.046)
Preis je kW: Gas H _u	CHF	0.217
Preis je kW: Gas H _o	CHF	0.197

Gestehungspreis
Bio-SNG = Rp. 20 KW/h
(bei IRR 0%)

INTERNER ZINSSATZ

	10 Jahre	20 Jahre	30 Jahre
IRR (EBITDA)	(13.15%)	0.02%	3.13%

ERFOLGSRECHNUNG

	Bauphase		Betriebsphase				
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesamtleistung	-	-	1'741.6	2'902.6	4'354.0	4'354.0	4'354.0
Direkter Aufwand	-	-	(579.6)	(966.0)	(1'449.0)	(1'449.0)	(1'449.0)
Rohertrag	-	-	1'162.0	1'936.6	2'905.0	2'905.0	2'905.0
Manpower	(10.0)	(202.8)	(475.6)	(425.6)	(395.6)	(385.6)	(385.6)
Rohertrag nach Manpower	(10.0)	(202.8)	686.4	1'511.0	2'509.4	2'519.4	2'519.4
Betriebsaufwand	(34.5)	(78.4)	(507.8)	(782.8)	(1'031.8)	(1'031.8)	(1'197.8)
EBITDA	(44.5)	(281.2)	178.6	728.2	1'477.6	1'487.6	1'321.6

Tabelle 24: Gesamtkostenrechnung der Anlage

Optimierungsmöglichkeiten ertragsseitig

Eine potenzielle zusätzliche Einnahmequelle und damit geeignet, die Rentabilität zu erhöhen resp. den Gestehungspreis des Bio-SNG weiter zu senken, ist der Verkauf des im Prozess abgeschiedenen Bio-CO₂ (vgl. dazu 8.5) sowie die simultane Nutzung der SWISS-SNG-Anlage als Power-to-Gas-Anlage (vgl. dazu 7). Die Quantifizierung dieser Effekte bedürfte weitergehender Abklärungen.

Optimierungsmöglichkeiten kostenseitig

Auf der Investitionsseite sind potenzielle Einsparungen am ehesten bei den Bau- und Erschliessungskosten zu realisieren. Würde man die Anlage auf einer Industriebranche statt auf einer Parzelle in der Landwirtschaftszone erstellen, so könnte ein massgeblicher Anteil der CHF 1.2 Mio. für Terraingestaltung, Werkleitungen und Rückhaltebecken sowie Strassen und Beläge eingespart werden.

Die grössten Kostensenkungspotenziale ergeben sich mit Sicherheit bei der Realisierung von baugleichen Folgeanlagen. Das Einsparungspotenzial infolge verminderter Engineering-Aufwendungen und Risikozuschlägen dürfte sich zwischen 15% bis 20% bewegen. Kostensenkungen in ähnlichem Umfang konnten im Bereich der anaeroben Vergärung bei baugleichen Folgeanlagen erzielt werden.

Dank dem modularen Aufbau einiger der wesentlichen Komponenten (z.B. des Vergasers) der SWISS-SNG-Anlage würde eine Leistungssteigerung ebenfalls zu geringeren Anlagekosten je KW installierter Leistung führen. Gemessen an den vorliegenden Offerten für die Vergaser der SWISS-SNG-Anlage liegt dieses Potenzial bei ca. 10%.

Auf der Ebene der Betriebskosten würde eine Senkung des Holzpreises vom 4.6 Rp./KWh auf 4 Rp./KWh (z.B. durch Beimischung von Restholz) die Gestehungskosten des Bio-SNG um ~5% senken.

Die Stromkosten, grösster Einzelposten der Betriebskosten, wurden mit einem Preis von 14 Rp./KWh berechnet. Dies ist der Durchschnittspreis im Kanton Waadt in der entsprechenden Verbrauchskategorie. Dank der Strommarktliberalisierung für Grosskunden erscheint hier eine verhandlungsbedingte Kostensenkung erzielbar.

Gestehungskosten Bio-SNG-Folgeanlagen resp. Folgeanlagen mit grösserer Leistung

Ausgehend von den Erstanlagekosten von CHF 22 Mio. und Einsparungen von 15% bis 20% bei Folgeanlagen ergeben sich Anlagekosten von ca. CHF 18 Mio. Geht man zudem davon aus, dass eine Leistungsverdoppelung eine zusätzliche Einsparung von ca. 10% ergeben würde, so resultieren bei einer Anlage mit doppelter Leistung Investitionskosten von ca. CHF 32.5 (versus CHF 36 Mio.).

Bei gleichbleibenden Holzkosten, leicht abnehmenden Betriebskosten (12.5%) und leicht höheren Personalkosten (20%) ergibt sich ein Bio-SNG-Gestehungspreis von 16.5 Rp./KWh.

Gemessen am heutigen Verkaufspreis von Biogas in der Schweiz von ca. 23 Rp./KWh (oberer Heizwert H_o). (vgl. dazu 4.1) ergibt sich eine Gesamtkapitalrendite von 9.55%.

Unten stehend wiederum aufgeführt die Kapazitäts- und Produktionszahlen der Anlage, der resultierende interne Zinssatz (IRR) sowie die dazugehörige Erfolgsrechnung für die Bauzeit 2015/16 sowie die ersten fünf Betriebsjahre. Die hinterlegte Gesamtrechnung umfasst die angegebene Abschreibungsdauer von 20 Jahren.

KAPAZITÄT UND PRODUKTION

Investition Anlage	CHFk	(32'500.0)
Abschreibedauer	Jahre	20.0
Kapazität der Anlage	kW	8'400.0
Anlageverfügbarkeit in %	%	85.6%
Wirkungsgrad Prozess	%	63.6%
Preis je kW: Holz	CHF	(0.046)
Preis je kW: Gas H_u	CHF	0.254
Preis je kW: Gas H_o	CHF	0.230

Rendite 9.55%
bei Verkaufspreis
Bio-SNG = Rp. 23 KW/h

INTERNER ZINSSATZ

	10 Jahre	20 Jahre	30 Jahre
IRR (EBITDA)	0.63%	9.89%	11.40%

ERFOLGSRECHNUNG

	Bauphase		Betriebsphase				
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesamtleistung	-	-	4'077.0	6'795.0	10'192.5	10'192.5	10'192.5
Direkter Aufwand	-	-	(1'159.2)	(1'932.0)	(2'898.0)	(2'898.0)	(2'898.0)
Rohrertrag	-	-	2'917.8	4'863.0	7'294.5	7'294.5	7'294.5
Manpower	(16.0)	(446.2)	(1'046.3)	(936.3)	(870.3)	(848.3)	(848.3)
Rohrertrag nach Manpower	(16.0)	(446.2)	1'871.5	3'926.7	6'424.2	6'446.2	6'446.2
Betriebsaufwand	(60.4)	(212.2)	(731.2)	(1'006.2)	(1'255.2)	(1'255.2)	(1'421.2)
EBITDA	(76.4)	(658.4)	1'140.3	2'920.5	5'169.0	5'191.0	5'025.0

Tabelle 25: Gesamtkostenrechnung der Anlage

Gestehungskosten Bio-SNG für eine Anlage mit halber Leistung

Da sich potenzielle Standorte gerade in der Westschweiz oft in ländlichen Gebieten geprägt von kleinen Gemeinde befinden, sollen die Investitions- und Betriebskosten für eine Anlage mit einer Leistung vom 1.335 MW (halbe Leistung) geschätzt werden.

Für die Vergasereinheit liegen Offerten für beide Leistungsklassen (2.67 MW und 1.335 MW) vor. Eine Einheit mit halber Leistung kostet ca. 55% der Einheit mit voller Leistung. Die Skaleneffekte der Vergasereinheit können nicht eins zu eins auf die Holzschnitzelannahme und Trocknung, Methanisierungseinheit sowie die Nebensysteme projiziert werden, da es sich bei diesen Systemen nicht um Module handelt, wie dies beim Vergaser der Fall ist. Es ist daher bei diesen Komponenten von einer Steigerung der Anlagekosten mit ca. 25% je installiertem KW Leistung auszugehen. Hauptgrund dafür ist die Tatsache, dass die Engineeringaufwendungen bei einer kleinen Anlage genauso hoch sind wie bei einer grösseren Anlage.

Bei den Erschiessungs- und Baukosten ist hingegen aufgrund von ähnlichem Platzbedarf mit gleichbleibenden oder nur leicht sinkenden (max. 10%) Kosten auszugehen.

Die Investitionskosten für eine Anlage mit halber Leistung sehen wie folgt aus:

Holzschnitzelannahme und Trocknung	CHF	500'000
Vergasereinheit	CHF	3'025'000
Methanisierungseinheit	CHF	2'050'000
Nebensysteme	CHF	4'125'000
Erschliessungskosten	CHF	900'000
Baukosten (Beton- und Stahlbau)	CHF	1'600'000
Total Herstellkosten	CHF	12'200'000

Werden nun auch hier die Zuschläge von 10% bis 20% je nach Ausführungskonstellation hinzugerechnet, ergeben sich durchschnittliche Anlagekosten für eine Erstanlage mit einer Leistung von 1.335 MW von CHF 14 Mio.

Bei den Betriebskosten verhalten sich die massgeblichen Positionen (Holz, Betriebsmittel) linear zur Anlagengrösse. Der Personalbedarf (vier Vollzeitstellen) hingegen ist auch bei einer kleineren Anlage kaum zu senken. Schliesslich werden sich die Unterhaltskosten bei halber Anlagekapazität nicht halbieren lassen, v.a. weil sich die Anzahl der Aggregate nicht automatisch halbiert, sondern es werden eher gleich viele, aber kleinere Aggregate zum Einsatz kommen. Auch die Kosten für Versicherung, Kommunikation, etc. lassen sich nicht substantiell senken bei halber Anlagekapazität. Wir schätzen dieses Potenzial auf max. 20%.

Die Betriebskosten für eine Anlage mit halber Leistung sehen wie folgt aus:

Holz	CHF p.a.	725'000
Betriebsmittel (Strom, Katalysator, etc.)	CHF p.a.	465'000
Personalkosten	CHF p.a.	400'000
Unterhalt (ab dem 3. Betriebsjahr)	CHF p.a.	170'000
Diverses (Versicherung, Kommunikation, etc.)	CHF p.a.	100'000
Total Betriebskosten	CHF p.a.	1'885'000

Zusammengefasst resultiert bei einer Anlage mit einer Leistung von 1.335 MW ein Bio-SNG- Gestehungspreis von 23 Rp./KWh (vgl. Tabelle 25 Gesamtkostenrechnung der Anlage). Dies bedeutet eine Steigerung von 15% im Vergleich zu den Gestehungskosten von 20 Rp./KWh einer Anlage mit der ursprünglichen Planleistung von 2.67 MW.

KAPAZITÄT UND PRODUKTION

Investition Anlage	CHFk	(11'490.0)
Abschreibedauer	Jahre	20.0
Kapazität der Anlage	kW	2'100.0
Anlageverfügbarkeit in %	%	85.6%
Wirkungsgrad Prozess	%	63.6%
Preis je kW: Holz	CHF	(0.046)
Preis je kW: Gas H _u	CHF	0.251
Preis je kW: Gas H _o	CHF	0.230

Gestehungspreis
Bio-SNG = Rp. 23 KW/h
(bei IRR 0%)

INTERNER ZINSSATZ

	10 Jahre	20 Jahre	30 Jahre
IRR (EBITDA)	(13.36%)	(0.17%)	2.98%

ERFOLGSRECHNUNG

	Bauphase		Betriebsphase				
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesamtleistung	-	-	1'019.2	1'698.7	2'548.1	2'548.1	2'548.1
Direkter Aufwand	-	-	(289.8)	(483.0)	(724.5)	(724.5)	(724.5)
Rohertrag	-	-	729.4	1'215.7	1'823.6	1'823.6	1'823.6
Manpower	(10.0)	(202.8)	(475.6)	(425.6)	(395.6)	(385.6)	(385.6)
Rohertrag nach Manpower	(10.0)	(202.8)	253.8	790.1	1'428.0	1'438.0	1'438.0
Betriebsaufwand	(34.5)	(68.4)	(282.8)	(417.8)	(542.8)	(542.8)	(712.8)
EBITDA	(44.5)	(271.2)	(29.0)	372.3	885.2	895.2	725.2

Tabelle 26: Gesamtkostenrechnung der Anlage

6.4 SENSITIVITÄTSANALYSE

Aus der Sensitivitätsanalyse ist ersichtlich, wie sich die Veränderung einzelner Grössen wie Investitionskosten, Personalaufwand, Holz- oder Gaspreis auf die Rentabilität der Anlage auswirken.

Die Linien/Werte 'Gaspreis' und 'Wirkungsgrad' sind deckungsgleich. Im Diagramm sieht man nur die Gaspreis-Linie. Der IRR reagiert vor allem auf folgende Faktoren (die steilsten Linien):

- Senkung/Erhöhung Gasverkaufspreis oder Wirkungsgrad
- Senkung der Anlagenverfügbarkeit
- Erhöhung des Holzeinkaufspreises

Die Höhe der Betriebskosten ist für den IRR relativ irrelevant. Selbst bei einer Erhöhung/Senkung der Betriebskosten um +/- 50% sinkt/steigt der IRR nur um etwa 1.5%.

Lesebeispiel:

- Verringert sich der Holzpreis um 50%, erhöht sich die Rendite von 0% auf 5%.
- Erhöhen sich die Personalkosten um 50%, verringert sich die Rendite vom 0% auf -3%.
- Erhöht sich der Gaspreis um 20%, erhöht sich die Rendite von 0% auf 5%.

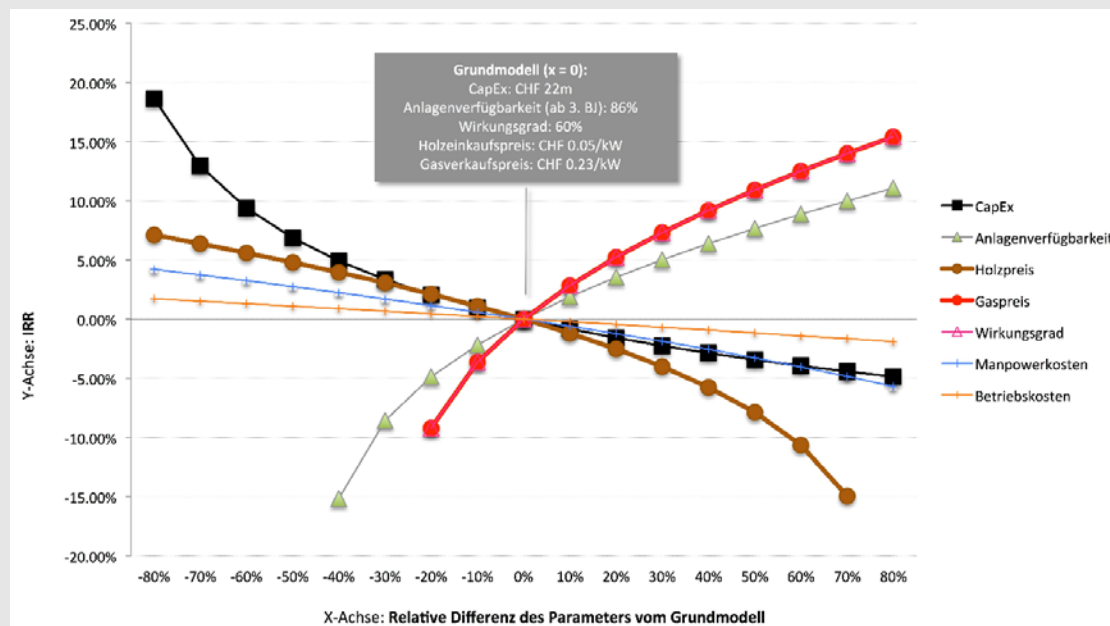


Abbildung 40: Sensitivitäten

APPENDIX

7 POWER-TO-GAS

Hinter dem Begriff "Power-to-Gas" (kurz: PtG oder P2G) verbirgt sich ein Konzept, das überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien nutzt, um mittels Elektrolyse von Wasser und nachgeschalteter Methanisierung ein synthetisches Erdgas zu erzeugen. Das auf diesem Weg erzeugte Erdgas wird häufig auch als EE-Gas (Erneuerbare Energien) bezeichnet.

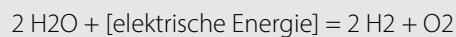
Der Grundgedanke von Power-to-Gas ist die Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes als chemischen Energiespeicher für die zuvor umgewandelte elektrische Energie aus regenerativen Quellen. Hierbei sollen Überangebote von z.B. Wind- und Solarenergie in eine speicherbare Form überführt werden, da das Stromnetz für solche Zwecke nur eine sehr geringe Speicherkapazität besitzt. Im Vergleich hierzu verfügt das bestehende Erdgasnetz über eine deutlich grössere Speicherkapazität und kann bis zu einem gewissen Anteil sogar den durch die Elektrolyse erzeugten Wasserstoff aufnehmen.

7.1 WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-GAS?

P2G ist eine Kombination aus der Elektrolyse von Wasser zur Erzeugung von Wasserstoff und einer anschliessenden Methanisierung von beispielsweise Kohlendioxid zu einem methanreichen Gas (synthetisches Erdgas bzw. EE-Gas).

Elektrolyse von Wasser

Bei der Elektrolyse wird Wasser mithilfe von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt:



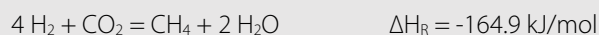
Hierfür wird bei Power-to-Gas insbesondere preisgünstiger Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt, der bei einem Überangebot kostengünstig zur Verfügung steht.

Bei der Elektrolyse kann auf standardisierte Verfahren wie beispielsweise die alkalische Elektrolyse zurückgegriffen werden, die seit Mitte des 20. Jahrhunderts in kommerziellen Grossanlagen zur Wasserstoffgewinnung genutzt wird und dem Stand der Technik entspricht. Es gibt darüber hinaus eine Vielzahl alternativer Verfahren, die sich aber teilweise noch im Entwicklungsstadium befinden.

Wasserstoff kann bis zu gewissen Volumenanteilen in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden, allerdings variieren die zulässigen Höchstwerte hierfür stark in Abhängigkeit der Beschaffenheit und Ausrüstung des jeweiligen Erdgasnetzes. Ein Grund hierfür ist die unerwünschte Korrosion des Leitungsmaterials (sog. Wasserstoffversprödung), da dieses vielfach nicht hierfür ausgelegt ist. Daher wird aktuell die Nutzung des Wasserstoffes zur nachfolgenden Methanisierung favorisiert.

Methanisierung

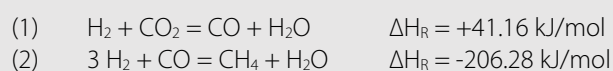
Bei der Methanisierung wird bei P2G der mittels Elektrolyse erzeugte Wasserstoff genutzt, um Kohlendioxid in ein methanreiches Gas umzuwandeln:



Die obige Gleichung entspricht einer Summengleichung, da die eigentliche Umwandlung aus mehreren Teilreaktionen besteht.

Chemisch/physikalische Umwandlung

Bei dieser Umwandlungsform wird unter Verwendung des Wasserstoffs mittels Wassergasshift-Reaktion (1) zunächst Kohlenmonoxid aus Kohlendioxid erzeugt. Das Kohlendioxid wird im Anschluss, wiederum unter Nutzung von Wasserstoff, durch die eigentliche Methanisierung zu Methan umgewandelt (2):



Die chemische/physikalische Umwandlung ist ein katalytischer Prozess und entspricht im Wesentlichen dem Prozess, der in dieser Studie auch zur Erzeugung des Methans aus Holz betrachtet wird, d.h. das Verfahren eignet sich grundsätzlich auch für Power-to-Gas.

Biologische Umwandlung:

Diese Form der Umwandlung entspricht im Wesentlichen einer Effizienzverbesserung der anaeroben Vergärung zugunsten der Methanbildung. Hierbei produzieren Mikroorganismen bei moderaten Bedingungen aus organischer Substanz ein methanreiches Gas. Bei der konventionellen anaeroben Vergärung steht den Mikroorganismen aber in der Regel nicht ausreichend Wasserstoff für die Methanbildung zur Verfügung. Daher entsteht als Nebenprodukt Kohlendioxid, meist in gleichen Anteilen wie das Methan. Stünde nun Wasserstoff aus Power-to-Gas zur Verfügung, können hierfür spezialisierte Mikroorganismen diesen nutzen, um die Methanausbeute zu erhöhen. Allerdings befindet sich diese Form der Methanisierung aus Power-to-Gas noch im Entwicklungsstadium.

Beiden Umwandlungsformen der Methanbildung ist gemeinsam, dass sie CO_2 bzw. eine Kohlenstoffquelle zur Erzeugung des Methans nutzen. Das CO_2 kann grundsätzlich aus Kraftwerksanlagen, Biogasanlagen, industriellen Produktionsprozessen oder einer direkten Abscheidung aus Luft stammen. Gerade im Zusammenhang mit Power-to-Gas ergeben sich beispielsweise bei Biogasanlagen Synergieeffekte, da hier CO_2 als Nebenprodukt anfällt.

7.2 EIGNUNG VON POWER-TO-GAS FÜR DIE BIO-SNG-ANLAGE?

Die in der vorliegenden Studie betrachtete Bio-SNG-Anlage ist geradezu prädestiniert für das Power-to-Gas-Konzept, da die Methanisierung im Wirbelschichtreaktor auf dem gleichen chemischen Prinzip beruht. Das nach aktuellem Kenntnisstand naheliegendste Konzept ist die Nutzung eines Überangebots an Strom aus erneuerbaren Energien zur kostengünstigen Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse. Eine Zugabe dieses Wasserstoffs zum Normalprozess der Bio-SNG-Anlage würde zu einer deutlichen Steigerung der Methanausbeute aus dem Holzgas führen, ohne dass signifikant in den Normalbetrieb der Anlage eingegriffen werden müsste. Damit würde die Bio-SNG quasi zu einem "Power-to-Gas-Hybrid" mit einer konstanten und hohen Betriebsdauer und Amortisationsmöglichkeit (ohne die Nachteile eines stetigen An- und Abfahrens einer reinen Power-to-Gas-Anlage). Mit anderen Worten: Sollte in der Schweiz eine Bio-SNG-Anlage gebaut werden, so wird diese mit Sicherheit die kommerziell sinnvollste Lösung für jegliche Power-to-Gas-Anwendung darstellen. Dedizierte Power-to-Gas-Anlagen dürften unter diesem Gesichtspunkt nicht wettbewerbsfähig sein.

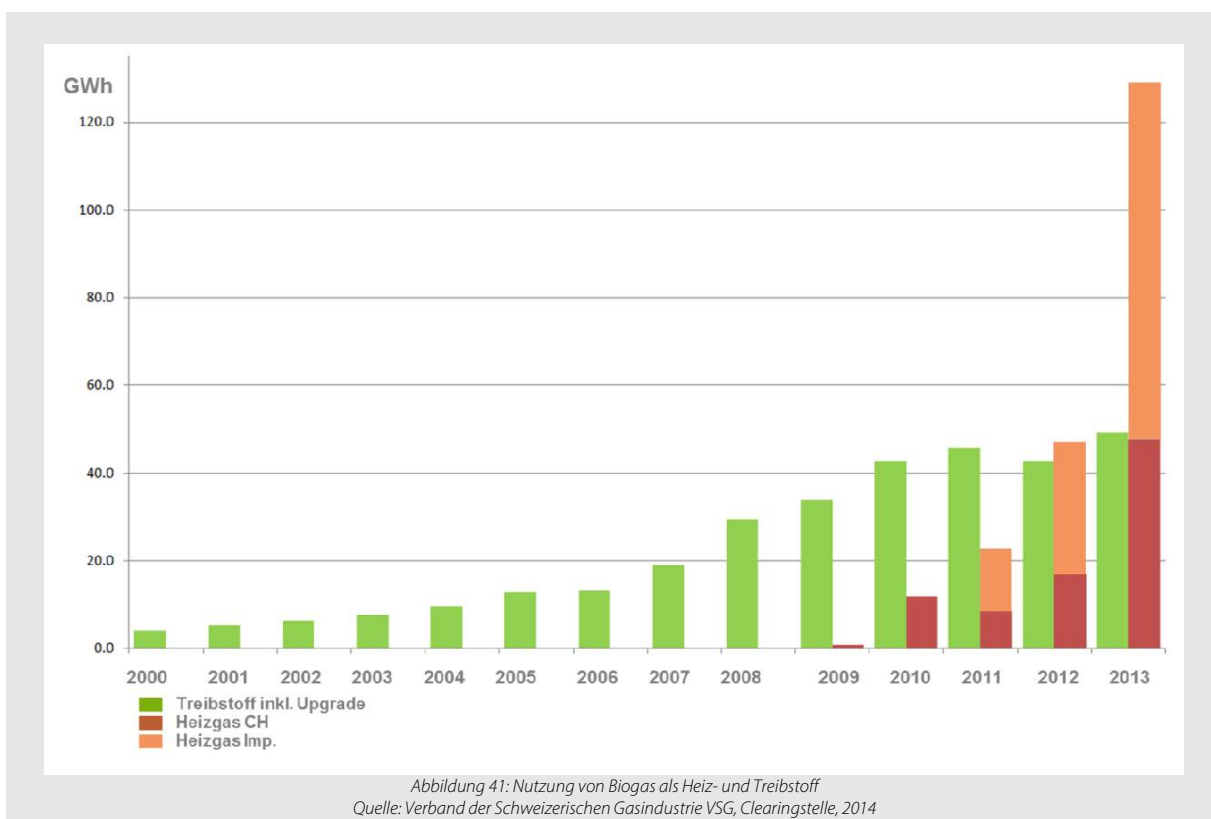
8 NUTZUNG VON BIOGAS IN DER SCHWEIZ

Die Biogasverteilung erfolgt sowohl für dessen Verwendung als Treibstoff oder als Brennstoff jeweils durch lokale Einspeisung über das Erdgasnetz, welches als Schweizer Verbundnetzwerk sowohl die Erdgastankstellen als auch die regionalen oder lokalen Erdgaslieferanten beliefert.

Die Biogaseinspeisung und der Biogasbezug werden in der Schweiz im Auftrag der Oberzolldirektion OZD über eine zentrale Clearingstelle abgerechnet, somit ergeben sich einerseits infolge dessen Speicherbarkeit und andererseits dem Zeitverzug zwischen dessen effektiver physischer Einspeisung und dessen virtuellem Bezug und Ausbuchung gewisse statistische Differenzen.

Hierbei wird die lokale Einspeisung von Biogas - dessen Qualität und Zusammensetzung - durch den jeweiligen Erzeuger protokollarisch erfasst und periodisch an die Clearingstelle gemeldet.

Biogas wird, analog dem Erdgas, als Brenn- oder Treibstoff verwendet, wobei sich gleichzeitig eine massive Verschiebung zugunsten Heizgas entwickelt.



8.1 BIOGASERZEUGUNG IN DER SCHWEIZ

Derzeit wird Biogas in der Schweiz durch Vergärung von pflanzlichen und tierischen Stoffen erzeugt. Dies erfolgt vorwiegend auf der Basis von pflanzlichen und tierischen Abfällen, wobei die Vergärung von tierischen Stoffen offenbar noch entwicklungsbedürftig ist. Eine weitere Quelle für Biogas stellen die Abwasser-Reinigungs-Anlagen (ARA) dar.

Die Statistik der Erdgas Schweiz 2013 zeigt eine deutliche und zunehmende Steigerung des eingespeisten Biogases von ca. 3 GWh im Jahr 2000 auf 142 GWh im Jahr 2013. Nicht enthalten ist der Anteil Biogas der zur Stromerzeugung verwendet wird.

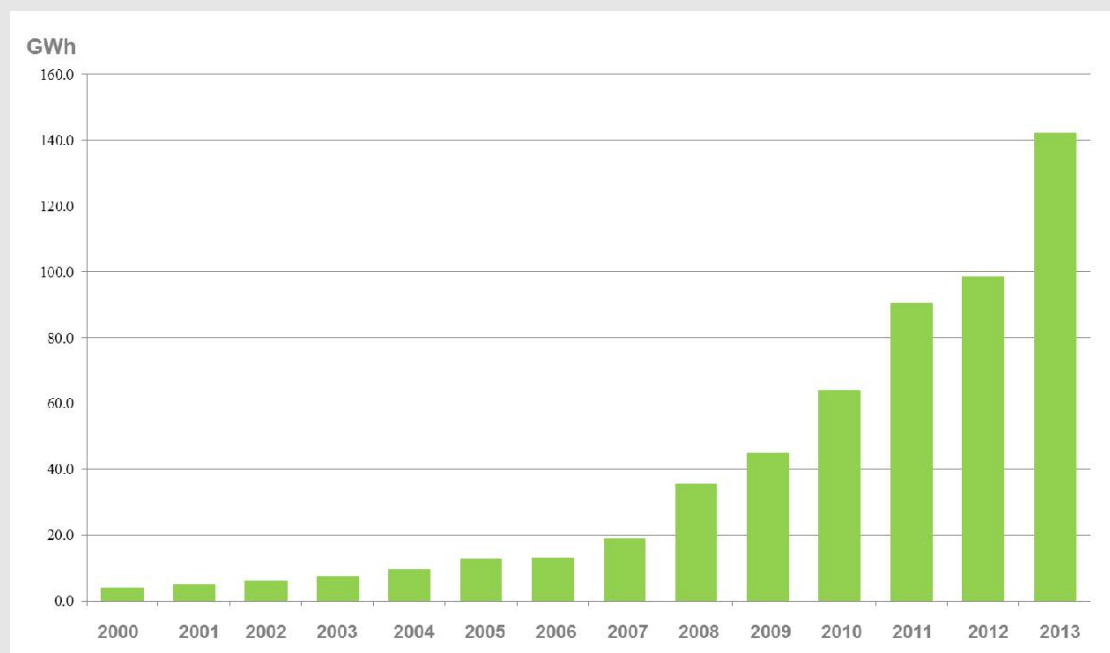


Abbildung 42: Einspeisung von Biogas in der Schweiz
(Quelle: Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG, Clearingstelle, 2014)

Fazit betreffend der Biogaserzeugung und Biogaseinspeisung in der Schweiz:

Die geplante Anlage Mont-la-Ville mit einer Leistung von 2.67 MW (unterer Heizwert H_u) ergibt bei einer Dauerbetriebszeit von 85% pro Jahr entsprechend 7'500 h eine Jahresproduktion von 20 GWh H_u , was 14% der aktuellen Biogaseinspeisung von 142 GWh H_u ins Erdgasnetz entspricht.

Zum Vergleich: Der Gesamtverbrauch an Erdgas in der Schweiz beträgt 37'914 GWh.

8.2 ZUSÄTZLICHE ÖKOLOGISCHE ASPEKTE DER BIOGASHERSTELLUNG

Nebst der Tatsache, dass Holz zur Biogaserzeugung im Gegensatz zu anderer Biomasse nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion steht, weisen die mit der Methanisierung von Holz verbundenen Treibhausgasemissionen einen weiteren gewichtigen ökologischen Vorteil dar.

Wie aus einer breit angelegten Studie der EMPA aus dem Jahre 2012 zur Ökobilanz von Biotreibstoffen hervorgeht, weist die Nutzung von Holz zur Erzeugung von Biomethan gegenüber den konventionellen Biogaserzeugungen aus Klärschlamm und Gülle deutliche Vorteile bezüglich den insgesamt resultierenden Treibhausgasemissionen auf:

Holz	Treibhausgasemissionen von 32% im Jahr 2007 auf 22% im Jahr 2012
Klärschlamm	Treibhausgasemissionen von 49% im Jahr 2007 auf 28% im Jahr 2012
Gülle	Treibhausgasemissionen von 67% im Jahr 2007 auf 43% im Jahr 2012

Somit ergibt sich bezüglich Treibhausgasemissionen für Holz mit 22% gegenüber Klärschlamm mit 28% und Gülle mit 43% ein Vorteil von Faktor 1.27 bis 1.95.

Betreffend Umweltbelastung (UBP 06, Umweltbelastungspunkte, basierend auf der aktualisierten ganzheitlichen Betrachtung nach der Methode der ökologischen Knappheit*) ergibt sich für Holz mit 53% gegenüber Klärschlamm mit 67% und Gülle mit 73% ein Vorteil von Faktor 1,26 bis 1,38.

Zudem weist die genannte Studie auf, dass nur wenige Biotreibstoffe eine insgesamt bessere Ökobilanz als Benzin aufweisen, allen voran jedoch Biogas aus Holz.

*<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01031/index.html?lang=de>

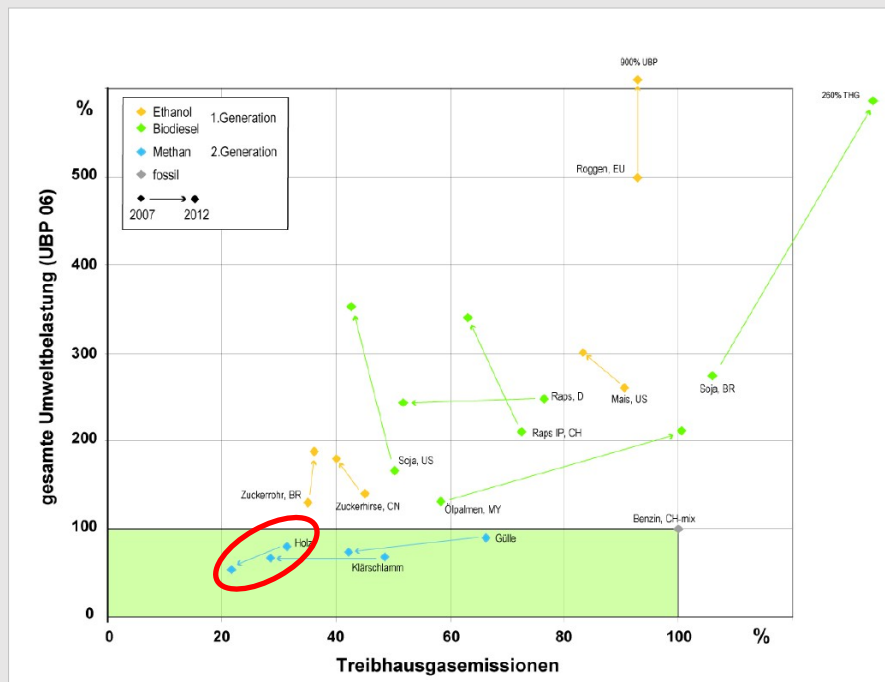


Abbildung 43: Ökobilanz Biotreibstoffe
(Quelle: Empa, Die wenigsten Biotreibstoffe sind "grün" 24.09.2012)

8.3 ERDGAS UND BIOGAS ALS BRENNSTOFF

Der derzeitige bescheidene Marktanteil des Biogases von insgesamt 0,125% stellt eine Chance für zukünftiges Wachstum dieses Segmentes dar.

Erdgas Zürich verfügt über ein Modell, welches dem Kunden für verschiedene Anwendungsgebiete (Kochen, Heizen/Warmwasser, Gewerbe) ein gestaffeltes Angebot mit einer Auswahl an unterschiedlichen Biogasanteilen von wahlweise 5%, 20% oder mit einem speziellen Label "naturmade star" versehen, von 100% anbietet. (vgl. dazu auch 4.1).

Zudem werden für die Umstellung von Erdöl auf Erdgas/Biogas sowie Gas-Wärmepumpen vielfältige Förderbeiträge von Bund, Kantonen sowie Erdgasanbietern im Bereich von bis zu CHF 10'000.- gewährt. (Quelle: energieschweiz, Erdgas Zürich)

Gas als Energieträger für Heiz- und Kochanwendungen ist an sich seit zirka 150 Jahren etabliert. Die ursprünglichen städtischen Gasversorgungen basierten auf der Vergasung von Kohle.

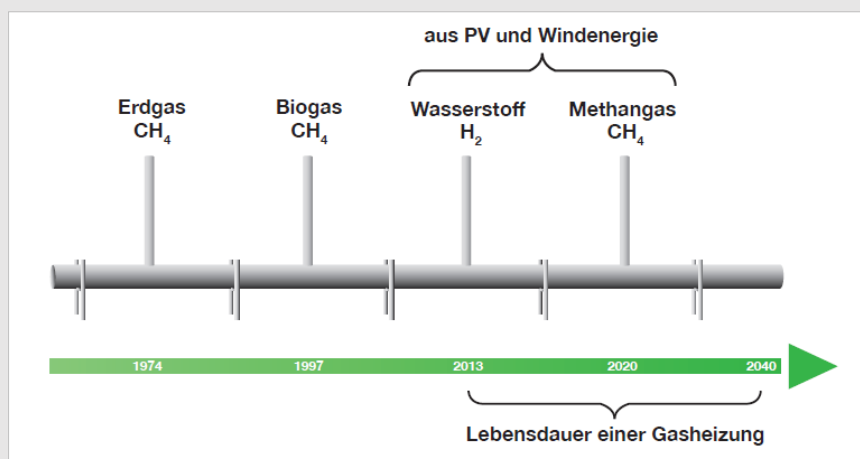


Abbildung 44: Erdgasnetz als multifunktionaler Energieträger und Energiespeicher
(Quelle: Erdgas Schweiz)

Mit dem Bau der ersten Erdgastransleitung von Holland nach Italien in den 1970er-Jahren stellten die vormaligen Gaserzeuger den Betrieb der Kohlevergasung sukzessive ein und erweiterten ihre ehemals städtischen Gasnetze zu regionalen Verbundnetzen zum Vertrieb von Erdgas.

In einer weiteren Phase wurden in den 1990er-Jahren die ersten Anlagen zur Erzeugung von Biogas erstellt, welche teilweise ebenfalls in das Schweizer Gasverbundnetz einspeisen.

Derzeit stellt die Erzeugung von Wasserstoff (H₂) und Methan (CH₄) aus sehr variabler, zudem entgegen der Nachfragespitzen anfallender sowie kaum speicherbarer und somit schwer zeitgerecht verwertbarer elektrischer Energie, Power-to-Gas (vgl. dazu 7), eine weitere Quelle zur Speisung des Erdgasnetzes dar.

Die wesentlichen Vorteile von Erdgas und Biogas gegenüber Heizöl liegen

- in deren tieferen CO₂-Ausstoss – sowie bei 100% Biogas einer CO₂-neutralen Heizung
- in deren markant tieferen Feinstaub- und Russemissionen
- in deren günstigeren Anlage- und Unterhaltskosten (Öltank entfällt)

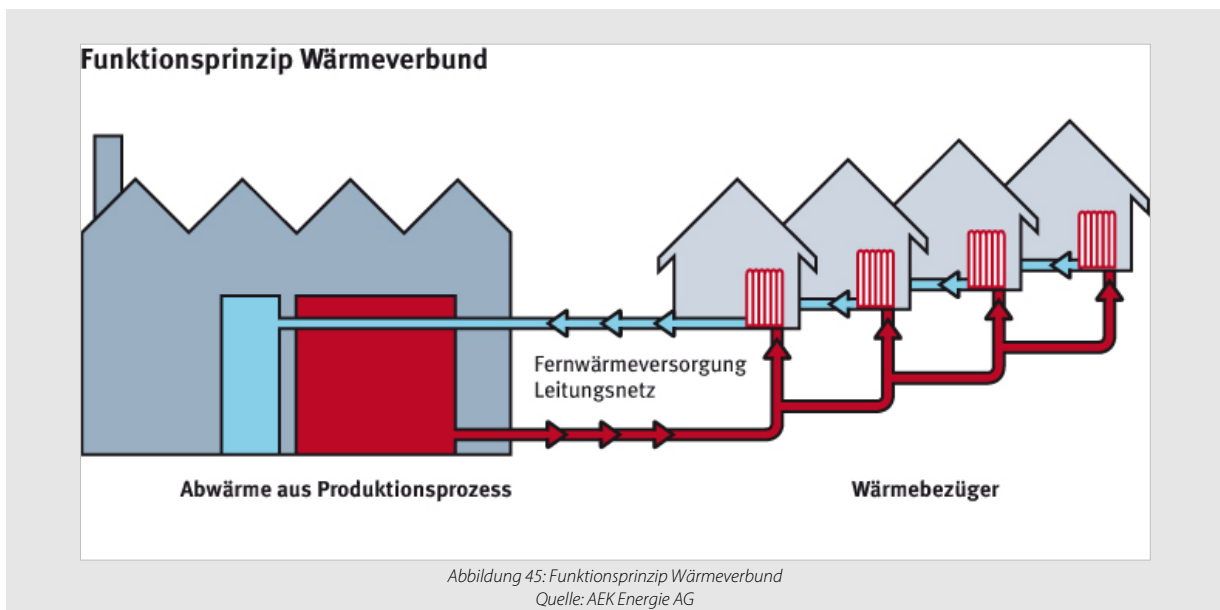
8.4 EXKURS: SWISS-SNG VERSUS FERNWÄRME

Fernwärme ist die Bezeichnung für eine Wärmelieferung zur Versorgung von Gebäuden mit Heizung und Warmwasser. Der Transport der thermischen Energie erfolgt in einem wärmegeprägten Rohrsystem, das überwiegend erdverlegt ist.

Fernwärme versorgt vor allem Wohngebäude neben Heizung auch mit Warmwasser, indem die Wärme vom Erzeuger oder der Sammelstelle zu den Verbrauchern geleitet wird. Unter Fernheizung wird die Erschliessung ganzer Städte oder Stadtteile verstanden. Bei der örtlichen Erschliessung einzelner Gebäude, Gebäudeteile oder kleiner Wohnsiedlungen mit eigener Wärmeerzeugung spricht man auch von Nahwärme (Quelle: Wikipedia). Der Einfachheit halber wird in dieser Studie der Begriff Fernwärme für sämtliche der oben genannten Anwendungsbereiche verwendet.

Die Fernwärme eignet sich primär zur Erschliessung von Gebieten, welche wie Städte sehr dicht bebaut sind oder Anlagen, die sehr hohe Energiemengen benötigen wie industrielle Prozesswärme.

Fernwärmenetze sind als geschlossener Kreislauf mit doppelter Leitungsführung (Vor- und Rücklauf) aufzubauen und zu betreiben.



Dies ist gleichzeitig der grösste Nachteil des Fernwärmekonzeptes. Je geringer nämlich die Wärmeabnahme je Verbraucher ausfällt, desto grösser muss das Fernwärmenetz ausgebaut werden, um dieselbe Energiemenge abzusetzen. Der nachhaltige Trend zur energetischen Gebäudesanierung führt dazu, dass die Wirtschaftlichkeit des Fernwärmenetzes über die Lebensdauer stetig abnimmt oder gar negativ wird.



Abbildung 46: Erdverlegte, doppelt geführte Fernwärmeleitung
(Quelle: Vattenfall)

Ein lokales Erdgasnetz ist in aller Regel Teil eines überregionalen oder gar internationalen Verbundnetzes. Ein solches Gasnetz, welches als einfach geführte Speiseleitung ausführbar ist und zudem ohne kostspielige Isolation auskommt, führt nicht nur zu deutlich tieferen Kosten für Bau, Betrieb und Unterhalt, sondern gewährleistet auch den überregionalen Ausgleich von Angebot und Nachfrage.



Abbildung 47: Erdverlegte, einfach geführte Gasleitung (5 bar).
(Quelle: Cosvegaz)

Mit lokal und nachhaltig produziertem Erdgas, welches in ein bestehendes Gasnetz eingespeist wird, kann sowohl die Deckung von Spitzenlast als auch die Versorgungssicherheit gewährleistet werden.

Zudem bietet die lokale Einspeisung von erneuerbarem Erdgas in ein bestehendes Gasnetz gegenüber Fernwärme weitere markante Vorteile, indem dieses einerseits ein lokaler günstiger Speicher mit einer grossen Kapazität darstellt und andererseits die Energieverteilung über das Gasnetz mit sehr geringen spezifischen Verlusten sowohl lokal als auch über die Region hinaus erfolgen kann.

8.4.1 Zukunft der Schweizer Fernwärmenetze

Am Beispiel des Energieverbrauchs des Kantons Zürich ist ersichtlich, dass der Wärmebedarf im Allgemeinen und per Einwohner noch akzentuierter seit ca. 1995 stetig rückläufig ist. Dies im Gegensatz zum Strom und Treibstoffverbrauch, welche pro Einwohner zwar konstant blieben, infolge der Zuwanderung jedoch insgesamt angestiegen sind.

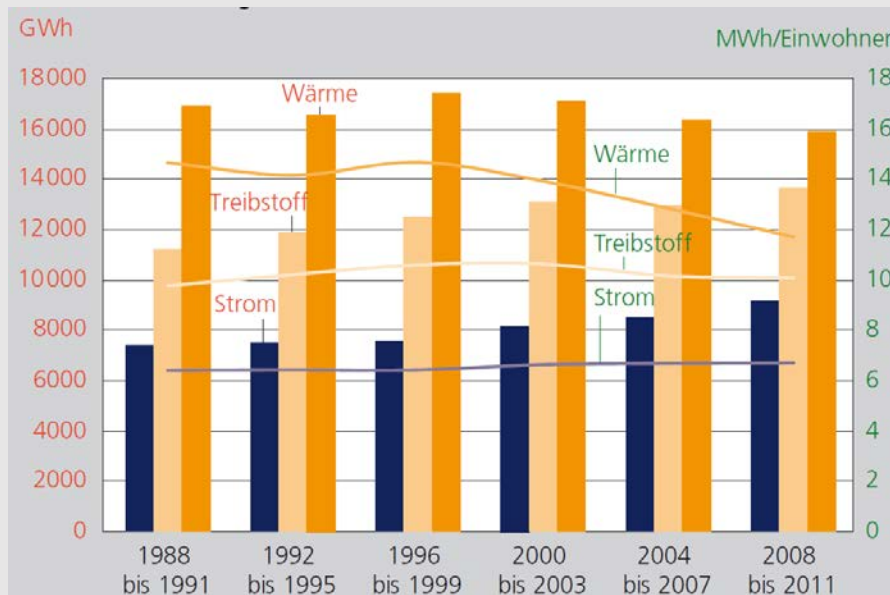


Abbildung 48: Entwicklung Wärmeverbrauch Kanton Zürich 1988 – 2011
(Quelle: Baudirektion Kanton Zürich, Vortrag Fernwärmetagung Januar 2014, Biel)

Noch deutlicher ist der Trend erkennbar, wenn der Wärmebedarf von Neubauten je Quadratmeter Wohnfläche seit 1975 bis heute betrachtet wird. Bei dieser Betrachtungsweise sind allfällige Verfälschungen durch Zuwanderung und der Trend zu grösseren Wohnungen ausgeklammert.

Getrieben wurde und wird diese Entwicklung von der Einführung einschlägiger Vorschriften zur energetischen Gebäudesanierung resp. durch die Förderung solcher Massnahmen.

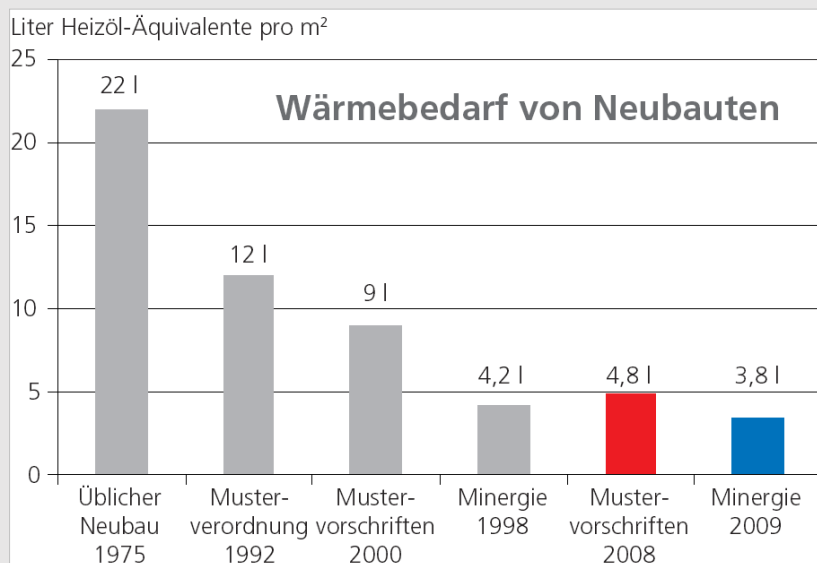


Abbildung 49: Entwicklung Wärmeverbrauch Neubauten Kanton Zürich 1975 – 2019
(Quelle: Baudirektion Kanton Zürich, Vortrag Fernwärmetagung Januar 2014, Biel)

Die Prognosen gehen von einer Fortführung des seit Jahrzehnten andauernden Trends aus.

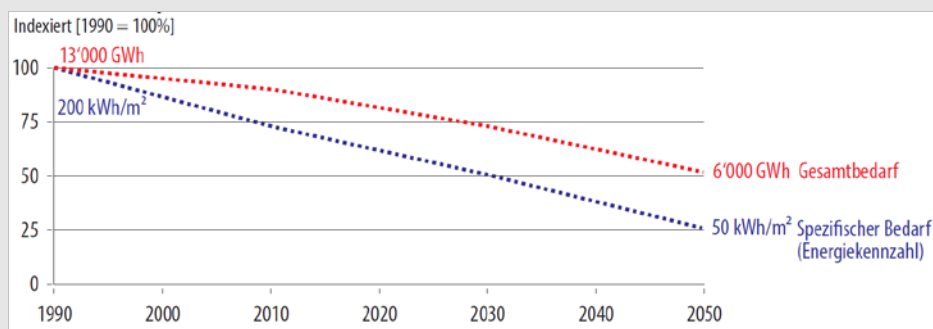


Abbildung 50: Entwicklung Wärmebedarf und Energiekennzahl 1990 – 2050
(Quelle: Baudirektion Kanton Zürich, Vortrag Fernwärmetagung Januar 2014, Biel)

Gemäss Prognose soll der spezifische Bedarf (kWh/m², Energiekennzahl) von aktuell etwa 65 kWh/m² auf etwa 25 kWh/m² im Jahr 2050 sinken. Begründet wird dieser Trend einerseits mit der technischen Weiterentwicklung im Bereich der Gebäudeisolation, aber auch mit der Tatsache, dass noch immer ein grosses Potenzial an Einsparungen brachliegt.

So handelt es sich beispielsweise im Kanton Zürich von insgesamt ca. 90 Mio. Quadratmetern Wohnfläche bei etwa 33% um Neubauten, welche energetisch auf aktuellem Stand sind und bei etwa 22% um sanierte Altbauten. Dies bedeutet, dass es sich bei den restlichen 45% um nicht sanierte Altbauten handelt, welche entweder durch Sanierung oder Abriss/Neubau ein enormes Einsparpotenzial an Wärmeverbrauch für die nächsten Jahrzehnte darstellen.

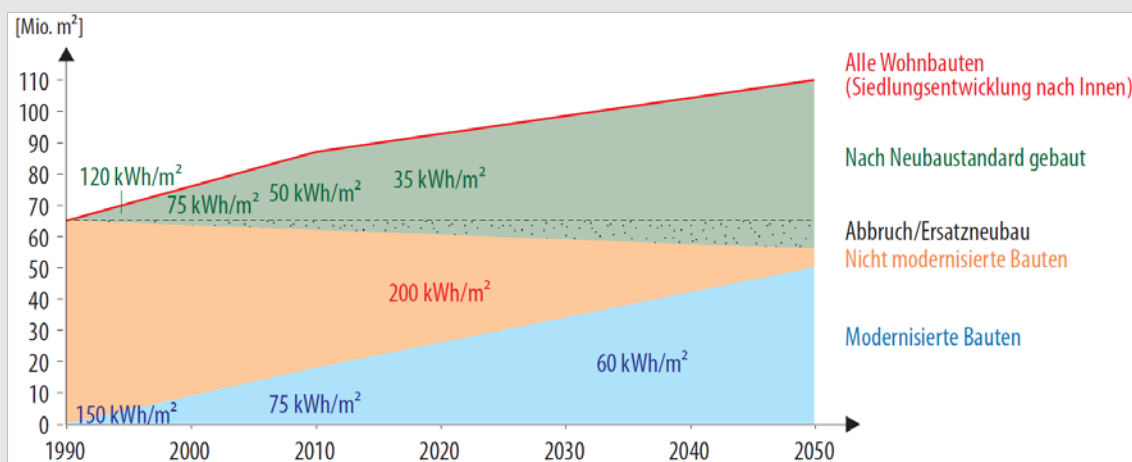


Abbildung 51: Entwicklung Energiekennzahl innerhalb bestehender Siedlungen 1990 – 2050
(Quelle: Baudirektion Kanton Zürich, Vortrag Fernwärmetagung Januar 2014, Biel)

Als Fazit kann gesagt werden, dass ein klarer und begründeter Trend zu einer starken Reduktion des Wärmebedarfs vorherrscht. Für Fernwärmeanbieter bedeutet dies, dass mit zusätzlichen Investitionen in den stetig notwendigen Ausbau des Netzes gerechnet werden muss. Aus ökonomischen Gründen werden die Fernnetzbetreiber daher nicht umhin kommen, die Effizienz der bestehenden Netze zu steigern. Dies ist aus momentaner Sicht eigentlich nur durch das Anbieten von Kälte zu bewerkstelligen. Andererseits bedarf dies jedoch erneuter Investitionen bei der Energiezentrale.

Im Vergleich dazu scheint eine Investition in eine Bio-SNG-Anlage dank der grossen Flexibilität eines Verbundnetzes und der breiten Palette an Endanwendungen (Heizen, Kühlen, Kochen, Fahren, Verstromen) planbarer und daher mit wesentlich geringeren Risiken verbunden.

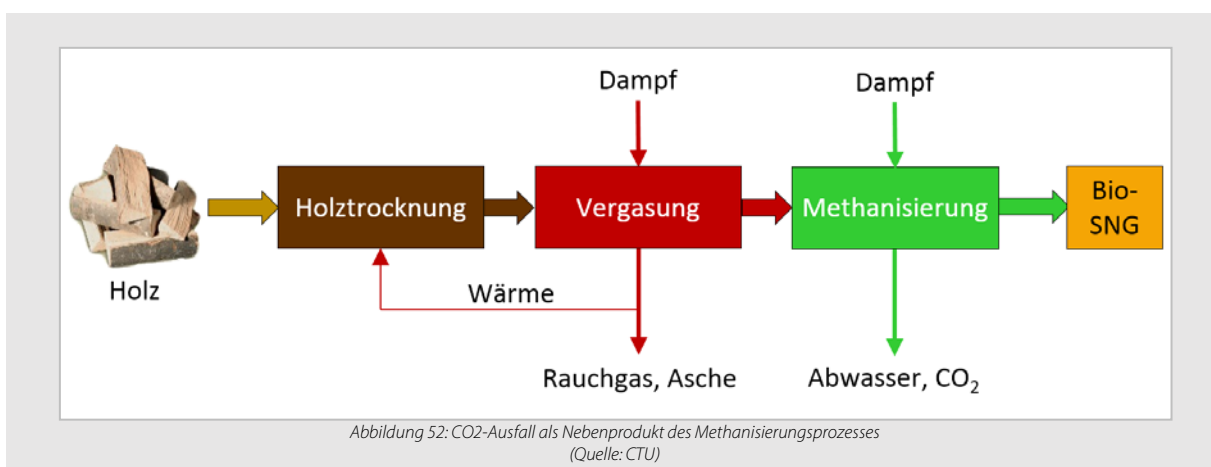
Nachfolgend eine Übersicht zu den Pros und Kontras der Fernwärme im Vergleich zu Erdgas und Biogas:

Medium	Fernwärme	Erdgas	SWISS-SNG
Energiefluss	Geschlossener Kreislauf	Free Flow on demand	Free Flow on demand
Anwendung	Limitiert auf 80-130°C	Flamme bis 2000°C	Flamme bis 2000°C
Wohnbereich Heizen	Nur saisonal nutzbar	Nachfragegerecht	Nachfragegerecht
Wohnbereich Warmwasservers.	Durchgehend nutzbar mit saisonaler Absenkung VT	Nachfragegerecht für alle Jahreszeiten	Nachfragegerecht für alle Jahreszeiten
Wohnbereich Kochen	Nicht anwendbar	Nachfragegerecht	Nachfragegerecht
Industrielle Prozesse	Durchgehend nutzbar	Durchgehend nutzbar	Durchgehend nutzbar
Individuelle Mobilität	Nicht anwendbar	30% CO ₂ -Reduktion	Green, CO ₂ neutral
Kollektive Mobilität	Nicht anwendbar	30% CO ₂ -Reduktion	Green, CO ₂ neutral

Tabelle 27: Nutzungsvergleich der drei Medien Fernwärme, Erdgas und SWISS-SNG
(Quelle: CTU)

8.5 BIO- CO₂ ALS ZUSATZNUTZEN DER HOLZGASMETHANISIERUNG

Die SWISS-SNG-Anlage produziert als Nebenprodukt CO₂, welches einerseits für den Betrieb der Anlage weiterverwendet, andererseits jedoch auch als Bio- CO₂ verwertet werden könnte.



Je nach Betriebspunkt der Anlage können CO₂-Anteile von zirka 22% bis 45% aus den Prozessen abgeschieden und als Bio-CO₂ einer zusätzlichen Verwendung zugeführt werden. Somit könnten mit der geplanten Anlage Mont-la-Ville ca. 100 bis 200 kg Bio-CO₂/h erzeugt werden.

Als zukünftige Bio- CO₂-Anwendungen im Sinne technischer Gase könnte deren Einsatz insbesondere in der Lebensmittelbranche zusätzliche Nutzen erschliessen:

- Erneuerbares CO₂ für den Getränkebereich (Sprudel; wird heute grossmehrheitlich durch Verbrennung von Erdgas gewonnen).
- Frischhaltegas bei Lebensmittelverpackungen, v.a bei Convenience Food.

Die derzeitigen CO₂-Angebote für den Lebensmittelbereich basieren auf den technischen Gasen, welche vorwiegend als Nebenprodukte der industriellen Gasgewinnung anfallen und entsprechend aufbereitet werden. Deren Reinheit muss den Vorschriften für Lebensmittel entsprechen sowie deren Gewinnung und Qualität über QS-Prozesse und Zertifikate nachgewiesen werden.

Die Preise für lebensmitteltaugliches CO₂ sind stark volumenabhängig. Kleinmengen ergeben mit den jeweils aufwendigen Flaschenbefüllungen Preise (Schätzbereich +/-20%) von zirka CHF 5.-/kg. Anliefermengen von 50'000 kg/Jahr für mittlere Verbraucher, welche mittels Tankzügen von jeweils zirka 20'000 kg angeliefert werden, ergeben Preise von zirka CHF 0,5/kg. Für Grossverbraucher mit sehr viel grösseren Volumen kann der Preis weiter bis gegen zirka CHF 0,2/kg sinken.

Aus dem Sprudelmarktvergleich zur Herstellung von Getränken aus Hahnenwasser ergibt sich bei 6 Gramm CO₂/Liter Wasser ein Preis von 2,5 Eurocent (Preisbasis 10-kg-CO₂-Flasche), was 4 Euro pro kg CO₂ ergibt und somit gut konform zu den oben genannten CHF 5.-/kg liegt.

8.6 ERDGAS UND BIOGAS ALS TREIBSTOFF

Die Verwendung von Biogas im Vergleich zu Erdgas als Treibstoff ist über viele Jahre kontinuierlich gesunken und hat sich in den vergangenen sechs Jahren in etwa auf einem Niveau von 20% stabilisiert, wie aus nachfolgender Tabelle ersichtlich wird. Die Schweizer Erdgas-Wirtschaft mischt dem an den Erdgas/Biogastankstellen abgegebenen Treibstoff stets mindestens 10% Biogas bei.

Der Kunde kann jedoch an einigen Erdgas/Biogastankstellen verschiedene Mischungsverhältnisse bis 100% Biogas wählen (vgl. dazu 8.6.2).

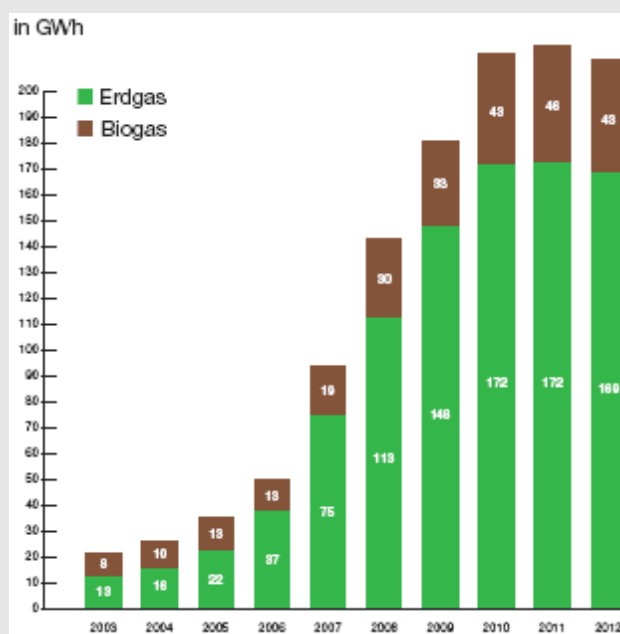


Abbildung 53: Erdgas und Biogas als Treibstoff
(Quelle: Erdgas Schweiz, Erdgas in Zahlen, Ausgabe 2013)

8.6.1 Erdgas-Fahrzeugbestände

Die Entwicklung der Erdgasfahrzeugbestände in der Schweiz verläuft auf einem derzeit insgesamt sehr bescheidenen Niveau nach wie vor positiv, aktuell mit markant steigenden Zulassungszahlen.

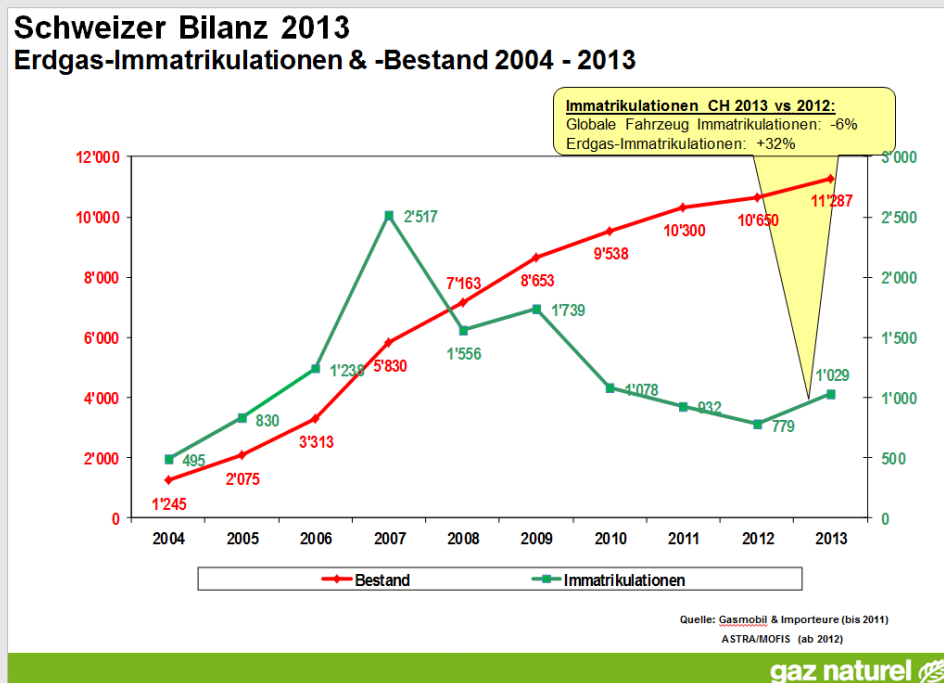


Abbildung 54: Bestandesentwicklung und -zunahme Erdgasfahrzeuge
(Quelle: Erdgas Schweiz)

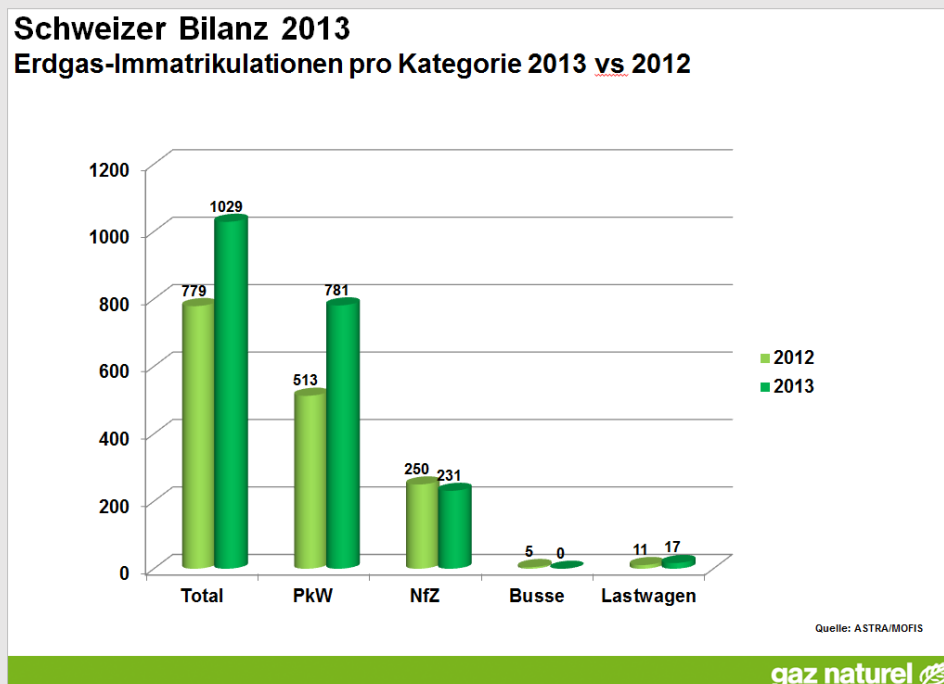


Abbildung 55: Portfolio der Zunahme der Erdgasfahrzeuge nach Kategorien
(Quelle: Erdgas Schweiz)

Die Entwicklung der Neuzulassungen von Erdgasfahrzeugen 2013 in der Schweiz zeigt derzeit einen deutlichen Trend in Richtung PKV auf. Dieser Trend dürfte nicht zuletzt auf die in der jüngsten Vergangenheit massiv attraktivere Angebot an Erdgas/Bifuel Fahrzeugen zurückzuführen sein (vgl. dazu auch 8.6.3).

8.6.2 Tankstellennetz in der Schweiz

Erdgas wird in der Schweiz als CNG (Compressed Natural Gas) auf etwa 200 bar verdichtet als Treibstoff eingesetzt, damit eine ausreichende Energiemenge bei einem vertretbaren Volumen der Speicherbehälter im Fahrzeug, insbesondere bei PKWs mitgeführt werden kann.

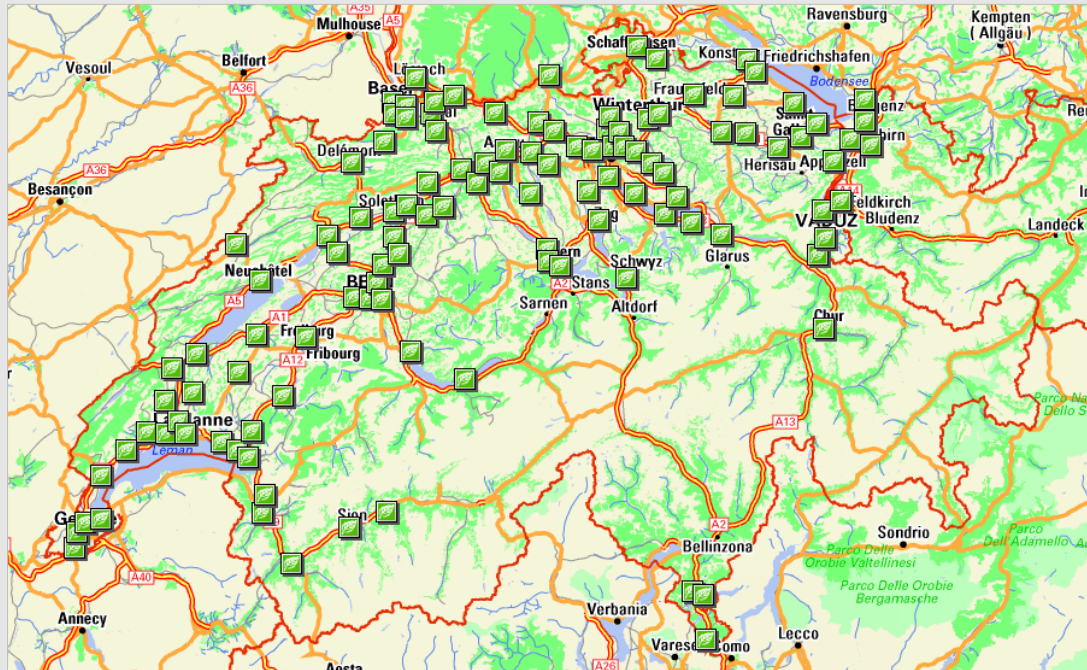


Abbildung 56: Schweizer Erdgastankstellennetz

Derzeit sind schweizweit 135 Tankstellen für Erdgasfahrzeuge in Betrieb, davon 37 in der Westschweiz. Quelle: Erdgas Schweiz 2014. Daneben sind zirka 60 Werktankstellen in Betrieb.

Einige Erdgasanbieter ermöglichen es dem Kunden bereits heute, im Rahmen eines CO₂-freien Mobilitätsangebotes den Biogasanteil (ohne zusätzliche Investitionen in Anlagen oder in dessen Fahrzeugen) wahlweise in verschiedenen Abstufungen gestaffelt bis auf 100% aufzustocken:

- Aarau – IBAarau Erdgas AG
- Baden – Regionalwerke AG Baden
- Luzern – Energie Wasser Luzern
- Schwyz – Erdgas Innerschwyz AG
- Solothurn – Regio Energie Solothurn
- Zürich – Erdgas Zürich AG
- Fribourg – Frigaz AG

Beispielhaft sei das Angebot von Frigaz aufgeführt, welche derzeit vier Erdgas-/Biogastankstellen in Freiburg Nord, Morat, Bulle und Payerne betreibt.

FÜR DAS BESTE PREIS-UMWELT-VERHÄLTNIS			
An den öffentlichen Frigaz-Tankstellen haben Sie die freie Wahl zwischen drei unserer biogashaltigen Produkte.			
ERDGAS	+	25% BIOGAS	= +CHF0.13/LITER*
ERDGAS	+	50% BIOGAS	= +CHF0.36/LITER*
		100% BIOGAS	= +CHF0.81/LITER*
Diese Preise sind zusätzlich zu dem an der Tanksäule angegebenen Preis zu zahlen. * Benzínäquivalent			

Abbildung 57: Preise für Biogasmischungen als Treibstoff
(Quelle: Frigaz 2014)

Basierend auf den aktuellen Tankstellenpreisen für Erdgas ergibt sich somit bei CHF 1.90/kg ein Benzinäquivalent von CHF 1.15/Liter. Dies bedeutet ca. 30% Kosteneinsparung gegenüber Benzin. Bei 50% Biogasanteil beträgt der Preisvorteil noch etwa 20%. Bei 100% Biogasanteil kann, je nach Region und Lieferant, nahezu ohne Aufpreis gegenüber Benzin völlig CO₂-neutral gefahren werden.

8.6.3 Vorteile der aktuellen Erdgas- und Biogasmobilität

Die wesentlichen Vorteile der Mobilität mit Erdgas/Biogas gegenüber Benzin und Diesel liegen:

- in deren tieferen CO₂-Ausstoss – sowie bei 100% Biogas einer CO₂-neutralen Mobilität
- in deren markant tieferen Feinstaub- und Russmissionen
- in deren deutlich günstigeren Treibstoffkosten (je nach Anbieter durchschnittlich 30%)
- deren Umsetzung in zunehmend attraktiveren und marktgängigeren Serienfahrzeugen
- deren zunehmend gleichwertigeren technischen Leistungsfähigkeit sowie Preiswürdigkeit

Die wesentlichen Vorteile der Mobilität mit Erdgas-/Biogasfahrzeugen gegenüber reinen Elektrofahrzeugen BEV liegen:

- in deren grösseren Reichweite bei geringerem Fahrzeuggewicht resp. höherer Nutzlast
- in deren kürzeren Betankungszeit/unbeschränkten Lebensdauer des installierten Speichers
- in deren zu Diesel- und Benzinfahrzeugen gleichwertigen Modellen, Leistungen und Preisen
- in deren ökologisch unbedenklichen und dauerhaften Energiespeichern (Gastank)
- in deren Standfestigkeit bezüglich den Umgebungstemperaturen (Heizungen/Klimaanlagen)

Die Reduktion der CO₂-Emissionen basiert einerseits auf den physikalischen Eigenschaften von Erdgas, das gegenüber Benzin 25% weniger CO₂emittiert. Zudem lässt sich der CO₂-Ausstoss durch geeignete Angebote weiter gezielt verringern, indem durch die Schweizer Erdgasanbieter standardmässig und verpflichtend eine 80%-Erdgas-/20%-Biogasmischung vertrieben wird. Dies ergibt insgesamt eine 40%-ige Reduktion gegenüber dem Treibstoff Benzin.

Dank der Möglichkeit, Erdgasfahrzeugen zu 100% mit Biogas zu betreiben, lassen sich diese vollkommen CO₂-neutral betreiben. Diese Tatsache scheint derzeit in der Schweiz – ganz im Gegensatz zu vermeintlich CO₂-freien Elektrofahrzeugen – kaum bekannt zu sein. Entsprechend Aufklärungs- und Promotionsarbeit wäre daher dringend notwendig.

8.6.4 Fördermodelle für ökologische Mobilität

Derzeit besteht einerseits die Eidgenössische Förderung der Erdgasmobilität durch eine um 40 Rp. pro Liter Benzinäquivalent reduzierte Treibstoffzollabgabe, andererseits eine sehr fragmentierte kantonale Förderpolitik, welche mangels Alternativen auf den kantonalen Fahrzeugabgaben basiert.

Das BFE hat per 4.2.2014 eine Liste sämtlicher Kantone sowie der jeweiligen als emissionsarm amtlich anerkannten Fahrzeugkategorien publiziert. Im Kanton Zürich werden Fahrzeugen ab 2014 einzig gestaffelte Rabatte für die Energieeffizienzklassen A (80%) und B (50%) gewährt, sämtliche weitergehenden Rabatte auf Hybrid- und Gasfahrzeuge entfallen vollständig, dagegen werden jedoch Elektrofahrzeuge von den Verkehrsabgaben vollständig und zudem unbefristet befreit.

Von den wenigen Kantonen, welche Erdgasfahrzeuge nach wie vor gezielt fördern, ist Luzern mit der klaren Formulierung "Die Verkehrssteuer beträgt für Fahrzeuge mit Elektro-, Gas-, Wasserstoff-, Brennstoffzellen- oder Hybridantrieb 20% der ordentlichen Abgabe", deutlich am progressivsten.

Die Erdgasbranche fördert den Kauf von Erdgasfahrzeugen (sowohl PKW als auch Nutzfahrzeuge) mit Beiträgen von durchschnittlich CHF 1'000.- pro Fahrzeug, Flotten mit tendenziell höheren Beiträgen. Einige Versicherungsgesellschaften gewähren für Erdgasfahrzeuge unterschiedliche Rabatte im Bereich von 10% bis 25%. Auch einige Leasinggesellschaften gewähren Rabatte.

Seitens Parlament wurden verschiedene Vorstösse zur Förderung der Erd- und Biogasmobilität unternommen, beispielsweise durch Reduktion der LSVA. Leider wurde diesen Anliegen bis anhin nicht gefolgt. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine CO₂-konforme LSVA-Reduktion für das Transportgewerbe und die Fahrzeughersteller sehr interessante Anreize darstellen würden.

Seitdem in den USA grossflächig günstiges Schiefergas gefördert wird, hat das Interesse an Erdgas zu Mobilitätszwecken stark zugenommen. Dies gilt insbesondere auch für den Bereich der Nutzfahrzeuge. Es wird daher davon ausgegangen, dass dieser Nachfragezuwachs in den USA die LKW-Hersteller weltweit animieren wird, entsprechende Produkte anzubieten. Dies dürfte sich auch auf Europa und die Schweiz positiv auswirken.

8.7 FISKALISCHE BELASTUNGEN DER ENERGIETRÄGER ERDGAS UND BIOGAS

Die Handhabung der Energieträger Erdgas und Biogas als Treibstoff unter dem Regulativ der Oberzolldirektion OZD via Mineralölsteuergesetzgebung mit dessen komplexen Abgaben sowie dem Mineralölsteuerzuschlag auf Treibstoffen stellt gegenüber der Handhabung von Elektrizität als Energieträger für Fahrzeuge eine Marktverzerrung zuungunsten des Energieträgers Gas dar. Die systematischen Benachteiligungen umfassen sowohl die inländischen Produzenten von Biogas als auch die Importeure, welche Biogas als solches nur über separate Leitungen oder Tankfahrzeugen importieren können, damit diese Importe durch die Zollverwaltung als Biogas anerkannt werden.

Seit Mitte 2008 besteht eine Reduktion der Mineralölsteuer auf Erdgas resp. die vollständige Befreiung auf Biogas. Dies soll das Umsteigen auf Erdgasfahrzeuge fördern und die CO₂- und Umweltbelastung durch den Strassenverkehr senken. Diese Regelung gilt vorerst bis 2018 mit Option auf Verlängerung.

Zudem untersteht Erdgas der CO₂-Abgabe, welche als Lenkungsabgabe deklariert wird und ebenfalls über die Oberzolldirektion OZD erhoben wird. Eine Motion seitens Ständerat Urs Schaller im Jahr 2012, diesen Missstand zu beheben, wurde vom Bundesrat zur Annahme empfohlen. Die Umsetzung bedarf einer Änderung des im auf 1.1.2013 in Kraft getretenen CO₂-Gesetzes. Die Angelegenheit ist pendent.

8.7.1 Asymmetrien der Handhabung der verschiedenen Energieträger

Derzeit werden sowohl reine Elektrofahrzeugen BEV (Battery Electric Vehicles) als auch verschiedenste Formen von Elektrohybridfahrzeuge nicht zuletzt von einigen Amtsstellen als besonders umweltfreundlich postuliert und vielfältig gefördert, beispielsweise, indem auf Elektrofahrzeugen die Eidgenössische Fahrzeugimportsteuer von 4% erlassen wird. Somit werden die Erdgas- und Biogasfahrzeuge bei deren Import gegenüber Elektrofahrzeugen benachteiligt. Insbesondere werden die Fahrzeugkäufer, welche mit CO₂-neutralem Biogas fahren, benachteiligt.

Dabei werden einige ökologische Schwachpunkte der Elektromobilität ausgeblendet, beispielsweise die jeweilige Herkunft des Stromes, insbesondere in der Form der Importe von Kohlestrom. Bei der Verwendung von Kohlestrom zur Traktion von Elektrofahrzeugen wird dessen Import nicht mit fiskalischen Abgaben wie Treibstoffzollabgaben oder CO₂-Abgaben verteuert. Analoges gilt für die CO₂-Abgabe der Importeure nach den Kriterien des Flottenmix, auch hier sind Elektrofahrzeuge unbeachtet von deren tatsächlichen Stromquellen von sämtlichen CO₂-Abgaben befreit. Dies auch beim Import von gebundener elektrischer Energie in der Form von Traktionsbatterien. Diese weisen zudem weitere ökologische Nachteile auf, welche fiskalischen Belastungen weitgehend entgehen.

Auch Privatpersonen werden beim Fahrzeugdirektimport entsprechend amtlich "sanktioniert", falls dessen CO₂-Emission in Kombination mit einer Leergewichtsformel über dem Schwellenwert liegt. Quelle: <http://www.astra.admin.ch/dienstleistungen/00125/00416/04690/04760/index.html>

Da die Traktionsbatterien respektive Akkus sowohl bezüglich den verwendeten Materialien wie seltene Erden aus fernen Ländern (beispielsweise Lithium aus Südamerika oder West-Australien) als auch deren Lebensdauer und Entsorgung ökologisch eher fragwürdig sind, könnte eine Abgabe auf Traktionsbatterien in Analogie zur Fahrzeugbesteuerung respektive zur Zoll- und CO₂-Belastung von Treibstoffen diese ökologische Marktverzerrung zumindest teilweise kompensieren.

9 HOLZVERGASUNG

9.1 HISTORIE

In den Städten war es vor 1800 in der Nacht relativ finster. Im Haus leuchteten höchstens Kerzen, Fackeln und Öllampen. Bereits im 18. Jahrhundert konnte aus Steinkohle Leuchtgas gewonnen werden. Der französische Ingenieur Philipp Lebon stellte im Jahre 1786 die Eigenschaften des Gases der Destillation des Holzes vor und erhielt am 21. September 1799 ein Patent für eine mit Gas betriebene, von ihm benannte „Thermolampe“, die vermutlich zur Beleuchtung ebenso wie zur Raumheizung diente. Als erste grössere Anwendung installierte er in einem Pariser Hotel einen zentralen Holzofen zur Destillation von Wasserstoff, der über ein Röhrensystem in einzelne Zimmer geleitet wurde, um es dort mittels Absperrventil kontrolliert zu verbrennen (Wikipedia, 2014).

Später wurden Holzvergaser auch auf Automobilen eingesetzt. Inzwischen hat sich jedoch das Umfeld für die Holzvergasung erheblich verändert. Heute müssen auch Holzvergasungsanlagen umfangreichen gesetzlichen Bestimmungen zum Schutz von Mensch und Umwelt genügen. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang etwa die Luftreinhalteverordnung, die Maschinenrichtlinie, die Gesetze und Verordnungen zum Explosionsschutz sowie zum Gesundheitsschutz. Dies bewirkte in den letzten Jahrzehnten eine Professionalisierung der Holzvergasungsbranche, da neben dem eigentlichen Entwicklungsaufwand auch ein erheblicher Aufwand zur Evaluation und Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen betrieben werden muss.

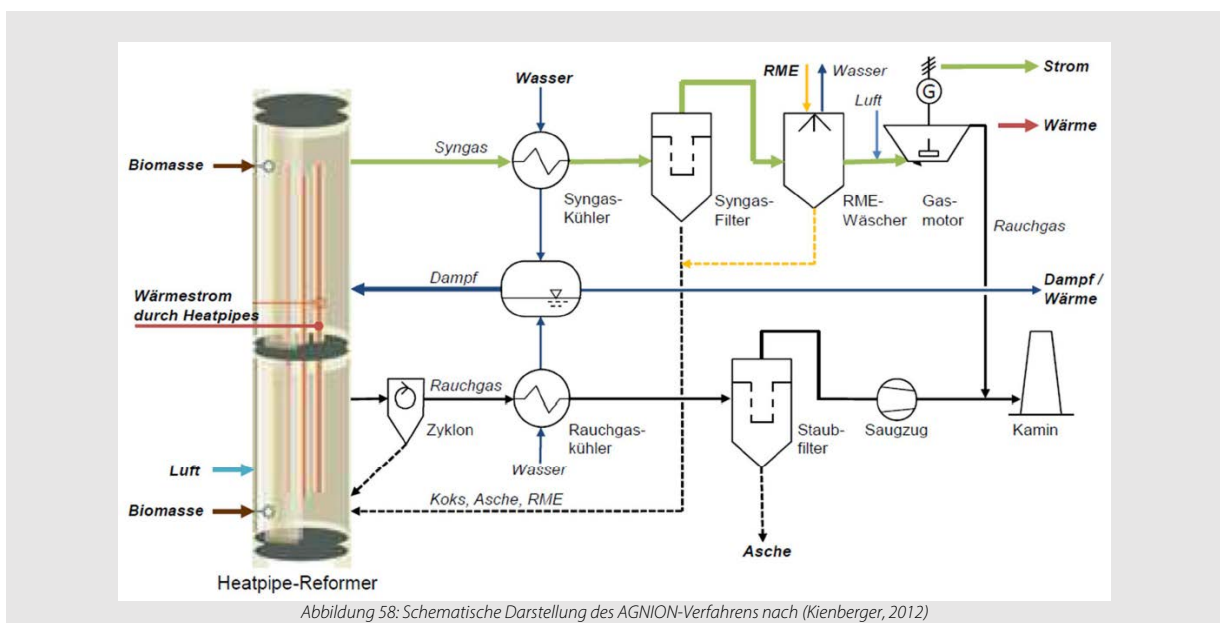
Holzvergasungsanlagen mit einer motorischen Nutzung des Holzgases müssen der Luftreinhalteverordnung genügen, was eine Abgasnachbehandlung zur Begrenzung der NO_x-Emissionen bedingt. Die Investitionskosten steigen dadurch, was bei Kleinanlagen stärker ins Gewicht fällt als bei grösseren Anlagen. Es ergibt sich daher ein Trend zu grossen Anlagen mit Kaltgasleistungen deutlich über 1 MW.

9.2 TECHNISCHE GRUNDLAGEN AUSGEWÄHLTER HOLZVERGASUNGSSYSTEME

9.2.1 AGNION

Das AGNION-Verfahren arbeitet mit einer Doppelwirbelschicht, bestehend aus einem Vergasungs- und einem Verbrennungsteil. Die beiden Wirbelschichtreaktoren sind übereinander angeordnet, wobei im unteren Bereich die Verbrennung und im oberen Bereich die Vergasung stattfindet.

Die Wärme wird mittels sogenannter "Heatpipes" aus der Verbrennungswirbelschicht in die Vergasungswirbelschicht übertragen. Diese "Heatpipes" sind Konvektionswärmetauscher, deren Rohre mit einer Flüssigkeit (Wasser) gefüllt ist. In der unteren Hälfte wird Wärme aus der Verbrennungswirbelschicht aufgenommen, wodurch das Wasser in den Rohren verdampft. In der oberen Hälfte der Rohre wird die Wärme vom Dampf an die Vergasungswirbelschicht abgegeben, die bei einer tieferen Temperatur betrieben wird. Auf diese Weise erfolgt die Wärmeübertragung von der Verbrennungs- in die Vergasungswirbelschicht.



Die Biomasse wird in die Vergasungswirbelschicht dosiert und dort mit Dampf vergast. Das heisse Holzgas (hier *Syngas*) tritt aus, wird gekühlt und in einem Filter vom Flugkoks befreit. Dieser wird in der Verbrennungswirbelschicht mit verbrannt.

Das filtrierte Holzgas wird mit RME (Rapsölmethylester, Biodiesel) gewaschen und im dargestellten Beispiel anschliessend verstromt. Alternativ kann das Holzgas statt zur Erzeugung von elektrischem Strom auch für die Methanisierung eingesetzt werden.

Das Rauchgas aus der Verbrennungswirbelschicht wird mit Wasser gekühlt, wobei das erwärmte Wasser dem Wasserverdampfer zugeführt wird. Danach wird das Rauchgas in einem Filter entstaubt und anschliessend durch einen Saugzug und ein Kamin an die Umgebung abgegeben.

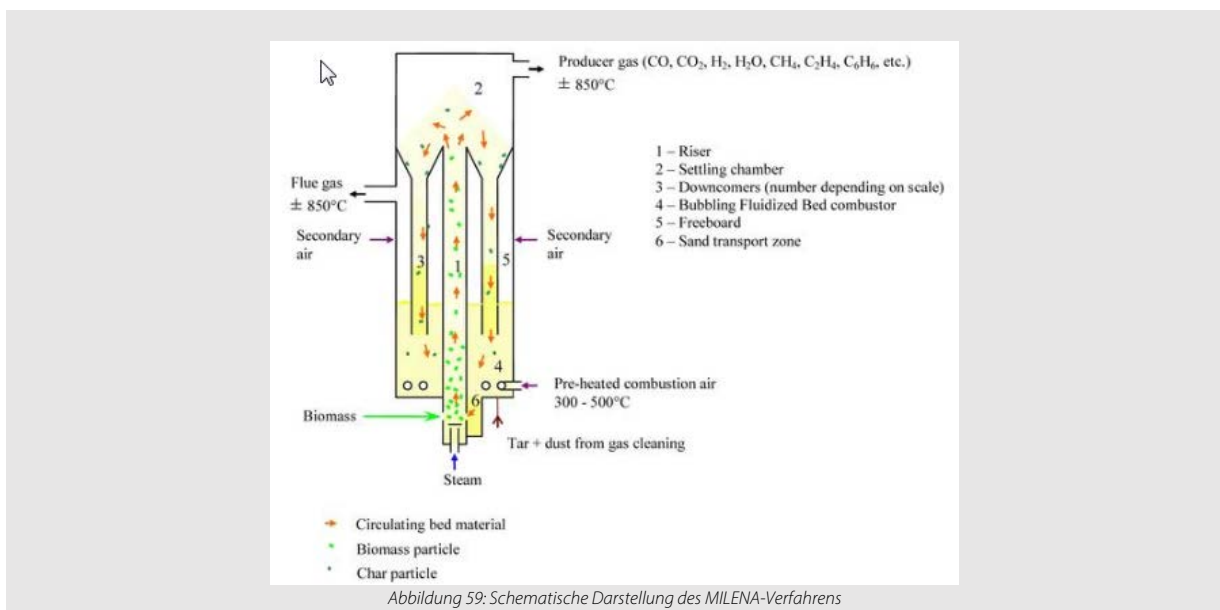
Das AGNION-Verfahren besitzt bereits eine einfache Reinigung des Holzgases. Da die Nutzung in einem BHKW bereits eine erhöhte Gasqualität erfordert, kann davon ausgegangen werden, dass das Gas auch für die Methanisierungsanlage grundsätzlich geeignet wäre.

9.2.2 MILENA

Das Energieforschungszentrum der Niederlande (ECN) entwickelte über mehr als zehn Jahre die zirkulierende Wirbelschichtvergasungstechnologie weiter (van der Meijden, Milenatechnology, 2011). Der daraus resultierende Vergaser enthält getrennte Sektionen für die Vergasung und die Verbrennung. Der Vergasungsteil besteht aus drei Teilen:

1. Vergaser-Riser
2. Absetzkammer
3. Fallrohr

Der Verbrennungsabschnitt besteht aus nur einem Teil. Die Pfeile in Abb. 62 stellen das im Vergaser zirkulierende Bettmaterial dar.



Holz wird in die aufsteigende Wirbelschicht (1), das sogenannte Steigrohr (Riser) gefördert. Von unten wird eine geringe Menge überhitzten Dampfes dosiert. Durch eine Durchführung im Steigrohr gelangt heisses Bettmaterial, üblicherweise Sand oder Olivin mit einer Temperatur von 925°C aus dem Verbrennungsteil in das Steigrohr. Dabei wird die Biomasse durch das Bettmaterial auf zirka 850°C aufgeheizt und teilweise vergast. Durch die Zunahme der Gasmenge steigt die Gasgeschwindigkeit im Steigrohr auf gegen 6 m/s, wobei sich eine turbulente Fluidisierung ergibt.

Durch die hohe Gasgeschwindigkeit wird Bettmaterial und entgaste Biomasse (Holzkohle) in die Beruhigungszone (2) mitgerissen. Dort sinkt die Aufwärtsgeschwindigkeit deutlich aufgrund des erhöhten freien Querschnittes, worauf die grösseren Partikel nach unten in die Fallrohre fallen. Das heisse Produktgas tritt oben aus dem Vergaser in Richtung Gasreinigung aus.

Die Verbrennungswirbelschicht arbeitet als blasenbildende Wirbelschicht. Von oben fällt Bettmaterial und Holzkohle in die Verbrennungswirbelschicht, und von unten werden Teere und Staub aus der Gasaufbereitung zugeführt. Dazu kommt vorgeheizte Primärluft, so dass sich eine Verbrennungstemperatur von ca. 925°C ergibt. Weiter oben wird Sekundärluft in das Freeboard dosiert, um die Kohlenmonoxid- und Teergehalte des Abgases zu reduzieren. Das Verbrennungsabgas wird gekühlt und gereinigt an die Umwelt abgegeben.

Aufgrund des vergleichsweise hohen Teergehaltes im Holzgas (30 – 40 g/Nm³) ist eine recht aufwendige Gasreinigung erforderlich, bevor das Gas für eine Methanisierung weiter verwendet werden kann. MILENA verwendet hierfür ein am ECN entwickeltes Gasreinigungsverfahren (ECN Energy research Centre of the Netherlands, 2014), welches aus folgenden Prozessschritten besteht:

- Gaskühler (von 700°C – 900°C bis ~380°C)
- Feststoffabtrennung (~380°C)
- Entfernung von groben Feststoffen mittels Zyklon und
- OLGA-Verfahren zur Abtrennung feiner Feststoffe und Aerosole
- Entfernung aller Feststoffe durch Heissgasfiltration
- OLGA-Verfahren zur Teerentfernung (Eintritt ~380°C, Austritt ~80°C) über dem Wassertaupunkt
- Wasserkondensator (~80°C bis ~30°C)
- Wasserwäscher (~30°C)

Insgesamt ist dieses Verfahren zur Holzgasreinigung deutlich aufwendiger als die erforderliche Gasaufbereitung für das gewählte FICFB-Verfahren.

Technologische Reife

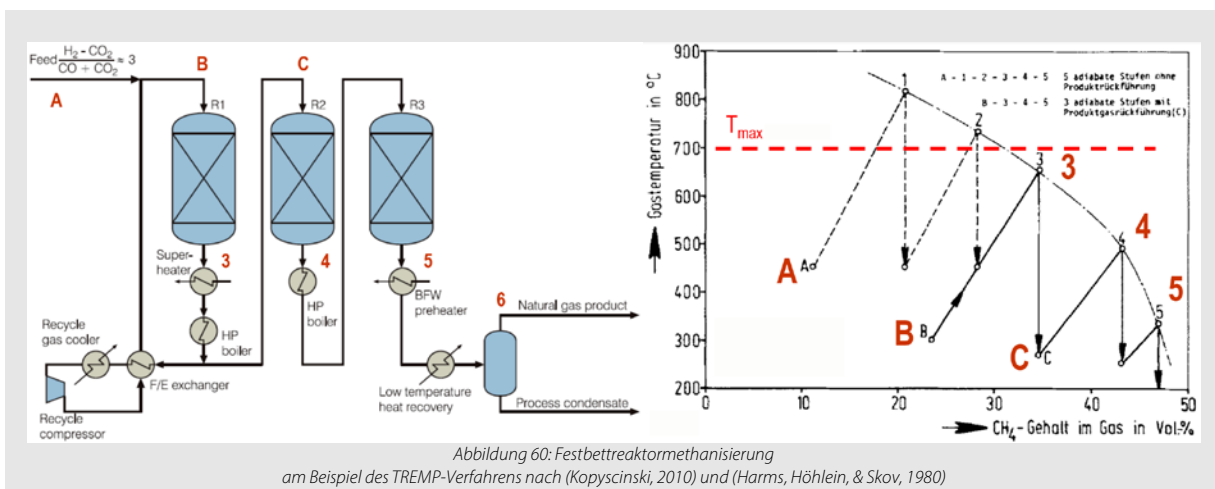
Das MILENA-Verfahren wird seit 2004 am ECN erforscht. Informationen sind überwiegend in Form von Publikationen verfügbar, die Informationsdichte ist aus Gründen der Geheimhaltung allerdings vergleichsweise gering. Es gibt eine Anlage im Labormassstab (30 kW_{th}) und eine im Pilotmassstab (800 kW_{th}) mit knapp 1'000 Betriebsstunden. Aktuell ist eine Demonstrationsanlage (12 MW_{th}) geplant. Nach aktuellem Kenntnisstand existiert bisher keine kommerzielle Anlage.

10 FESTBETT- VS WIRBELSCHICHT-METHANISIERUNG

10.1 FESTBETTMETHANISIERUNG

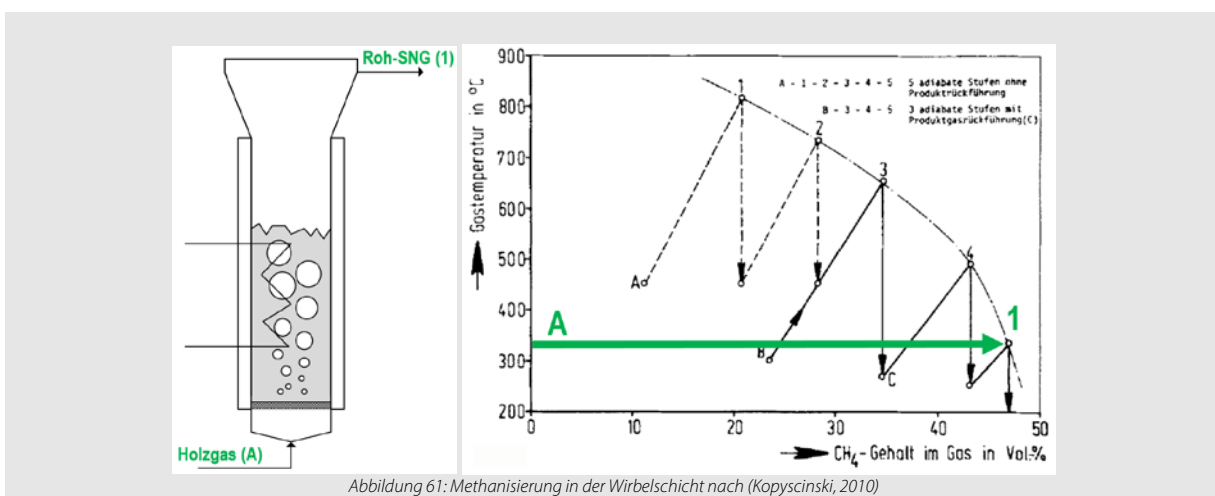
Der konventionelle Festbettreaktor besitzt keinen integrierten Wärmetauscher. Durch die Wärmeentwicklung während der Reaktion treten dadurch unweigerlich hohe Temperaturen bzw. Temperaturspitzen im Reaktor auf, die neben thermischen Spannungen im Apparat unweigerlich zu einer Schädigung des Katalysators führen. Ferner sinkt der erzielbare Methangehalt im SNG, da sich das Gleichgewicht der Methanisierungsreaktion bei hohen Temperaturen zunehmend auf die Eduktseite verschiebt.

In der Praxis versucht man diesem Phänomen entgegenzuwirken, indem man mehrere Festbettreaktoren mit z.B. einer Zwischenkühlung hintereinander schaltet. Durch die Zwischenkühlung entfernt man sich immer wieder vom Gleichgewicht und erzielt auf diese Weise schrittweise den gewünschten Umsatz (siehe Abb. 60).



10.2 WIRBELSCHICHTMETHANISIERUNG

Im Vergleich zur Festbettmethanisierung besitzt der Wirbelschichtreaktor einen integrierten Wärmetauscher, so dass die während der Reaktion gebildete Wärme kontinuierlich abgeführt werden kann. Das Wirbelbett unterstützt die Ausbildung eines gleichmässigen Temperaturprofils im Reaktor (isothermen Bedingungen). Dadurch kann die Methanisierung bei nahezu konstanter Temperatur durchgeführt werden. Da keine hohen Temperaturspitzen auftreten, wird ferner eine Deaktivierung des Katalysators verhindert. Für die Wirbelschichtmethanisierung wird somit weitaus weniger Katalysatormaterial benötigt als für die Festbettmethanisierung.



Eine tabellarische Darstellung der Vor- und Nachteile der Methanisierung im Festbett- und Wirbelschichtreaktor ist unter 5.3.2.1 ersichtlich.

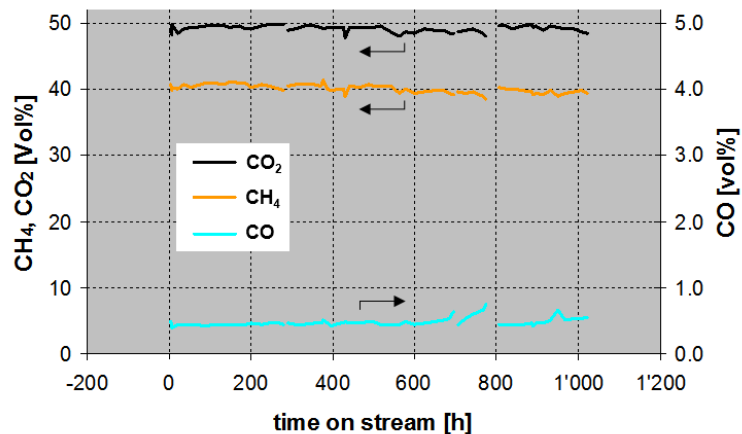
Erfolgreiche Demonstration der Hochskalierung der Wirbelschichtmethanisierung

Die Hochskalierung (Scale-up) von Wirbelschichten mit integriertem Wärmetauscher ist sehr anspruchsvoll. Hierbei gilt es, die im Labormassstab gewonnenen Kenntnisse mithilfe geeigneter Rechenmodelle auf den industriellen Massstab zu übertragen. Auf diesem Gebiet hat CTU gemeinsam mit dem PSI zahlreiche Erfahrungen gesammelt, auf deren Basis schliesslich im Rahmen des EU-DG-TREN-Projektes eine 1-MW-Bio-SNG-Pilot- und Demonstrationsanlage in Güssing (Österreich) gebaut werden konnte. Mit dem Betrieb der Anlage in diversen Kampagnen konnten die Ergebnisse der Berechnungsmethoden auf eindrucksvolle Weise praktisch verifiziert und verfeinert werden. Die Korrektheit der Auslegung ist somit sichergestellt.

Als Beispiel für das erfolgreiche Scale-up der Methanisierung im Wirbelschichtreaktor vom Labor- auf dem Pilot-/Demonstrationsmassstab sind in Abb. 64 die gemessenen Konzentrationen von CH_4 , CO_2 und H_2 im Roh-SNG dargestellt. Im Labormassstab (10 kW LHV Bio-SNG) wurde ein Langzeitversuch mit realem Holzgas über etwa 1'000 Stunden durchgeführt. Der Katalysator weist keinerlei Aktivitätsverlust auf. Auf dem Pilot- und Demonstrationsfaktor (1MW LHV Bio-SNG) konnten, nach einem anfänglichen Einschwingen durch das Anfahren der Anlage bedingt, die gleichen Konzentrationen im Roh-SNG reproduziert werden. Der CO-Gehalt im Roh-SNG liegt bei der Demonstrationsanlage sogar unterhalb 0.3 vol.-%.



Labormassstab



Pilot- und Demonstrationsanlage

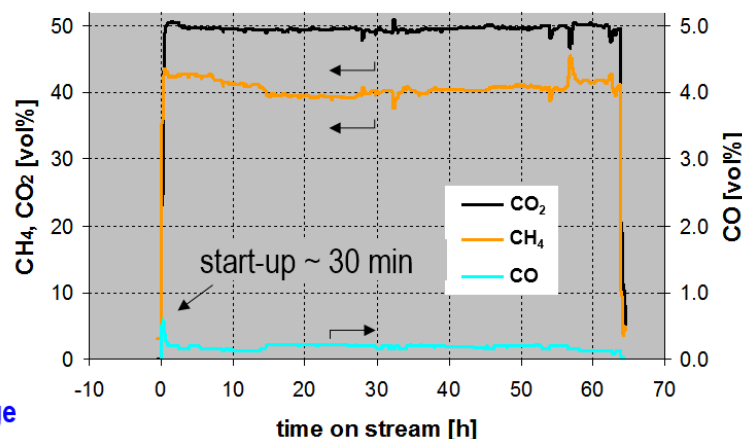


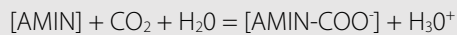
Abbildung 62: Demonstration der erfolgreichen Übertragung der Wirbelschichtmethanisierung vom Labormassstab (10 kW Bio-SNG) auf den industriellen Massstab (1-MW-Bio-SNG-Pilot- und Demonstrationsanlage)

10.3 VERFAHREN ZUR ROH-SNG-AUFBEREITUNG

10.3.1 Abtrennung von CO_2 mittels Aminwäsche

Bei der *Aminwäsche* wird das CO_2 durch eine chemische Absorption aus dem Roh-SNG entfernt. Hierbei geht das CO_2 eine chemisch-reversible Verbindung mit dem Waschmittel ein, welches aus einer wässrigen Aminlösung besteht. Das Verfahren ist Stand der Technik und weitverbreitet in der chemischen Industrie.

In einer Absorptionskolonne strömen Waschmittel und Roh-SNG im Gegenstrom über eine benetzte Packung. Beim Kontakt zwischen Gas und Waschflüssigkeit kommt es zu einer chemischen Reaktion zwischen dem im Roh-SNG enthaltenen CO₂ und dem in der Waschflüssigkeit gelösten Amin:



Die Aminwäsche erfolgt bei moderatem Druck und Temperatur. Das gereinigte Roh-SNG verlässt die Kolonne im oberen Bereich, während die Waschflüssigkeit im unteren Bereich austritt.

Die Waschflüssigkeit wird in einer zweiten Kolonne durch Erwärmen wieder regeneriert, wobei das zuvor gebundene CO₂ in reiner Form freigesetzt wird. Die für die Regeneration erforderliche Wärmemenge wird hierbei mithilfe von Prozessabwärme bereitgestellt. Das regenerierte Amin wird zur Wäsche zurückgeführt, das abgetrennte CO₂ der weiteren Nutzung zugeführt.

10.3.2 Trocknung des Roh-SNGs

Die folgenden hierfür infrage kommenden Verfahren wurden für die Studie betrachtet:

Kondensationstrocknung:

Das Verfahren beruht auf einer Abtrennung des Wassers (als Kondensat) durch Abkühlen des Gases unterhalb des erforderlichen Taupunkts. Dabei lassen sich Taupunkte unterhalb von 1°C in der Regel nur durch vorherige Kompression des Gases erreichen.

Absorptionstrocknung:

Das Verfahren beruht auf der Abtrennung des Wassers durch Waschen des Gases mit z.B. Triethylenglykol in einer Kolonne. Es handelt sich hierbei um eine physikalische Absorption des Wassers im Waschmittel. Mit der Glykolwäsche lässt sich eine nahezu vollständige Trocknung des Gases erreichen, allerdings muss das Waschmittel in einer zweiten Kolonne durch Erhitzen auf ca. 200°C und ggf. sogar unter Vakuum regeneriert werden.

Adsorptionstrocknung:

Das Verfahren beruht auf der Entfernung von Wasser aus dem Gas mithilfe eines Adsorbens. Am weitesten verbreitet sind Siliciumoxid (Kieselgel, Silicagel) und Molekularsiebe (synthetisch hergestellte Zeolithe). Voraussetzung für den Einsatz dieses Verfahrens ist, dass im Gas keine Verunreinigungen enthalten sind, die sich irreversibel auf dem Adsorber festsetzen würden. Da die Adsorber in der Regel diskontinuierlich betrieben werden, müssen für einen kontinuierlichen Betrieb der Anlage mindestens zwei Festbettadsorber eingesetzt werden, die in zyklischen Abständen beladen und wieder regeneriert werden. Die Regeneration kann durch Erwärmen des Adsorbens oder durch Druckentlastung/Evakuierung erfolgen. Teilweise ist eine Kombination beider Methoden erforderlich, um den erforderlichen Trocknungsgrad zu erreichen.

Aus technologischer Sicht sind alle drei Verfahren "Stand der Technik". Die Absorptionstrocknung ist apparativ allerdings sehr aufwendig und kostenintensiv. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten rechnet sie sich daher erst ab einer Anlagengröße von mehr als 5 MW Bio-SNG.

10.3.3 Abtrennung von Wasserstoff mittels Membrantrennverfahren

Die Triebkraft beim Membrantrennverfahren ist ein Druckgefälle über der Membran, wobei die unterschiedlichen Sorptions- und Diffusionseigenschaften der einzelnen Moleküle in der Membran zur Trennung ausgenutzt wird. Als Produktgase verlassen die Membran einerseits das gewünschte Bio-SNG (als *Retentat*) und andererseits ein wasserstoffreiches *Permeat*.

Das Grundprinzip des Membrantrennverfahrens für die Bio-SNG-Anlage ist in Abb. 63 dargestellt. Wasserstoff weist im Allgemeinen sehr gute Diffusionseigenschaften auf und lässt sich daher leicht vom Roh-SNG abtrennen. Als Begleitstoffe gelangen neben dem Wasserstoff allerdings auch Methan und ggf. noch vorhandenes Wasser zu gewissen Anteilen mit ins Permeat. Dies ist insofern unproblematisch, da das Permeat zurück zur Methanisierung geführt wird. Der Wasserstoff bewirkt dort eine zusätzliche Steigerung der Effizienz der Methanisierung. Die übrigen Begleitstoffe werden lediglich im Kreislauf geführt.

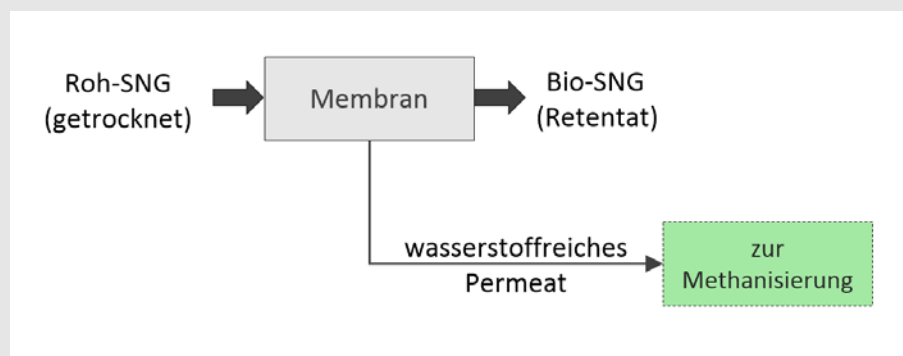
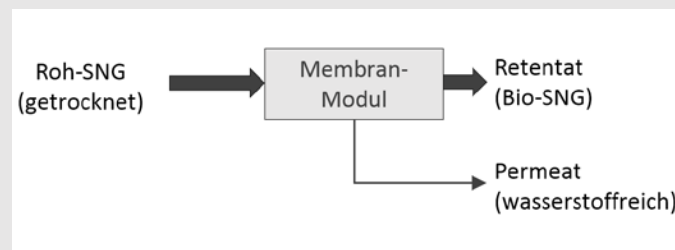


Abbildung 63: Grundprinzip der H₂-Abtrennung mittels Membrantrennverfahren

Die für die vorliegende Trennaufgabe infrage kommenden Membrane werden typischerweise als sehr kompakte Wickelmodule ausgeführt. Durch eine geschickte Verschaltung von mehreren Modulen lässt sich dabei die gewünschte Trennaufgabe erreichen. Hierbei hängen Anzahl und Verschaltung der erforderlichen Module von der Trennleistung des jeweiligen Einzelmoduls und der geforderten Reinheit im finalen Bio-SNG ab.

a) Einstufig (einfach):



b) Zweistufig (mit Zwischenverdichtung und Rückführung des Retentats):

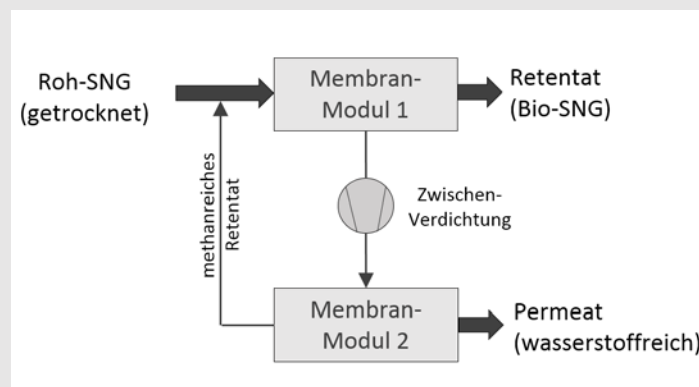


Abbildung 64: Beispiele für die Prinzipien der Verschaltung von Membranmodulen:
(a) Einstufig mit einem Modul, (b) zweistufig mit Rückführung und Zwischenverdichtung

Sehr tiefe Wasserstoffgehalte im Retentat können durch eine Erhöhung der Triebkraft erreicht werden. Hierfür infrage kommende Massnahmen sind beispielsweise:

- eine zusätzliche Verdichtung des Gases zwischen den Membranmodulen, in Kombination mit einer Rückführung eines Teilstromes aus der 2. Stufe wieder in den Eingangsstrom der 1. Stufe (Abb. 64)
- Druckabsenkung auf der Permeatseite (Unterdruck, Vakuum)
- Erhöhung der Membranoberfläche durch eine entsprechende Anzahl an Modulen

Variante (a) hat den Nachteil, dass zusätzlich hohe Betriebskosten durch die Leistung für die Zwischenverdichtung verursacht werden. Für kleine Anlagengrößen, wie sie in dieser Studie betrachtet werden, rechnet sich diese Variante nicht.

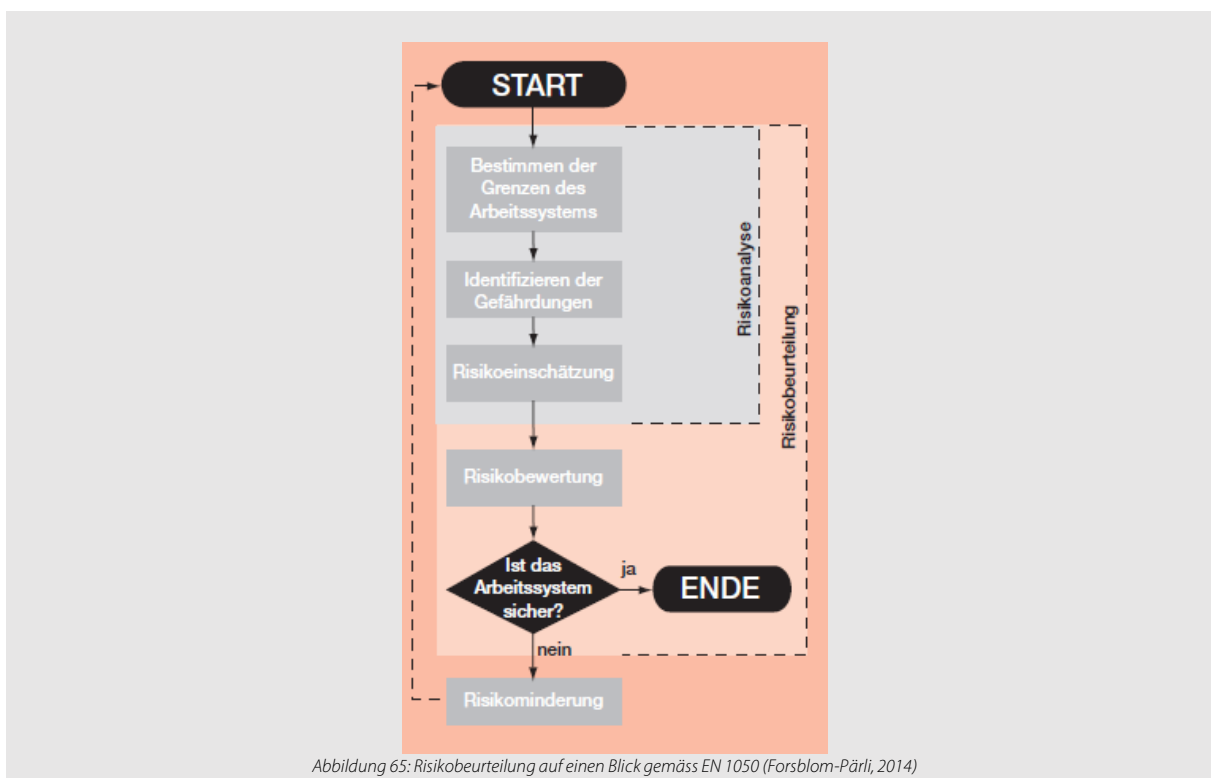
Variante (b) birgt ein erhöhtes Sicherheitsrisiko hinsichtlich des Explosionsschutzes: Durch den Unterdruck besteht die Gefahr des Ansaugens von Luft bzw. Sauerstoff aus der Umgebung. Daher eignet sich diese Variante nur bedingt für Biogas- bzw. Bio-SNG-Anlagen.

Variante (c) ermöglicht es, die gewünschte Trennaufgabe durch eine höhere Anzahl an Membranmodulen zu erreichen. Hierbei wird der Vorteil ausgenutzt, dass das Roh-SNG bereits im Vorfeld des Prozesses auf einen höheren Betriebsdruck gebracht wurde, der deutlich über dem Einspeisedruck liegt. Die zusätzlichen Membranmodule verursachen zwar geringfügig höhere Investitionskosten; dies steht jedoch in keinem Verhältnis zu den erforderlichen Investitions- und Betriebskosten, die für eine zusätzliche Kompression des Gases erforderlich wären. Ferner sind die Module sehr verschleiss- und wartungsarm, was einen zusätzlichen Vorteil gegenüber den anderen beiden Varianten bietet.

11 UMWELT- UND RISIKOANALYSE

In der Schweiz müssen technische Anlagen der "Verordnung über die Sicherheit von technischen Einrichtungen und Geräten" (STEV) genügen. Im Sinne einer Harmonisierung verweist diese auf die EU-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Diese wiederum fordert die Festlegung von Verfahren, mit denen die Erfüllung der grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für jede Art von Maschine überprüft werden kann.

Die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) gibt Empfehlungen und Leitfäden zur Risikoanalyse heraus. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben und auf die beschriebene Anlage angewandt.



Für die in der vorliegenden Studie betrachtete Anlage wird im Einklang mit der "Methode Suva zur Beurteilung von Risiken an Arbeitsplätzen und bei Arbeitsabläufen" (Forsblom-Pärli, 2014) die FMEA-Methode gewählt ("Failure Mode and Effects Analysis" bzw. „Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse“).

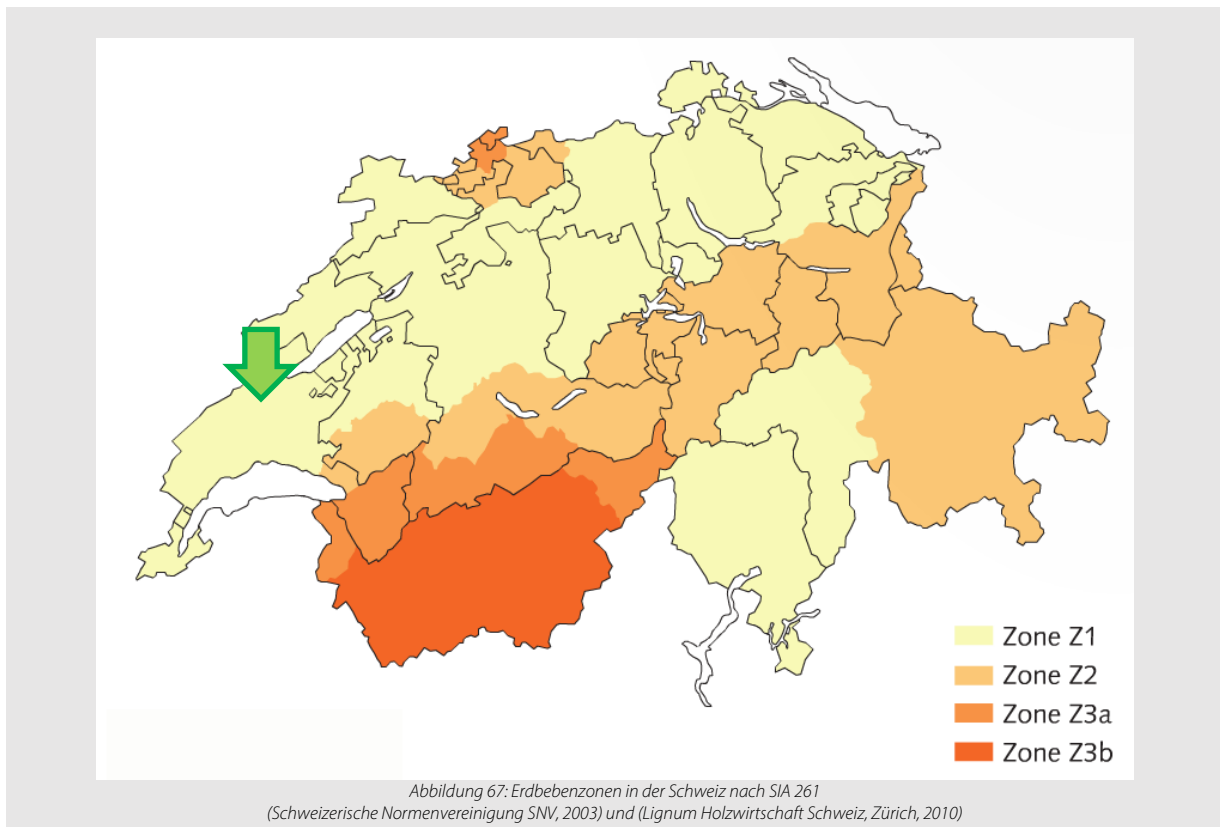
Folgende Aspekte werden nachfolgend in Abb. 66 betrachtet (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Betrachtungsgegenstand	Schutzziel
Erdbeben	Vermeidung von Schäden
Feuer	Vermeidung von Bränden (z.B. durch Brandschutzmassnahmen, Bevorzugung nicht-brennbarer Stoffe, separate Lagerung brennbarer Stoffe)
Explosion	Vermeidung von Explosionen (z.B. durch Verhinderung der Bildung zündbarer Gemische und von Zündquellen)
Wasserverschmutzung	Vermeidung von Wasserverschmutzung (Auffangbecken in der Anlage, Retentionsbecken)
Luftverschmutzung	Einhaltung der Luftreinhalteverordnung
Austritt giftiger Gase	Vermeidung des Austrittes giftiger Gase (z.B. auf Dauer technisch dichte Ausführung der Anlage, Wartung der Anlage, Instruktion des Personals, Überwachung der Atmosphäre)
Betriebspersonal	Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigung durch Einhaltung von Arbeitsschutzmassnahmen
Erhaltung von Fauna und Flora	Vermeidung von Feuer, Explosionen, unzulässiger Emissionen
Vermeidung der Beeinträchtigung von Drittpersonen	Vermeidung von Feuer, Explosionen, unzulässiger Emissionen

Abbildung 66: Aspekte der Risiken und der jeweiligen Schutzziele

11.1 ERDBEBEN

Das Erdbebenrisiko am Standort ist gering, es liegt in Zone 1 gemäss SIA 261 (ungefährer Standort grün angezeigt). Um bei einem Erdbeben Schäden zu vermeiden, wird die Anlage gemäss SIA 261 ausgelegt.



11.2 FEUER

Der Feuervermeidung in der Anlage kommt erste Priorität zu. Die Vergasungsanlage und die Methanisierungsanlage bilden zwei Brandabschnitte.

Infrage kommende Ereignisse (getrennt voneinander betrachtet):

- Holzlagerbrand: Das Holzschnitzellager ist der Bereich der Anlage mit der grössten Brandlast.
- Holztrockner: Der Holztrockner weist eine erhebliche Brandlast auf und wird gleichzeitig beheizt.
- Vergaserwirbelschichten: Die Wirbelschichten der Vergaser enthalten eine erhöhte Brandlast, sind aber auf hohe Temperatur ausgelegt und müssen deshalb nicht betrachtet werden.
- Schlauchfilteranlagen Holzgas: Die Schlauchfilteranlagen für das Holzgas werden unter Sauerstoffausschluss betrieben und können deshalb im Normalbetrieb nicht brennen, trotz erhöhter Brandlast durch Russ aus dem Betrieb und Eindüsen von Aktivkohle. Deshalb ist nur ein Störfall zu betrachten, falls Sauerstoff eindringen könnte. Weiter ist der Transport des Filterkuchens zur Verbrennungswirbelschicht zu betrachten.
- Schlauchfilteranlage im Rauchgas: Der Schlauchfilter im Rauchgas könnte Feuer fangen, falls brennbare Materialien abgeschieden werden.
- Biodiesellager: Das Lager für Biodiesel enthält eine erhöhte Brandlast.
- Katalysator: Der Katalysator für die Methanisierung kann in seiner aktiven Form bei Luftkontakt unter starker Wärmeentwicklung durch den Luftsauerstoff oxidiert und dadurch zur potenziellen Zündquelle werden. Deshalb muss vermieden werden, dass aktivierter Katalysator mit Luft in Berührung kommt.
- Thermoöl: Thermoöl wird in der Anlage in einem geschlossenen Kreis verwendet. Ein Austreten in die Umgebung ist im bestimmungsgemässen Betrieb ausgeschlossen. Abgesehen davon verursacht das Thermoöl im heissen Zustand bei Hautkontakt Verbrennungen. Bei Brand entsteht ein dichter schwarzer und beissender Rauch. Die thermische Zersetzung kann toxische und ätzende Gase und Dämpfe freisetzen. Die Selbstentzündungstemperatur liegt bei 374°C. Die Brandlast ist zu beachten.

Massnahmen:

Allgemein werden Hydranten um die Anlage herum in Abständen gemäss Vorschrift der Gebäudeversicherung verteilt.

- a) Holzlager: das Holzlager wird mit einem Sprinkler versehen sowie Rauchmeldern an den Stellen, wo sich der Rauch am ehesten hinbewegt (im Detail erst beim Detailengineering festlegbar).
- b) Holztrockner: Die Temperatur der Luft wird geregelt und bei zu hoher Temperatur wird ein Alarm ausgelöst. Der Alarmwert liegt deutlich unter der Selbstentzündungstemperatur von Holz. Bei Alarm wird die Luftzufuhr sofort unterbrochen, so dass der Sauerstoff abgesperrt wird.
- c) Schlauchfilter Holzgas: Der Sauerstoffgehalt im Holzgas wird gemessen und bei erhöhtem Wert (der weit unter der Zündgrenze liegt) alarmiert und das System abgefahren. Der abgezogene Filterkuchen wird mittels Förderer zur Verbrennungswirbelschicht geführt. Dieses System wird mittels Stickstoff oder CO₂ inertisiert.
- d) Schlauchfilter Rauchgas: Der Sauerstoffgehalt und die Verbrennungstemperatur werden ständig überwacht, so dass keine brennbaren Stäube in den Filter gelangen. Bei zu tiefem Sauerstoffgehalt oder tiefer Verbrennungstemperatur wird die Anlage abgefahren.
- e) Das Lager für Biodiesel ist genügend weit von der Anlage entfernt und vorschriftsgemäss gelagert. Darum ist nicht mit Entzündung zu rechnen.
- f) Katalysator: In das Gelände der Anlage gelangender Katalysator ist nicht aktiviert. In der Anlage aktivierter Katalysator wird unter Inertgas transportiert. Bevor der Katalysator für Entsorgungs- bzw. Recyclingzwecke aus der Anlage ausgetragen wird, wird er deaktiviert. Somit besteht keine Gefahr eines unkontrollierten Temperaturanstiegs aufgrund einer Oxidation durch Luftsauerstoff. Austretendes Nickeloxid ist per se nicht toxisch, führt aber zu Kontamination der Umgebung und könnte indirekt Wasser verschmutzen. Deshalb werden alle Manipulationen mit dem Katalysator so weit wie möglich in geschlossenen Räumen durchgeführt.
- g) Thermoöl: Das Thermoöl wird in einem inertisierten Kreislauf unter geringem Druck geführt. Das System muss dauerhaft technisch dicht ausgeführt werden.

11.3 EXPLOSION

Die Aspekte des Explosionsschutzes werden bei der Risikoanalyse betrachtet und abgedeckt. Die darin geforderte Gefahrenermittlung zeigt, dass Explosionen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden können und versucht deren Auswirkungen zu quantifizieren. Die Betrachtung ist erforderlich, da auf der Anlage Gase wie Wasserstoff, Methan und Kohlenmonoxid vorkommen, die bei Kontakt mit Luft ein zündfähiges Gemisch bilden können. Wird zudem eine wirksame Zündquelle hinzugefügt, so kann es zu einer unbeabsichtigten Zündung kommen, die Sach- und Personenschäden verursachen kann.

Die Grundvoraussetzungen für das Entstehen einer Explosion sind wie folgt (Abb. 68):

1. Brennbare Substanz (Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan, Holzstaub)
2. Oxidationsmittel (Luftsauerstoff)
3. Wirksame Zündquelle (offene Flamme, elektrostatische Entladung, heisse Oberflächen)

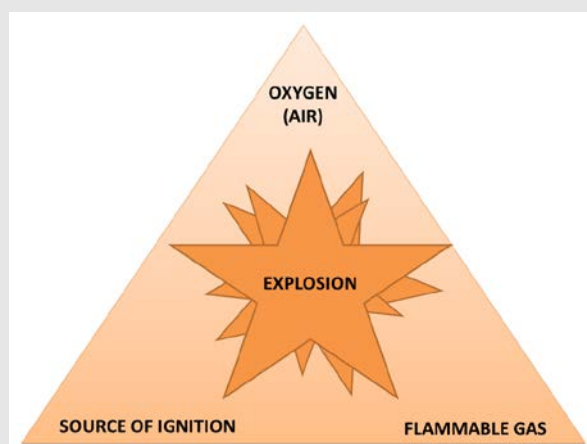
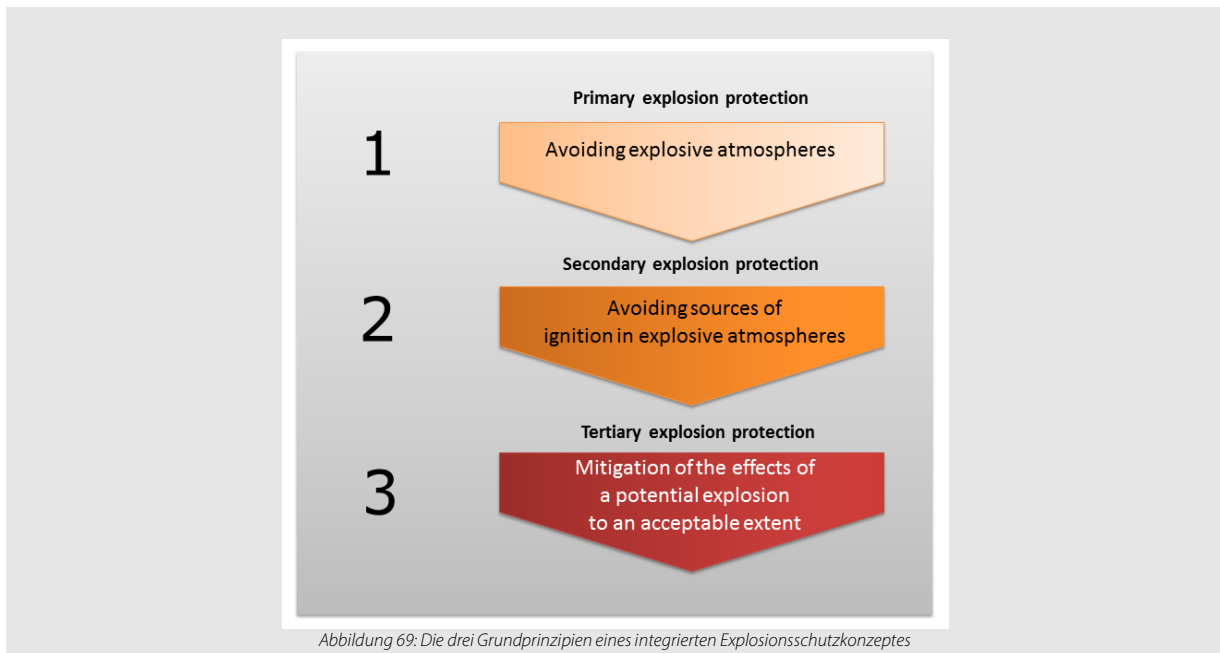


Abbildung 68: Die drei Grundvoraussetzungen für eine Explosion

Die Basis zur Vermeidung von Explosionen innerhalb der Anlage bildet ein integriertes Explosionsschutzkonzept. Dieses besteht aus drei wesentlichen Grundprinzipien, die in Abb. 69 grafisch verdeutlicht sind.



Im Wesentlichen geht es bei den drei Grundprinzipien darum, Folgendes zu vermeiden:

1) Primärer Explosionsschutz – Vermeidung der Bildung zündbarer Gemische:

- Holzgas und Bio-SNG sollen nicht in die Atmosphäre austreten. Dies wird durch eine dauerhaft technisch dichte Ausführung der Anlage erreicht. Ein Austritt von Gasen wäre innerhalb von Anlagenteilen möglich, die unter atmosphärischem oder erhöhtem Druck betrieben werden. Voraussetzung für einen solchen Fall wäre allerdings eine Leckage, eine Fehlmanipulation oder Sabotage.
- Umgebungsluft soll nicht in die Anlage eintreten. Dies wird durch die dauerhaft technisch dichte Ausführung der Anlage erreicht. Ein Lufteintritt wäre in den Anlagenteilen möglich, die im Unterdruck betrieben werden. Voraussetzung für den unkontrollierten Eintritt von Luft ist eine Leckage, eine Fehlmanipulation oder Sabotage. Unterdrücke kommen im Normalbetrieb nicht vor. Sie können sich aber ergeben, wenn Anlagenteile nach der Ausserbetriebnahme abgeschlossen und abgekühlt werden.

2) Sekundärer Explosionsschutz – Vermeidung von Zündquellen:

- Wirksame Zündquelle können z.B. falsch ausgelegte elektrische Anlagenteile sein. Aber auch heisse Anlagenteile, elektrostatische Entladungen, Blitzeinschlag, Zigaretten, Schweißgeräte, etc. kommen als Zündquellen infrage. Die technische Ausrüstung der Anlage wird daher gemäss den geltenden Vorschriften (u.a. Ex-geschützt gemäss ATEX) ausgeführt. Für das Verhalten der Personen auf der Anlage werden darüber hinaus Regeln definiert und mit Hinweisschildern stets in Erinnerung gerufen.

3) Tertiärer Explosionsschutz – Reduzierung der Auswirkung einer möglichen Explosion auf ein Minimum:

- Kann durch die beiden vorgenannten Massnahmen das Risiko für das Auftreten einer möglichen Explosion nicht auf ein akzeptables Mass reduziert werden, müssen zusätzliche Massnahmen ergriffen werden, um die Auswirkungen einer Explosion auf ein Minimum zu reduzieren. Derartige Gefahren werden mithilfe einer Risikoanalyse identifiziert und die erforderlichen Massnahmen definiert. Da wo technisch sinnvoll, sollen z.B. apparative Einrichtungen wie Druckentlastungen das Bersten von Apparaten und so die Freisetzung zündfähiger Gemische verhindern. Zusätzliche organisatorische Massnahmen sind z.B. Zutrittsbeschränkungen zu besonders gefährdeten Bereichen sowie die Schulung des Personals für solche Bereiche.

Zur Umsetzung der Massnahmen wird ein Explosionsschutzkonzept erarbeitet, das im Explosionsschutzdokument festgehalten wird.

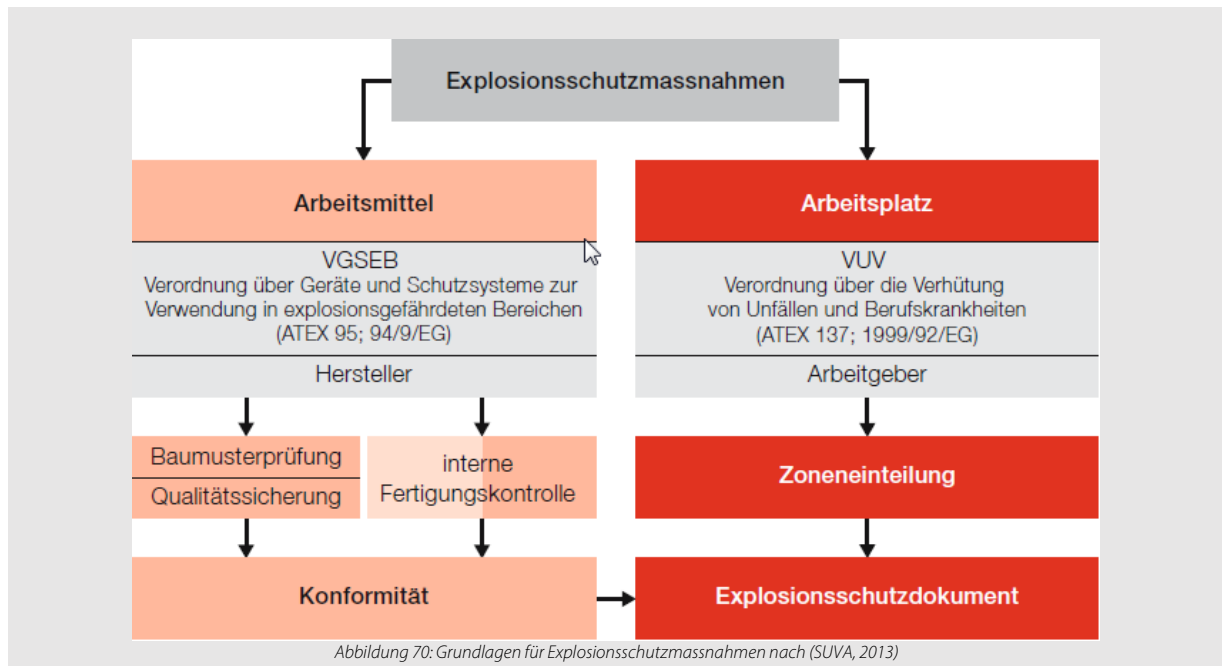


Abb. 70 verdeutlicht das Verhältnis der beiden relevanten Richtlinien ATEX 95 für die Arbeitsmittel und ATEX 137 für den Arbeitsplatz.

Zu den vorbeugenden Massnahmen gehört die Installation elektrischer und mechanischer Einrichtungen (Instrumente, Antriebe, usw.) in explosionsgeschützter Ausführung. Diese sind aufgrund des grossen Bedarfs in der chemischen und erdölverarbeitenden Industrie heute Standard.

In der Anlage werden explosive Gase produziert, und es werden explosive Gase (Wasserstoff) in kleinen Mengen gelagert.

Da die Vergasungsanlage bei geringem Unterdruck betrieben wird, ist das Volumen an explosiblem Gas gering und das Austrittsrisiko von Gas ebenfalls.

Das Holzgas setzt sich vor allem aus Kohlendioxid, Wasserdampf, Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan zusammen.

Während der Katalyse wird aus dem Kohlenmonoxid und dem Wasserstoff Methan erzeugt, so dass sich keine wesentliche Änderung der Explosivität des Gases ergibt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Katalyse unter Überdruck betrieben wird.

Es sind deshalb folgende Massnahmen zu ergreifen:

1. Die Anlage wird "auf Dauer technisch dicht" ausgeführt.
2. Wo es nicht möglich ist, eine Anlage "auf Dauer technisch dicht" auszuführen, werden Bereiche definiert (sog. *Explosionsschutzonen*).
3. Eine Explosionsschutzzone wird nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens zündbarer Atmosphären eingeteilt (Zone 2, 1 oder 0).
4. Innerhalb der Explosionsschutzzone sind alle Einrichtungen zonengemäss auszuführen.

Es ist anzumerken, dass sich in der Anlage selbst keine explosiblen Gemische befinden, da der Verbrennungsteil und der Vergasungsteil (Vergaser) hydraulisch getrennt sind. In der Methanisierung wird Luftsauerstoff sehr kontrolliert für die Entschwefelung eingesetzt.

Dies führt zu folgenden Umsetzungsmassnahmen für die betrachtete Anlage:

- a) Die Leitungen werden so weit wie möglich verschweisst, damit sie dauerhaft technisch dicht sind.
- b) Um die Zuführung des Holzes zur Vergasung wird eine Ex-Zone definiert (Zone 2).
- c) Um alle Flanschverbindungen, welche während des Betriebs bedient werden müssen, wird eine Ex-Zone definiert (Zone 2).
- d) Das Gebäude mit Vergasung und katalytischer Umwandlung wird natürlich belüftet, damit sich keine Gasansammlungen ergeben können.
- e) In der Anlage werden an strategisch richtigen Orten Gasdetektoren angebracht, welche bei erhöhter Gaskonzentration zur Abschaltung führen.
- f) Die Anlage darf nur von geschultem Personal betrieben werden.
- g) Für die Anlagebedienung müssen genaue Anleitungen beachtet werden, welche den Explosionsschutz berücksichtigen. Für Arbeiten im Zonenbereich sind nur zugelassene Werkzeuge zu benutzen.
- h) Um das Wasserstofflager wird eine Ex-Zone eingerichtet (Zone 2).
- i) Es gilt Rauchverbot auf dem ganzen Gebiet der Anlage.
- j) Obwohl nur ein kleiner Teil der Anlage als Zone 2 definiert ist, werden nur Instrumente und andere elektrische Geräte mit erhöhter Sicherheit verwendet. In der Zone 2 gelten die dafür geltenden Vorschriften (Gerätekategorie 3G, 2G oder 1G, wobei "G" für Gas steht). Die Temperaturklasse wird durch die Präsenz von Wasserstoff mit einer Zündtemperatur von 560°C definiert. Für Gase und Dämpfe mit Zündtemperaturen über 450°C gilt Temperaturklasse T1. Es gelten die Explosionsgruppe IIC (Wasserstoff). Die Explosionsgruppe ist ein Mass für die Zünddurchschlagfähigkeit von Gasen. Hier ist beim leichten Wasserstoff besondere Vorsicht geboten.

11.4 WASSERVERSCHMUTZUNG

Es ist zu vermeiden, dass bei einem Störfall das Grundwasser oder Oberflächenwasser verschmutzt wird.

Folgende Massnahmen werden gemäss Stand der Technik getroffen:

- a) Der gesamte Verkehrsweg ist asphaltiert und das Meteorwasser oder andere Flüssigkeiten werden gesammelt und dem Retentionsbecken zugeführt.
- b) Die eigentliche Produktionsanlage steht in einem Betonbecken, welches so gross dimensioniert ist, dass auslaufende Flüssigkeiten sicher aufgefangen werden können.
- c) Das Retentionsbecken ist so dimensioniert, dass die erwartete Wassermenge bei einem Löscheinsatz aufgefangen werden kann.

11.5 LUFTVERSCHMUTZUNG

Für eine Anlage dieser Art gilt die LRV bzgl. üblichen Emissionen.

- a) Normalbetrieb:

Im Normalbetrieb wird das Rauchgas der Verbrennungswirbelschicht der Vergasung ausgestossen. Dieses erfüllt die Anforderungen an Rauchgase gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV). Grundsätzlich werden bereits in der Verbrennungswirbelschicht der Vergasung sehr tiefe CO- und VOC-Gehalte im Rauchgas erreicht. Zusätzlich werden die Staub- und Russanteile im Rauchgas mithilfe einer Filtration abgetrennt. Der Anteil an Stickoxiden (NO_x) im Rauchgas wird mithilfe einer DENOX-Anlage auf das erforderliche Minimum reduziert.

- b) Sonderbetrieb:

In den Perioden, während derer das Holzgas nicht verwertet werden kann, wird das Holzgas aus der Anlage über eine Fackel entsorgt. Damit kann kurzfristig die Emission an Stickoxiden (NO_x) ansteigen, während Staub, CO und VOC die LRV immer sicher einhalten werden.

Falls das produzierte Gas aus irgendwelchen Gründen nicht eingespeist werden kann, wird es ebenfalls über die Fackel entsorgt mit dem gleichen Ergebnis wie beim Betrieb der Fackel mit Holzgas. Es wird angenommen, dass Betrieb über die Fackel im ersten Betriebsjahr mit Teillast zirka 1000 h betragen wird, in den späteren Jahren weniger als 500 h.

11.6 AUSTRITT VON GIFTIGEM GAS

Das Holzgas enthält – wie oben beschrieben – einen gewichtigen Anteil an Kohlenmonoxid (CO), das bekanntlich giftig ist und einen MAK-Wert von 30 ppm aufweist.

Sobald das CO in der Atmosphäre ist, wird es langsam zu CO₂ oxidiert und wird dadurch ungiftig. So ist vor allem darauf zu achten, dass das Bedienpersonal nicht dem CO ausgesetzt ist.

Da die Anlage aus Explosionsschutzgründen 'dauerhaft technisch dicht' ausgeführt wird, ist auch das Austreten von giftigem Gas sehr unwahrscheinlich, aber trotzdem zu beachten.

Darum werden an strategisch wichtigen Orten Gasschnüffler für CO installiert, welche bei Vorhandensein von CO optisch und akustisch warnen. Die Gaswarngeräte warnen in erster Linie vor CO (Kohlenmonoxid). Dieses ist in Luft in einem Volumenanteil zwischen 10,9% (untere Zündgrenze) und 76% (obere Zündgrenze) zündbar. Hingegen liegt die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) bei 30 ppm (Grenzwerte am Arbeitsplatz 2014, 2013), also sehr deutlich tiefer.

Das produzierte Methan ist ungiftig. Nach der katalytischen Umsetzung des Holzgases ist kein CO mehr im Gas vorhanden. Daher werden in den Anlageteilen, die auf den Methanisierungsreaktor folgen, anstelle der CO-Sensoren UEG-Sensoren (UEG = untere Explosionsgrenze) installiert. Diese melden alle brennbaren Gase und Dämpfe in Konzentrationen, die weit unter der unteren Explosionsgrenze liegen.

Als persönliche Schutzausrüstung sollen mobile Gaswarngeräte beschafft werden, die vom Personal an der Kleidung getragen werden und je nach Ausführung vor toxischen Gasen, zündbaren Gasgemischen und/oder Sauerstoffmangel warnen. Letzteres ist allenfalls in Zusammenhang mit dem Schnitzelsilo von Interesse.

Mitarbeiter, die alleine auf der Anlage anwesend sind, tragen einen sogenannten Totmannmelder mit sich, der bei Ansprechen einen Fernalarm auslöst. Diese Melder reagieren auf horizontale Lage oder Ausbleiben einer Bewegung innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls. Spricht der Sensor an, so erfolgt eine Fernalarmierung, um Hilfskräfte herbeizuholen.

Um das Produktgas riechbar zu machen, wird vor Einspeisung ein Geruchsstoff gemäss SVGW-Richtlinie zugegeben, wie dies auch bei fossilem Erdgas gemacht wird.

11.7 VERLETZUNG DES BETRIEBSPERSONALS

Verletzungen des Betriebspersonals müssen vermieden werden. Dazu gehören die richtige Ausbildung des Personals sowie die zugehörigen Instruktionen für Interventionen an der Anlage.

Grundvoraussetzung ist das Einhalten der baulichen Richtlinien für Industrieanlagen wie Fluchtwegbreite, Fluchtwegdistanzen, Treppensteilheit, Geländerhöhe, etc. Diese Regeln – gegeben in der Schweiz durch die Suva – werden befolgt.

In der Betriebswarte ist auch ein Sanitätsposten eingerichtet, damit Erste Hilfe vor Ort geleistet werden kann.

Es wird möglich sein, die Anlage mit einer Person zu betreiben, wie dies in anderen Anlagen auch gemacht wird. Jede Einzelperson in der Anlage ist mit einem Totmannsender auszurüsten, welcher bei Nichtbedienung einen Alarm auslöst.

Zusätzlich wird der Zugänglichkeit aller Apparate und zu bedienenden Elemente grosse Beachtung geschenkt, damit möglichst ohne zusätzliche Sicherung gearbeitet werden kann.

Während der Montage der Anlage werden spezielle Richtlinien verwendet, da zu dieser Zeit viele temporäre Einrichtungen erstellt werden müssen, um die Sicherheit des Montagepersonals zu gewährleisten.

11.8 AUSWIRKUNGEN AUF FAUNA UND FLORA

Ein negativer Einfluss auf Fauna und Flora würde vor allem durch eine Wasserverschmutzung und in weit geringerem Mass durch Luftverschmutzung bewirkt. Wie oben beschrieben, werden Massnahmen getroffen, um solche Verunreinigungen im Normalfall wie im Störfall zu verhindern.

11.9 AUSWIRKUNGEN AUF DIE MENSCHEN IN DER UMGEBUNG

Die Anlage ist konkret in einer relativ grossen Distanz zu Wohn- und Arbeitsgebieten geplant. Sie könnte aber auch in einem Industriegebiet oder Gewerbegebiet errichtet werden, da sie kein wesentliches Gefährdungspotenzial darstellt (siehe hierzu Abschnitt 2.4 sowie 11).

Es ist davon auszugehen, dass schwache Gerüche von der Anlage ausgehen, vor allem vom Holzlager und der Holz Trocknung. Durch das Shreddern des Holzes wird Harz freigelegt und eine leichte Kompostierung mit der entsprechenden Geruchsemission ist zu erwarten, was zum bekannten 'Holzgeruch' führt, wie er auch von Sägereien oder Holzschnitzelheizungen ausgeht. Die Holz Trocknung führt zu ähnlichem schwachem Geruch.

Im Falle eines Störfalls mit der Odorierungsreinrichtung könnten Mercaptane austreten, die kurzzeitig zu einem unangenehmen starken Geruch führen.

In der Anlage werden Geräusche entstehen durch die Antriebe und die Fahrzeuge, welche Material an- und abtransportieren resp. im Areal zirkulieren. Die Fahrzeugbewegungen werden auf Werkstage (tagsüber) beschränkt, bei verlängerten Wochenenden muss ein gewisser interner Verkehr geduldet werden.

Die Lärmemission der Anlage wird an der Arealgrenze 55dBa nicht übersteigen.

11.10 UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG UND SICHERHEITSVORSTUDIE

Wie bereits in Abschnitt 2.4 erwähnt, bedarf die Anlage keiner Umweltverträglichkeitsprüfung nach UVP und keiner Risikobeurteilung nach StFV.

In der UVPV sind Anlagen, die eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erfordern, abschliessend aufgelistet (siehe Tabelle unten). Dabei bedürfen Anlagen mit erneuerbaren Energieträgern zur thermischen Energieerzeugung mit einer Feuerungswärmeleistung oder einer pyrolytischen Leistung von weniger als 20 MWth keiner UVP.

Umweltverträglichkeitsprüfung. V		814.011
Nr.	Anlagentyp ^{a)}	Massgebliches Verfahren
21.2	*) Anlagen zur thermischen Energieerzeugung mit einer Feuerungswärmeleistung oder einer pyrolytischen Leistung von – mehr als 100 MWth bei fossilen Energieträgern – mehr als 20 MWth bei erneuerbaren Energieträgern – mehr als 20 MWth bei kombinierten Energieträgern (fossil und erneuerbar)	Durch das kantonale Recht zu bestimmen

Abbildung 71: Auszug aus UVPV Anhang 2/21.2 'UVP-Anlagen und massgebliche Verfahren'

Gemäss StFV Anhang 1, Ziffer 3 (siehe Tabelle unten) sind Mengenschwellen definiert, deren Überschreitung eine Risikoanalyse gemäss StFV erfordern. Dabei wird nach Giftigkeit, Brand- und Explosionseigenschaften sowie Ökotoxizität unterschieden. Entsprechende Kriterien sind unter StFV Anhang 1, Ziffer 4 definiert.

3 Stoffe und Zubereitungen mit festgelegten Mengenschwellen (Ausnahmeliste)

Nr.	Stoffbezeichnung	CAS Nr. ¹	MS (kg) ²
1	Acetylen	74-86-2	5 000
2	4-Aminodiphenyl und seine Salze		1
3	Arsen(III)oxid, Arsen(III)säure und ihre Salze		100
4	Arsen(V)oxid, Arsen(V)säure und/oder ihre Salze		1 000
5	Benzidin und seine Salze		1
6	Benzin (Normalbenzin, Superbenzin)		200 000
7	Bis(chlormethyl)ether	542-88-1	1
8	Chlor	7782-50-5	200
9	Chlormethyl-methylether	107-30-2	1
10	Dimethylcarbamoylchlorid	79-44-7	1
11	Dimethylnitrosamin	62-75-9	1
12	Heizöl, Dieselöl		500 000
13	Hexamethylphosphortriamid	680-31-9	1
14	Kerosin		200 000
15	4,4"-Methylen-bis (2-chloranilin) und seine Salze, pulverförmig		10
16	2-Naphthylamin und seine Salze		1
17	Atemgängige pulverförmige Nickelverbindungen (Nickelmonoxid, Nickeldioxyde, Nickelsulfide, Trinickelsulfid, Dinickeltrioxyd)		1 000
18	4-Nitrodiphenyl	92-93-3	1
19	Methylisocyanat	624-83-9	150
20	Polychlordibenzofurane, in TCDD-Äquivalenten berechnet		1
21	Polychlordibenzodioxine (einschliesslich TCDD), in TCDD-Äquivalenten berechnet		1
22	1,3-Propansultone	1120-71-4	1
23	Schwefeldichlorid	10545-99-0	1 000
24	Wasserstoff	1333-74-0	5 000
1	Identifikationsnummer eines Stoffes im Chemical Abstract System		
2	MS(kg) = Mengenschwelle in kg		

Tabelle 28: StFV Anhang 1, Ziffer 3

11.11 BRANDSCHUTZ

Der Brandschutz wird im Rahmen der Risikoanalyse behandelt. Brennbares Material ist in Form von Holz in erheblichen Mengen auf der Anlage vorhanden. Daneben wird Wasserstoff in Gasflaschenbündeln und Waschmittel für die Rohgaswäsche gelagert. Gemäss Richtlinien über die Zusammenlagerung von Chemikalien werden brennbare und brandfördernde Substanzen (höchstens in sehr geringen Mengen vorhanden) getrennt gelagert.

Das als Zwischenprodukt erzeugte Holzgas wird über mehrere Schritte zu Bio-SNG umgewandelt und in das Erdgasnetz eingespeist. Weder das Holzgas noch das Bio-SNG werden gespeichert. Daher ist keines der Gase auf der Anlage in grossen Mengen vorhanden.

Die Brandschutzvorschriften bestehen aus der Brandschutznorm und den Brandschutzrichtlinien. Die Norm enthält Grundsätze für den baulichen, technischen und betrieblichen Brandschutz. Die Richtlinien regeln einzelne Massnahmen im Rahmen der Brandschutznorm.

Die zu berücksichtigenden Brandschutzrichtlinien regeln unter anderem folgende Punkte:

- Brandabschnitte
- Flucht- und Rettungswege
- Brandmeldeanlagen
- Löscheinrichtungen
- Sprinkleranlagen

Diese Aufzählung ist nicht abschliessend.

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Systematischer Ansatz der Erarbeitung des Verfahrenskonzeptes für die Studie	11
Abbildung 2: Lokalisierung des Flurstücks 247 und Zonen.....	14
Abbildung 3: Flurstück 247, Massstab 1:2000.....	15
Abbildung 4: Einmündung des Zufahrtsweges auf die Kantonsstrasse.....	16
Abbildung 5: Zufahrtsweg zur Kläranlage.....	16
Abbildung 6: Verlauf der regionalen Gasleitung auf dem Gemeindegebiet.....	19
Abbildung 7: Kartographie des Grundwasserschutzes	20
Abbildung 8: Karte der Überflutungsgefahren	21
Abbildung 9: Layout Gesamtanlage	23
Abbildung 10: Projekt und Sachzwänge bezüglich der Ansiedlung	24
Abbildung 11: Angebot FORETNERGIE SA, Montricher, 10. Oktober 2013.	32
Abbildung 12: Angebot Schmuki SA, Lucens, 6. Januar 2014.....	33
Abbildung 13: Die Verfahren der SWISS-SNG-Technologie.....	36
Abbildung 14: Abhängigkeit des Heizwertes vom Wassergehalt des Holzes.....	39
Abbildung 15: Einfluss des Wassergehaltes des Holzes auf Zusammensetzung des Holzgases	41
Abbildung 16: Prozessschritte der Holzannahme und -trocknung	41
Abbildung 17: Lokalisierung der Holzannahme (1), -zwischenlagerung (2) und Aufgabe.....	42
Abbildung 18: Lokalisierung der Holztrocknung (1) und Zuführung der getrockneten Holzschnitzel	43
Abbildung 19: Ablauf des Vergasungsprozesses im Gegenstromvergaser (links) und Gleichstromvergaser (rechts).....	45
Abbildung 20: Methodik zur Evaluierung eines geeigneten Holzvergasungssystems.....	48
Abbildung 21: Lokalisierung der Holzvergasung im Layout der Bio-SNG-Anlage	52
Abbildung 22: Verfahrensabschnitte des gewählten FICFB-Vergasers.....	52
Abbildung 23: Prinzipieller Aufbau des FICFB-Vergasers.....	52
Abbildung 24: Lokalisierung der Holzgas-Grobreinigung im Layout der Bio-SNG-Anlage	53
Abbildung 25: Hauptprozessschritte der Umwandlung vom Holzgas zum Bio-SNG	54
Abbildung 26: Lokalisierung der Holzgaskonditionierung im Layout der Bio-SNG-Anlage	54
Abbildung 27: Hauptprozessschritte der Holzgaskonditionierung.....	55
Abbildung 28: Lokalisierung der Methanisierung im Layout der Bio-SNG-Anlage.....	56
Abbildung 29: Lokalisierung der Aktivierungshalle im Layout der Bio-SNG-Anlage	58
Abbildung 30: Lokalisierung der Roh-SNG-Aufbereitung im Layout der Bio-SNG-Anlage	59
Abbildung 31: Prozessschritte der Roh-SNG-Aufbereitung.....	59
Abbildung 32: Lokalisierung der Hilfsysteme im Layout der Bio-SNG-Anlage	60
Abbildung 33: Lokalisierung der Lagerflächen für Chemikalien, Betriebsgase und Abfälle im Layout der Bio-SNG-Anlage	61
Abbildung 34: Verfahrensflussbild der Anlage inkl. wichtiger Haupt- und Nebestoffströme.....	63
Abbildung 35: Gesamtprozess der Bio-SNG-Anlage im Überblick inkl. Stoffstromnummern	64
Abbildung 36: Hierarchischer Aufbau der Automatisierung	69
Abbildung 37: Draufsicht.....	70
Abbildung 38: Frontansicht	70
Abbildung 39: Rückansicht.....	70
Abbildung 40: Sensitivitäten.....	78
Abbildung 41: Nutzung von Biogas als Heiz- und Treibstoff	82
Abbildung 42: Einspeisung von Biogas in der Schweiz.....	83
Abbildung 43: Ökobilanz Biotreibstoffe	84
Abbildung 44: Erdgasnetz als multifunktionaler Energieträger und Energiespeicher.....	84
Abbildung 45: Funktionsprinzip Wärmeverbund	85
Abbildung 46: Erdverlegte, doppelt geführte Fernwärmeleitung	86
Abbildung 47: Erdverlegte, einfach geführte Gasleitung (5 bar).....	86
Abbildung 48: Entwicklung Wärmeverbrauch Kanton Zürich 1988 – 2011.....	87
Abbildung 49: Entwicklung Wärmeverbrauch Neubauten Kanton Zürich 1975 – 2019	87
Abbildung 50: Entwicklung Wärmebedarf und Energiekennzahl 1990 – 2050.....	88
Abbildung 51: Entwicklung Energiekennzahl innerhalb bestehender Siedlungen 1990 – 2050.....	88
Abbildung 52: CO ₂ -Ausfall als Nebenprodukt des Methanisierungsprozesses.....	89
Abbildung 53: Erdgas und Biogas als Treibstoff.....	90
Abbildung 54: Bestandesentwicklung und -zunahme Erdgasfahrzeuge	91
Abbildung 55: Portfolio der Zunahme der Erdgasfahrzeuge nach Kategorien	91

Abbildung 56: Schweizer Erdgastankstellennetz	92
Abbildung 57: Preise für Biogasmischungen als Treibstoff.....	92
Abbildung 58: Schematische Darstellung des AGNION-Verfahrens nach (Kienberger, 2012)	95
Abbildung 59: Schematische Darstellung des MILENA-Verfahrens.....	96
Abbildung 60: Festbettreaktormethanisierung.....	98
Abbildung 61: Methanisierung in der Wirbelschicht nach (Kopyscinski, 2010).....	98
Abbildung 62: Demonstration der erfolgreichen Übertragung der Wirbelschichtmethanisierung.....	99
Abbildung 63: Grundprinzip der H ₂ -Abtrennung mittels Membrantrennverfahren.....	101
Abbildung 64: Beispiele für die Prinzipien der Verschaltung von Membranmodulen:.....	101
Abbildung 65: Risikobeurteilung auf einen Blick gemäss EN 1050 (Forsblom-Pärli, 2014)	103
Abbildung 66: Aspekte der Risiken und der jeweiligen Schutzziele	103
Abbildung 67: Erdbebenzonen in der Schweiz nach SIA 261	104
Abbildung 68: Die drei Grundvoraussetzungen für eine Explosion	105
Abbildung 69: Die drei Grundprinzipien eines integrierten Explosionsschutzkonzeptes.....	106
Abbildung 70: Grundlagen für Explosionsschutzmassnahmen nach (SUVA, 2013).....	107
Abbildung 71: Auszug aus UVPV Anhang 2/21.2 'UVP-Anlagen und massgebliche Verfahren'	110

13 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vergleich zwischen den zu erwartenden Mengen und den StfV-Schwellwerten.....	18
Tabelle 2: Zusammenfassung der Sachzwänge.....	23
Tabelle 3: Verwendete Umrechnungsfaktoren.....	27
Tabelle 4: Energieholzverbrauch 2008 und Potenzial bis 2020 für die gesamte Schweiz in Mio. m ³ /a.....	28
Tabelle 5: Nutzung 2010 und Potenzial gemäss BAFU 2010	28
Tabelle 6: Herleitung Energieholzpotenzial Kanton Waadt	28
Tabelle 7: Aktuelle Nutzung von Energieholz im Kanton Waadt	29
Tabelle 8: Gegenüberstellung aktuelle Nutzung und Potenzial von Energieholz im Kanton Waadt	30
Tabelle 9: Produktionskosten (CHF/Srm ³) für gut erschlossene Lagen	30
Tabelle 10: Gemeinsame Preisempfehlungen der Waldbesitzer und der Unternehmer.....	31
Tabelle 11: Endkundenpreise Erdgas Zürich	35
Tabelle 12: Häufig verwendete Begriffe und Konventionen im Zusammenhang mit Holz.....	38
Tabelle 13: Chemisch-physikalische Vorgänge während der Pyrolyse nach (Hamm, 1993)	44
Tabelle 14: Bewertungs- und K.O.-Kriterien für Evaluierung des Holzvergasungssystems	49
Tabelle 15: Evaluierung eines geeigneten Holzvergasungssystems im Detail.....	51
Tabelle 16: Vor- und Nachteile der Methanisierung im Festbett- und Wirbelschichtreaktor.....	57
Tabelle 17: Holzbedarf der Anlage: Frischholz und verbleibende Holzmenge nach der Holz Trocknung	65
Tabelle 18: Eigenschaften des erzeugten Bio-SNGs	65
Tabelle 19: Elektrische Verbraucher der Anlage gegliedert in Verfahrensabschnitte:.....	66
Tabelle 20: Betriebsmittelverbräuche der Anlage gestaffelt nach Betriebsjahr	67
Tabelle 21: Beschrieb der baulichen Anlagen	71
Tabelle 22: Herstellkosten der Anlage	72
Tabelle 23: Betriebskosten der Anlage.....	73
Tabelle 24: Gesamtkostenrechnung der Anlage	74
Tabelle 25: Gesamtkostenrechnung der Anlage	75
Tabelle 26: Gesamtkostenrechnung der Anlage	77
Tabelle 27: Nutzungsvergleich der drei Medien Fernwärme, Erdgas und SWISS-SNG	89
Tabelle 28: StfV Anhang 1, Ziffer 3	111

14 LITERATURVERZEICHNIS

- Bierter, W., & Gaegauf, C. (1982). *Holzvergasung: umweltfreundliche und effiziente Energieholznutzung*. Karlsruhe: Verlag C. Müller.
- biobib. (5. März 2014). Von <http://cdmaster2.vt.tuwien.ac.at/biobib/fuel134.html> abgerufen
- Bollier, M., & Meyer, F. (2006). *Methode Suva zur Risikobeurteilung von technischen Einrichtungen und Geräten*. Luzern: Suva – Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Bereich Technik.
- Chrysostome, G., & Lemasle, J. (1986). Fluidized Bed Oxygen Gasification of Wood. In A. Bennackers, & W. van Swaay, *Advanced Gasification*. Dordrecht, NL: Solar Energy R&D in the European Union, Series E, Volume 8.
- ECN Energy research Centre of the Netherlands. (5. März 2014). *Principle of OLGA tar removal system*. Von https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Leaflets/b-08-022_OLGA_principles.pdf abgerufen
- Forsblom-Pärli, U. (26.2.2014). www.suva.ch. Von <http://www.suva.ch/startseite-suva/service-suva/tools-tests-suva/risikobeurteilung-suva/risikobeurteilung-service-suva.htm> abgerufen
- Genossenkorporation, S. (21. Mai 2014). *Korporation Stans*. Von <http://www.holzverstromung-nidwalden.ch/> abgerufen
- Grenzwerte am Arbeitsplatz 2014*. (2013). Luzern: Suva, Bereich Arbeitsmedizin.
- Hamm, M. (1993). *Stoffliches Recycling von Shredderleichtgut durch Pyrolyse im Drehrohrföfen*. Essen: Universität – Gesamthochschule Essen.
- Harms, H., Höhle, B., & Skov, A. (6. 1980). Methanisierung kohlenstoffmonoxidreicher Gase beim Energie-Transport. *Chem.-Ing.-Tech.*, S. 504–515.
- Hofbauer, H. (26.2.2014). *Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften*. Von <http://www.vt.tuwien.ac.at/biobib/> abgerufen
- Hofbauer, H., & Rauch, R. (2002). Zweibett-Wirbelschichtvergasung mit 2 MWe/4,5MWt: Konzept, Betriebserfahrung und Wirtschaftlichkeit. In *7. Holzenergie-Symposium* (S. 151–163). Zürich.
- Hofbauer, H., Veronik, G., Fleck, T., & Rauch, R. (26.2.2014). <http://members.aon.at/biomasse/>. Von <http://members.aon.at/biomasse/banff.pdf>: <http://members.aon.at/biomasse/banff.pdf> abgerufen
- Kienberger, T. (2012). Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe im agnion Wirbelschichtvergasungsverfahren.
- Kopyscinski, J. (2010). *Production of synthetic natural gas in a fluidized*. ETH Zürich: Dissertation.
- Lignum Holzwirtschaft Schweiz, Zürich. (2010). *Erdbeibengerechte mehrgeschossige Holzbauten*. Schwabe AG, Muttenz.
- Recknagel, H., Sprenger, E., & Schramek, E.-R. (2000). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. München: R. Oldenbourg-Verlag.
- Schuster, G., Weigl, K., Kaiser, S., Friedl, A., & Hofbauer, H. (2000). Der Dampfvergasungsprozess – eine umfangreiche Parameterstudie. *VDI-GET Tagung "Wirbelschichtfeuerungen und -vergasung: Erfahrung und Perspektiven"*. Cottbus, Germany.
- Schweizerische Normenvereinigung SNV. (2003). *Norm SIA 261: Einwirkungen auf Tragwerke*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches. (2013). *Richtlinie für die Gasbeschaffenheit*. Zürich: Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW.
- Suva. (2013). *Explosionsschutz – Grundsätze, Mindestvorschriften, Zonen*. Luzern: Suva, Bericht Arbeitssicherheit.
- van der Meijden, C. (6.12.2011). *Milenatechnology*. Von <http://www.milenatechnology.com/> abgerufen
- van der Meijden, C. (24.4.2014). www.ieatask33.org. Von www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/2012/Workshop_Istanbul/ECN_MILENA.pdf abgerufen
- Wikipedia. (21. Februar 2014). Von Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Philippe_Lebon abgerufen

15 ANLAGEN

SWISS-SNG-Anlage: Verfahrensfliessbild