



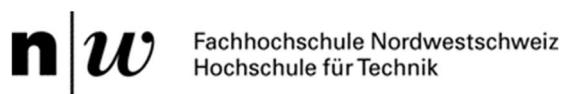
## GasBustion

Prozesswärme aus festen biogenen Abfällen  
mittels Doppelfeuervergasung und  
nachgeordneter Verbrennung

---



Quelle: © FHNW 2022



**Datum:** 10.6.2024

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

Klima Grischa Klimastiftung Graubünden  
Rheinmühlenweg 64, CH-7000 Chur

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW  
Klosterzelgstrasse 2, CH-5210 Windisch  
[www.fhnw.ch](http://www.fhnw.ch)

GRegio Energie AG  
Rheinmühlenweg 64, CH-7000 Chur  
[www.gregio.ch](http://www.gregio.ch)

**Autor/in:**

Miriam Baier, Alexander Garcia Kapeller, Timothy Griffin, Nemo Lohberger, Dieter Winkler, Andreas Mehli

**BFE-Projektbegleitung:**

Sandra Hermle, [sandra.hermle@bfe.admin.ch](mailto:sandra.hermle@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501996-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



# Zusammenfassung

## Ausgangslage

Für diverse Anwendungen in der Industrie und der Landwirtschaft wird Prozesswärme benötigt. Im Jahr 2022 lag dieser industrielle Verbrauch bei rund 80 PJ. Neben Strom werden dazu in der Regel fossile Energieträger als Primärenergiequelle zur Bereitstellung von Prozesswärme verwendet. Eine Möglichkeit, wie zukünftig Prozesswärme ökologisch bereitgestellt werden könnte, bildet die Nutzung von biogenen Reststoffen als Energiequelle. Um diese Reststoffe aber emissionsarm zu verbrennen, muss der Brennstoff optimal mit der Verbrennungsluft durchmischt werden, was am besten gelingt, wenn der Brennstoff in gasförmiger Form vorliegt, bzw. zuerst in den gasförmigen Zustand gebracht wird.

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung und Erprobung einer angepassten Verfahrens- und Anlagentechnik für die Vergasung und nachgeordnete Verbrennung von naturbelassenem Holz, Holzkorkbriketts und dem holzigen Siebüberlauf aus Biogasanlagen sowie optional HTC-Kohle aus der hydrothermalen Karbonisierung zur Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme. So können diese Biomassen für Prozesswärmeanwendungen in der Industrie oder Landwirtschaft eingesetzt werden, was einen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiestrategie 2050 des Bundes leistet.

## Brennstoffe

Durch die Brennstoffanalysen wurden für die Untersuchungen im weiteren Projektverlauf die drei Brennstoffe Holzkorkbriketts, Siebüberlauf aus der Kompostierung und Siebüberlauf aus der Vergärung ausgewählt.

Die Holzkorkbriketts weisen wegen ihres niedrigen Ascheschmelzpunktes ein leicht erhöhtes Potenzial für Verschlackungen auf, während die Siebüberläufe, wahrscheinlich durch anhaftende Verunreinigungen, einen hohen Ascheanteil und durch jahreszeitliche Schwankungen im Vegetationswachstum eine volatile Zusammensetzung haben. Alle Brennstoffe haben einen im Vergleich zu naturbelassenem Holz erhöhten Stickstoff- und Schwefelgehalt, sodass erhöhte Stickoxid- ( $\text{NO}_x$ ) und Schwefeloxidemissionen ( $\text{SO}_2$ ) bei der Verbrennung erwartet wurden. Auch der Chlorgehalt ist bei den untersuchten biogenen Abfällen erhöht im Vergleich zu Holz. In besonderem Masse gilt dies für die Holzkorkbriketts, unter anderem, weil sie mit PVC verunreinigt sind. Auch bei verschiedenen Chargen von Siebüberlauf aus der Vergärung konnten hohe Chlorkonzentrationen gemessen werden. Chlor im Ausgangssubstrat kann bei der energetischen Nutzung die Bildung von polychlorierten Dibeno-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/F) begünstigen.

## Versuchsanlage und Substratversuche

Am «Energiepark Grischa» in Chur wurde die Versuchsanlage installiert. Diese besteht aus einem Doppelfeuervergaser der Firma AHT, der in der Lage ist unterschiedliche Biomassen, trotz hohem Aschegehalt und tiefer Ascheerweichungstemperatur, zu vergasen und somit energetisch nutzbar zu machen. Zweiter Bestandteil der Anlage ist ein LowNOx-Brenner der Firma CharcoTec, der das Rohgas aus dem Vergaser verbrennt und der Wärmeproduktion dient.

Nach Vorversuchen an dieser Anlage mit allen drei ausgewählten Substraten und mit naturbelassenem Scheitholz als Vergleich konnten die Holzkorkbriketts für die Langzeitversuche empfohlen werden, da sie einen stabilen Betrieb ermöglichen und mit Holz vergleichbar niedrige Emissionen an  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , sowie PCDD/F zeigten.

In den Langzeitversuchen mit den Holzkorkbriketts wurden aber im Vergleich zu Holz erhöhte  $\text{NO}_x$ - und  $\text{SO}_2$ -Emissionen gemessen und es zeigte sich bei den Brennstoffanalyse der verschiedenen Chargen, dass sie sich in ihrer Qualität bzgl. der Zusammensetzung und der physikalischen Eigenschaften (z.B. Feinanteil) stark unterschieden haben.

## Fazit

Die Feldmessungen haben gezeigt, dass der Vergasungs-Verbrennungsprozess für bestimmte biogene Reststoffe mit definierter konstanter Zusammensetzung und Brennstoffeigenschaften (z.B. Stückigkeit, Feinanteil) prinzipiell möglich ist und niedrige Emissionswerte erreicht werden können. Die Emissionen



von SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> und PCDD/F bei der Verwendung der untersuchten Brennstoffe hängen stark von der Brennstoffzusammensetzung ab. Von Charge zu Charge kann die Zusammensetzung als auch die anderen Brennstoffeigenschaften stark variieren. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass sich die im Projektverlauf favorisierten LICO-Holzkorkbriketts aufgrund ihres hohen Feinanteils nicht für einen Langzeitbetrieb in einem Vergaser dieser Bauart eignen. Allenfalls könnte eine Mischung mit naturbelassenen Holzscheiten oder ein anderes Brikettierverfahren Abhilfe schaffen.

Auf jeden Fall muss für eine Verwendung der alternativen Brennstoffe in Vergasern eine Brennstoffspezifikation mit Werten und Toleranzen zur deren Zusammensetzung und den Brennstoffeigenschaften definiert werden und durch geeignete Qualitätssicherungs-Massnahmen im Herstellungsprozess muss sichergestellt werden, dass der Brennstoff der Spezifikation entspricht (analog zu Holzpellets). Wie diese Spezifikation aussehen könnte, sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Das Verfahren kann einen ökologischen Mehrwert gegenüber der Behandlung der biogenen Reststoffe in Altholzverbrennungsanlagen darstellen, wenn der Gesamtwirkungsgrad der Vergasungs-Verbrennungsanlage gesteigert wird, z.B. durch die Erzeugung von Strom und Wärme. Zusätzlich besteht eine ökonomische Attraktivität, sofern die Entsorgungskosten für holzige Abfallströme steigen. Unter diesen Umständen kann das getestete Verfahren der kombinierten Vergasung und Verbrennung eine Möglichkeit darstellen, lokal wertvolle Hochtemperatur-Wärme für industrielle Anwendungen zur Verfügung zu stellen und damit direkt fossile Energie zu ersetzen.

## Résumé

### Situation de départ

La chaleur de processus est nécessaire pour diverses applications dans l'industrie et l'agriculture. En 2022, cette consommation industrielle était d'environ 80 PJ. Outre l'électricité, les énergies fossiles sont généralement utilisées comme source d'énergie primaire pour fournir de la chaleur de processus. L'utilisation de résidus biogènes comme source d'énergie offre une possibilité de fournir à l'avenir de la chaleur de processus de manière écologique. Afin de brûler ces résidus avec un minimum d'émissions, le combustible doit être mélangé de manière optimale avec l'air de combustion, ce qui réussit le mieux lorsque le combustible se présente sous forme gazeuse ou est d'abord amené à l'état gazeux.

L'objectif de ce projet est de développer et de tester une technique de procédé et d'installation adaptée pour la gazéification et la combustion en aval de bois naturel, de briquettes de liège et de bois et du refus de criblage ligneux provenant d'installations de biogaz ainsi que, en option, de charbon HTC issu de la carbonisation hydrothermale pour la production de chaleur de processus à haute température. Ces biomasses pourraient ainsi être utilisées pour des applications de chaleur de processus dans l'industrie ou l'agriculture, ce qui contribuerait à la mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050 de la Confédération.

### Combustibles

Les analyses des combustibles ont permis de sélectionner trois combustibles pour les études ultérieures du projet : les briquettes de liège, les refus de criblage du compostage et les refus de criblage issus de la méthanisation.

Les briquettes de liège présentent un potentiel de scories légèrement plus élevé, tandis que les deux types de refus de criblage ont une forte teneur en cendres, probablement en raison impuretés qui y adhèrent, et une composition volatile en raison des variations saisonnières de la croissance de la végétation. Tous les combustibles ont une teneur en azote et en soufre plus élevée que le bois à l'état naturel, de sorte que des émissions accrues d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) et d'oxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) étaient attendues lors de la combustion.

La teneur en chlore des déchets biogènes étudiés est également plus élevée que celle du bois. C'est particulièrement vrai pour les briquettes de liège de bois, notamment parce qu'elles sont contaminées



par du PVC. Des concentrations de chlore relativement élevées ont également été observées dans le refus de criblage issu de la méthanisation. Le chlore présent dans le substrat de départ peut favoriser la formation de Polychlorodibenzo-p-dioxine et de Polychlorodibenzofurane (PCDD/F) lors de l'utilisation énergétique.

### **Installation expérimentale et essais de substrats**

L'installation expérimentale a été mise en place au "Energiepark Grischa" à Coire. Elle se compose d'un gazéificateur à double foyer de l'entreprise AHT, capable de gazéifier différentes biomasses malgré une teneur élevée en cendres et une température basse de déformation des cendres, et donc de rendre possible leur valorisation énergétique. Le deuxième élément de l'installation est un brûleur LowNOx qui brûle le gaz brut du gazéificateur et sert à la production de chaleur.

Après des essais préliminaires sur cette installation avec les trois substrats choisis et avec des bûches à l'état naturel comme comparaison, les briquettes de liège de bois ont pu être recommandées pour les essais à long terme, car elles permettaient un fonctionnement stable et présentaient des émissions de NOx, de SO2 et de PCDD/F comparables à celles du bois.

Lors des essais de longue durée avec les briquettes de liège de bois, des émissions accrues de NOx et de SO2 ont toutefois été mesurées par rapport au bois, et l'analyse du combustible des différents lots a montré que leur qualité était très différente en termes de composition et de propriétés physiques (par exemple teneur en fraction fine).

### **Conclusion**

Les mesures effectuées sur le terrain ont montré que le processus de gazéification suivi d'une combustion est en principe possible pour certains résidus biogènes dont la composition et les propriétés du combustible (par exemple la taille des morceaux, la teneur en fraction fine) sont définies et constantes, et que de faibles valeurs d'émission peuvent être atteintes. Les émissions de SO2 et de NOx et de PCDD/F lors de l'utilisation des combustibles étudiés dépendent fortement de la composition du combustible. D'un lot à l'autre, la composition ainsi que les autres caractéristiques du combustible peuvent varier considérablement. Il s'est avéré, par exemple, que les briquettes de liège de bois LICO, favorisées au cours du projet, ne conviennent pas à un fonctionnement de longue durée dans un gazéificateur de ce type en raison de leur teneur élevée en fraction fine. Tout au plus, un mélange avec des bûches de bois à l'état naturel ou un autre procédé de briquetage pourrait y remédier.

En tous cas, l'utilisation des combustibles alternatifs dans les gazéificateurs nécessite la définition d'une spécification du combustible avec des valeurs et des tolérances sur sa composition et ses propriétés, et des mesures d'assurance qualité appropriées dans le processus de fabrication doivent garantir que le combustible correspond à la spécification (comme pour les granulés de bois). La forme que pourrait prendre cette spécification devrait faire l'objet d'études futures.

Le procédé pourrait représenter une plus-value écologique par rapport au traitement actuel des résidus biogènes, notamment si le rendement énergétique de l'installation de gazéification et de combustion est supérieur au traitement actuel. En outre, il présente un intérêt économique si les coûts d'élimination des flux de déchets ligneux augmentent. Dans ces conditions, le procédé testé de gazéification et de combustion combinées peut constituer une possibilité de fournir localement de la chaleur à haute température pour des applications industrielles et de remplacer ainsi directement des agents énergétique fossiles.

## **Summary**

### **Initial situation**

Process heat is required for various applications in industry and agriculture. In 2022, industrial process heat in Switzerland amounted to around 80 PJ. In addition to electricity, fossil fuels are generally used as the primary energy source for the provision of process heat. One way in which process heat could be provided ecologically in the future is by utilizing solid biomass waste as an energy source. However, in order to burn these wastes with low emissions, the fuel must be optimally mixed with the combustion air, which is best achieved if the fuel is in gaseous form.



The aim of this project was to develop and test an adapted process and plant technology for the gasification and downstream combustion of untreated wood, wood cork briquettes and the screened woody overflow from biogas plants as well as optional HTC coal from hydrothermal carbonization for the generation of high-temperature process heat. This would enable their use for process heat applications in industry or agriculture, which would contribute to the successful implementation of the federal government's Energy Strategy 2050.

## Fuels

As a result of the fuel analyses, the three fuels, wood cork briquettes, screened overflow from composting and screened overflow from biogas plants were selected for investigation in the further course of the project.

The wood cork briquettes have a slightly increased potential for slagging, while the screened overflows have a high ash content due to impurities and additionally have a variable composition due to seasonal fluctuations in vegetation growth. All fuels have an increased nitrogen and sulfur content compared to untreated wood, so that increased nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) and sulfur oxide (SO<sub>2</sub>) emissions were expected during combustion.

The chlorine content is also higher in the biogenic waste examined as compared to wood. This applies in particular to the wood cork briquettes, partly because they are contaminated with PVC. High chlorine concentrations were also measured in various batches of screen overflow from the biogas plants. Chlorine in the initial substrate can promote the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/F) during energy recovery.

## Test facility and substrate tests

The test plant was installed at the "Energiepark Grischa" in Chur. It consists of a double-fire gasifier from the company AHT, which can gasify different biomasses despite their high ash content and low ash softening temperature and thus enable their energetic utilization. The second component of the system is a LowNO<sub>x</sub> burner, which burns the raw gas from the gasifier and is used to produce heat.

After preliminary tests on this system with all three selected substrates and with untreated logs as a comparison, the wood cork briquettes were recommended for the long-term tests, as they enabled stable operation and showed comparably low emissions of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and PCDD/F compared to wood.

In the long-term tests with the wood cork briquettes, however, increased NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions were measured compared to wood and the fuel analysis of the various batches showed that they differed greatly in terms of quality, composition and physical properties (e.g. fines content).

## Conclusion

The field measurements have shown that the gasification combustion process is possible in principle for certain waste solid biomasses with a defined constant composition and fuel properties (e.g. lumpiness, fines content) and that low emission values can be achieved. The emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> and PCDD/F when using the investigated fuels depend strongly on the fuel composition. It has been shown that both the composition and the other fuel properties (e.g. fines content) can vary greatly from batch to batch. For example, it has been shown that the LICO wood cork briquettes favored in the course of the project are not suitable for long-term operation in a gasifier of this type due to their high fines content. At best, a mixture with untreated logs or another briquetting process could provide a solution. In any case, for the use of alternative fuels in gasifiers, a fuel specification with values and tolerances for their composition and fuel properties must be defined and suitable quality assurance measures in the manufacturing process must ensure that the fuel meets the specification (analogous to wood pellets). What this specification could look like should be the subject of future investigations.

The process can represent an ecological added value compared to the treatment of biogenic residues in waste wood incineration plants if the total efficiency of the gasification incineration plant is increased, for example, by the production of both electricity and heat. It is also economically attractive if the disposal costs for woody waste streams increase. Under these circumstances, the tested process of combined gasification and incineration can represent an opportunity to provide valuable high-temperature heat locally for industrial applications and thus directly replace fossil energy.



## Take-home messages

- Die Kombination von Vergasung und Verbrennung in einem Prozess kann eine Möglichkeit darstellen, dezentral anfallende hochkalorische biogene Reststoffe lokal für eine Wärmebereitstellung zu nutzen. Dabei ist eine aufwendige Abgasreinigung nicht notwendig.
- Geeignete Reststoffe sind vor allem solche, die mit einer vorhersagbaren und möglichst konstanten Zusammensetzung anfallen sowie in ihrer Stückigkeit gut an die Anforderungen des Vergasers bezüglich der Brennstoffaufgabe anpassen lassen. Eine intensive Vorbehandlung der Reststoffe sollte nicht erforderlich sein.
- Die modellierte Ökobilanz zeigt, dass sich die Umsetzung des Vergasungs-Verbrennungsprozesses nur bedingt gegenüber den heutigen Verwertungswegen der betrachteten Substrate lohnt. Dabei wurden lediglich die Verwertungswege betrachtet, ein Vergleich der Vergasung-Verbrennung als Ersatzprozess auf biogener Basis für die Herstellung von Prozesswärme aus fossilen Energieträgern in der Industrie war nicht Bestandteil dieses Projekts.
- Die wirtschaftliche Betrachtung des Vergasungs-Verbrennungsprozesses zeigt eine hohe Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von den Marktpreisen der Brennstoffe und den Investitions- bzw. Betriebskosten für eine unter Umständen erforderliche Aufbereitungstechnik, um den Brennstoff im Prozess nutzen zu können.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
<b>Summary</b> .....	<b>5</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>7</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>12</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	12
1.2 Motivation des Projektes .....	12
1.3 Vorgehen und Projektziele .....	12
<b>2 Technische Grundlagen</b> .....	<b>15</b>
2.1 Biomassevergasung .....	15
2.2 Flammenlose Oxidation .....	17
<b>3 AP 1: Brennstoffeigenschaften und -potenziale</b> .....	<b>18</b>
3.1 Brennstoffbeschreibung.....	18
3.1.1 Naturbelassenes Holz .....	19
3.1.2 Holzkorkbriketts .....	19
3.1.3 Holzige Rückstände aus Biogasanlagen.....	19
3.1.4 Siebüberlauf aus Kompostierung .....	20
3.1.5 HTC-Kohle aus Klärschlamm (optional) .....	20
3.2 Physikalische und Chemische Eigenschaften der Brennstoffe .....	21
3.3 Brennstoffpotenziale.....	24
3.3.1 Waldenergieholz .....	26
3.3.2 Holzkorkbriketts .....	26
3.3.3 Kompogas Siebüberlauf .....	26
3.3.4 HTC-Kohle .....	26
3.3.5 Sonstige Biomassen.....	27
<b>4 AP 2: Design und Aufbau der Versuchsanlage</b> .....	<b>27</b>
4.1 Anlagekonzept .....	27
4.1.1 Brennstoffzufuhr .....	27
4.1.2 Vergaser .....	27
4.1.3 LowNOx-Brenner .....	29
4.1.4 R&I-Schema .....	31
4.1.5 PCDD/PCDF-Messung .....	32
4.1.6 Instrumentierung und Datenerfassung .....	33
4.1.7 Risikoanalyse.....	33
<b>5 AP 3: Inbetriebnahme</b> .....	<b>34</b>
5.1 Anfahrprozess.....	34



5.2	Ergebnisse und Massnahmen .....	34
5.2.1	Analysen von Produktgas .....	35
5.2.2	Analysen von Abgas .....	35
<b>6</b>	<b>AP 4: Substrat-Versuche .....</b>	<b>36</b>
6.1	Substrate .....	36
6.2	Ergebnisse .....	37
6.2.1	Übersicht .....	37
6.2.2	Test mit Holz .....	38
6.2.3	Test mit LICO-Holzkorkbriketts .....	40
6.2.4	Test mit Siebüberlauf aus der Vergärung .....	41
6.2.5	Test mit Siebüberlauf aus der Kompostierung .....	41
6.3	Diskussion .....	42
<b>7</b>	<b>AP 5: Langzeitversuche .....</b>	<b>43</b>
7.1	Geplanter Ablauf und Versuchsaufbau .....	43
7.2	Ergebnisse .....	44
7.2.1	Übersicht .....	44
7.2.2	Messung nach BHKW .....	46
7.2.3	Messung nach LowNOx-Brenner .....	46
7.3	Diskussion .....	47
<b>8</b>	<b>AP 6: Anwendungsbereiche, Ökobilanz und techno-ökonomische Analyse .....</b>	<b>48</b>
8.1	Anwendungsbereiche .....	48
8.1.1	Mögliche Einsatzgebiete für Prozesswärme aus Biomasse .....	48
8.1.2	Pilotanlage .....	49
8.2	Ökobilanz .....	50
8.2.1	Einleitung und Methodik .....	50
8.2.2	Ziel und Untersuchungsrahmen .....	52
8.2.3	Sachbilanz .....	54
8.2.4	Wirkungsabschätzung .....	55
8.2.5	Beurteilung der Ergebnisse und Diskussion .....	57
8.2.6	Fazit .....	59
8.3	Techno-ökonomische Bewertung .....	60
8.3.1	Vorgehen und Methode .....	60
8.3.2	Ergebnisse und Diskussion .....	61
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen und Fazit .....</b>	<b>64</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick und zukünftige Umsetzung .....</b>	<b>64</b>
<b>11</b>	<b>Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b>	<b>65</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>65</b>
<b>14</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>66</b>
14.1	Vorversuche mit Holzkorkbriketts .....	66
14.2	Instrumentierungskonzept .....	69
14.3	Ökobilanzierung .....	71



14.3.1 Wirkungsabschätzungsmethoden .....	71
14.3.2 Sachbilanzdaten .....	72



## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung / Symbol	Beschreibung	Einheit
ANU	Amt für Umwelt und Natur	
ar	Bezugsgrösse "as received"	-
BHKW	Blockheizkraftwerk	
CH <sub>4</sub>	Methan	
Cl	Chlor	
CO	Kohlenstoffmonoxid	
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	
GC-MS	Gaschromatografie-Massenspektroskopie	
GWP	Global Warming Potential	
H <sub>2</sub>	Wasserstoff	
HCl	Salzsäure	
HDF	High density fiberboard, hochdichte Faserplatte	
HTC	Hydrothermale Karbonisierung	
H <sub>u</sub>	Heizwert	MJ/kg
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage	
L <sub>min</sub>	Verbrennungsluftmenge	Nm <sup>3</sup> /kg
LRV	Luftreinhalteverordnung	
m <sub>T</sub>	Masse trocken	kg
M <sub>G</sub>	Gesamtmasse feucht	kg
M <sub>W</sub>	Masse Wasser	kg
N <sub>2</sub>	Stickstoff	
NO <sub>x</sub>	Stickoxide	
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	
PCDD	Polychlorierte Dibenz- <i>p</i> -Dioxine	
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane	
PM10	Feinstaubpartikel, Durchmesser < 10 µm	
PVC	Polyvinylchlorid	
S	Schwefel	
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid	
TS	Trockensubstanz	
UBP	Umweltbelastungspunkte	
VVEA	Abfallverordnung	
w	Wassergehalt	% <sub>ar</sub>
wf	wasserfrei	
γ <sub>i</sub>	Massenanteil	-
λ	Verbrennungsluftverhältnis	-



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Für diverse Anwendungen in der Industrie und der Landwirtschaft wird Prozesswärme benötigt. Im Jahr 2022 lag der industrielle Endenergieverbrauch für Prozesswärme in der Schweiz bei rund 80 PJ. Im Industriesektor geht die Hälfte des Endenergieverbrauchs zu Lasten der Prozesswärme. Wiederum mehr als die Hälfte dieser Prozesswärme wird mit fossilen Energieträgern (Erdöl und vor allem Erdgas) bereitgestellt. Diese Prozesswärme kann in vielen Fällen aufgrund des notwendigen Temperaturniveaus nicht mit Strom als Energiequelle hergestellt werden. Mit biogenen Reststoffen als Energiequelle könnte diese Prozesswärme zukünftig ökologisch bereitgestellt werden. Um diese Reststoffe aber emissionsarm zu verbrennen, muss der Brennstoff optimal mit der Verbrennungsluft durchmischt werden, was am besten gelingt, wenn der Brennstoff in gasförmiger Form vorliegt, bzw. zuerst in den gasförmigen Zustand gebracht wird.

Die Entsorgungswwege gewisser biogener Reststoffe sind zudem komplex und mit hohem Transportaufwand verbunden. Dezentrale Anlagen, welche durch die hier angewendete Vergasungstechnologie die Luftreinhalte-Verordnung (LRV)-Vorgaben auch ohne sekundäre Abgasreinigungsmassnahmen erfüllen, könnten eine günstigere energetische Nutzung der biogenen Reststoffe vor Ort ermöglichen.

## 1.2 Motivation des Projektes

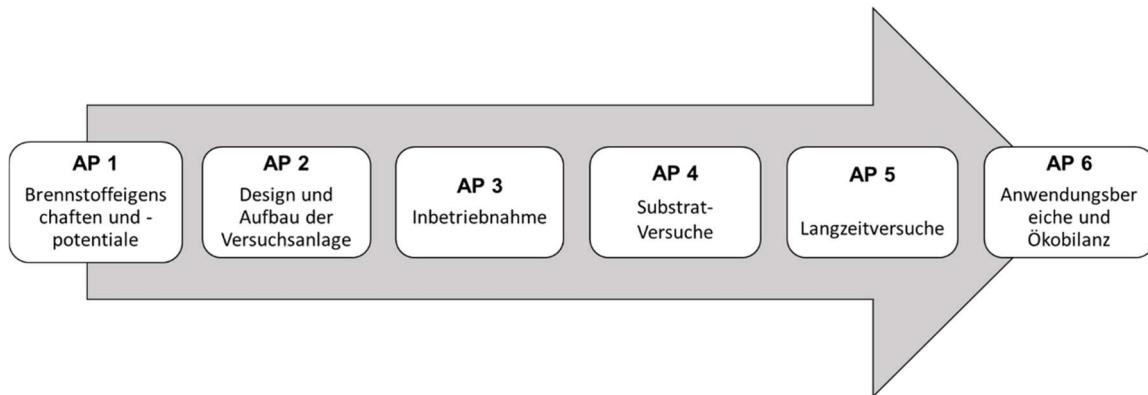
Dezentrale Anlagen, die Vergasung und Verbrennung trennen und somit eine emissionsarme Verbrennung von biogenen Reststoffen ermöglichen, könnten Prozesswärme mit hohem Temperaturniveau liefern und somit fossile Brennstoffe ersetzen. Jedoch gibt es noch keine Studie, welche konkret Biomasse-Potentiale der Schweiz erfasst hat und deren Nutzung in solchen Anlagen untersucht.

Im vorliegenden Projekt sollen dazu biogene Reststoffe identifiziert und anhand ihrer Verfügbarkeit und grundsätzlichen Eignung ausgewählt werden. Die ausgewählten Biomasse-Reststoffe werden bzgl. ihrer brennstofftechnischen Eigenschaften analysiert, um in der Folge in einer Versuchsanlage getestet zu werden. Die Versuchsanlage besteht aus einem Vergaser und einer nachgeschalteten Brennkammer. Diese Konfiguration hat das Potenzial, das Synthesegas aus dem Vergaser mit sehr geringen Schadstoffemissionen zu verbrennen.

Mögliche biogene Reststoffe, welche in Zusammenhang mit diesem Projekt genauer untersucht werden, sind Korkabfälle, sowie Siebüberläufe, respektive Astmaterialien aus Biogasanlagen und aus der Kompostierung. Die genannten Substrate wurden ausgewählt, da eine energetische Nutzung für Prozesswärme einen Mehrwert gegenüber der bisherigen Nutzung darstellen würde.

## 1.3 Vorgehen und Projektziele

Ziel des Projekts war die Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Vergasung von biogenen Reststoffen und effizienter Verbrennung des Produktgases.



Das Projekt umfasste sechs Arbeitspakete (AP) mit folgenden Zielen:

#### **Arbeitspaket 1**

In Arbeitspaket 1 wurde mit der Bestimmung der brennstofftechnischen Eigenschaften die Grundlage für die Charakterisierung der Substrate gelegt. Neben der Bestimmung der elementaren Zusammensetzung, des Heizwerts und Aschegehalts, wurde auch eine erste Potenzialabschätzung zu den Brennstoffkosten, der CO<sub>2</sub>-Reduktion und eine Energiebilanz durchgeführt. Diese Erkenntnisse lieferten die notwendigen Voraussetzungen, um die richtigen Modifikationen an der Verbrennungsanlage vornehmen zu können, mögliche Herausforderungen bei den Abgasemissionen frühzeitig zu erkennen und allgemein das Potenzial dieser Substrate bewerten zu können.

#### **Arbeitspaket 2**

Ziel von Arbeitspaket 2 war der Aufbau einer betriebsbereiten Anlage. Für die energetische Nutzung der biogenen Reststoffe wurde ein Doppelfeuervergaser der Firma AHT verwendet, der auch ohne nachfolgende Abgasreinigungsmassnahmen die LRV-Vorgaben erfüllen sollte.

Die Auslegung und Installation dieser Anlage, sowie die Durchführung der notwendigen Modifikationen waren Hauptbestandteil von Arbeitspaket 2. Zudem wurde in AP 2 eine Risikoanalyse der Anlage durchgeführt und die notwendige Instrumentierung und Datenerfassung zur Bestimmung der Abgas-Emissionen aufgebaut.

#### **Arbeitspaket 3**

In AP 3 wurde der Vergaser zusammen mit der Gasverbrennung in Betrieb genommen. In der Inbetriebnahmephase wurde die Steuerung von Vergaser und Verbrennung so eingestellt, dass mit den Standardbrennstoffen (Erdgas und naturbelassenes Holz) eine weitere stabile und sichere Funktion der Anlage bei allen möglichen Lastpunkten gewährleistet ist. Auftretende Mängel und Probleme konnten während dieser Phase behoben sowie notwendige Modifikationen durchgeführt werden.

Der Vergaser wurde mit naturbelassenem Holz befüllt und gezündet. Das zunehmend erzeugte Produktgas wurde zunächst über eine Fackel verbrannt. Sobald der Vergaser stabil lief, wurde der Brenner mit Erdgas gestartet. Nach Erreichen der Betriebstemperatur für flammlose Verbrennung in der Brennkammer wurde das Produktgas auf den Brenner geleitet und das Erdgas bis auf Null reduziert.

Ziel war ein stabiler Anlagenbetrieb mit Holz.

#### **Arbeitspaket 4**

Die ausgewählten Ausgangsstoffe wurden von den Industriepartnern geliefert und auf der Anlage in Chur getestet. Der Vergaser wurde immer mit Holz gestartet. Bei ausreichend stabilem Betrieb wurde dem Holz nach und nach mehr des zu untersuchenden Substrats beigemischt. So wurden die



Betriebscharakteristik und die Emissionen der Anlage, soweit möglich, bis zum reinen Substrateinsatz bestimmt. Dies ermöglichte Anpassungen im Prozess (z. B. Vergaserluftmenge) und bei der Versuchsdurchführung.

Das Produktgas aus dem Vergaser wurde nach Bedarf, das Abgas nach der Verbrennung wurde laufend analysiert. Die Abgasemissionen wurden dann mit den Werten aus dem Standardbetrieb (Erdgas, Gas aus naturbelassenem Holz) verglichen. Der Einfluss verschiedener Betriebsparameter auf die Emissionen des Brenners und die Einhaltung der LRV-Grenzwerte wurden in diesem Schritt untersucht.

Das Ziel war, für jedes Substrat die optimalen Anlagenparameter zu finden und die vielversprechendsten Substrate für die Langzeitversuche auszuwählen.

### **Arbeitspaket 5**

Mit einem ausgewählten Substrat wurde ein Langzeitversuch (Zieldauer 50 Stunden) durchgeführt. Während des Langzeitversuchs wurde die Stabilität des Prozesses beurteilt und das Emissionsverhalten zu Beginn des Versuchs mit dem Emissionsverhalten am Ende der Versuchszeit verglichen.

Nach Abschluss des Dauerversuchs wurde die Anlage inspiziert. Dabei wurde auf Korrosionsspuren sowie Ablagerungen von Teer und Schlacke auf dem Rost des Vergasers sowie in den gasführenden Leitungen und im Gasbrenner geachtet.

Vor dem Langzeitversuch wurde die Anlage an gut zugänglichen Stellen gereinigt, um den Einfluss des Substrats auf die Gesamtanlage überprüfen zu können.

### **Arbeitspaket 6**

Aufgrund der Resultate der Vergasung und Verbrennung der gewählten Substrate wurden mögliche Einsatzgebiete in der Industrie und der Landwirtschaft definiert. Dafür wurden u. a. das Potenzial der Ausgangsstoffe, die Anforderungen an den Prozess und die Einhaltung rechtlicher Grundlagen (VVEA, LRV, usw.) berücksichtigt. Eine Ökobilanz für jedes Substrat wurde durchgeführt und mit bisherigen Verwertungspfaden verglichen. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der Substrate in den neuen Anwendungen wurde bewertet, indem eine technisch-ökonomische Analyse aller Substrate vorgenommen wurde. Es wird die Frage beantwortet, ob der finanzielle Aufwand der geplanten Anlage durch die Erzeugung von Prozesswärme und die mögliche Verringerung der mit dem heutigen Verwertungspfad verbundenen Entsorgungskosten kompensiert werden kann. Außerdem wird anhand der Ökobilanz gezeigt, ob gleichzeitig die Umweltwirkungen verringert werden können.

In den möglichen Anwendungsbereichen wurden Pilotanlagen gesucht, die auf einen Vergaserbetrieb mit den möglichen Substraten bzw. Mischungen umgerüstet werden können.



## 2 Technische Grundlagen

### 2.1 Biomassevergasung

Die Vergasung bezeichnet einen thermo-chemischen Umwandlungsprozess, bei dem ein Ausgangsmaterial in brennbare Gase umgewandelt wird. Dies wird durch die partielle Oxidation (Luftüberschusszahl<sup>1</sup>  $\lambda < 1$ ) der Ausgangsstoffe bei hohen Temperaturen mit einem Vergasungsmittel erreicht (Vogel 2007). Während das Ziel darin besteht, die Umwandlung von Ausgangsmaterial in Gas (Produktgas) zu maximieren, entstehen bei dem Verfahren auch feste und flüssige Nebenprodukte. Feste Brennstoffe wie Kohle und Biomasse werden häufig als Ausgangsmaterial für die Vergasung verwendet. Bei der Biomassevergasung wird üblicherweise holzartige Biomasse in Form von Holzhackschnitzeln oder Pellets verwendet. Bei der Vergasung eines Ausgangsmaterials in einem Vergaser finden mehrere Teilprozesse statt:

- (i) Aufheizung, Trocknung, (ii) Pyrolyse, (iii) partielle Oxidation, (iv) Reduktion

Diese Prozesse beinhalten eine Reihe von chemischen Reaktionen.

Das entstehende Produktgas ist eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Kohlenwasserstoffen, Wasserdampf und Stickstoff (N<sub>2</sub>) (wenn Luft als Vergasungsmittel verwendet wird). Das Produktgas dient als Sekundärenergieträger, der zur Erzeugung von Wärme, Strom oder Kraftstoffen genutzt werden kann. Das Produktgas kann beispielweise in Heizkesseln, Gasturbinen, Gasmotoren (BHKW) oder Brennstoffzellen verwendet werden.

Ein Vergasungsprozess kann durch eine grosse Anzahl von Parametern beeinflusst werden. Folgende sind die wichtigsten gemäss der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR (2014):

- Art und Menge des Oxidationsmittels (Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, CO<sub>2</sub> oder eine Mischung davon)
- Art der Wärmebereitstellung (allotherm/autotherm)
- Reaktortyp
- Reaktionstemperatur
- Druck im Reaktor
- Art und Form des Brennstoffes
- Verwendung von Katalysatoren

Zudem können Vergaser in drei Hauptkategorien unterteilt werden: (i) Festbettvergaser, (ii) Wirbelschichtvergaser und (iii) Flugstromvergaser. Bei den Festbettvergasern wird weiter zwischen Gleich-, Gegenstrom und Doppelvergasern unterschieden. Die Einteilung bezieht sich auf die Art und Weise, wie das Ausgangsmaterial und das Oxidationsmittel zugeführt werden. Ein Schema der verschiedenen Reaktorbauarten ist in Abbildung 1 dargestellt. Für die Durchführung des Projekts wurde ein Doppelfeuervergaser mit einer Bruttolleistung von 900 kW gewählt, eine nähere Beschreibung findet sich in Kapitel 4.1.

---

<sup>1</sup> Verhältnis zwischen der effektiv vorhandenen Menge Oxidationsmittel und der stöchiometrischen Menge Oxidationsmittel

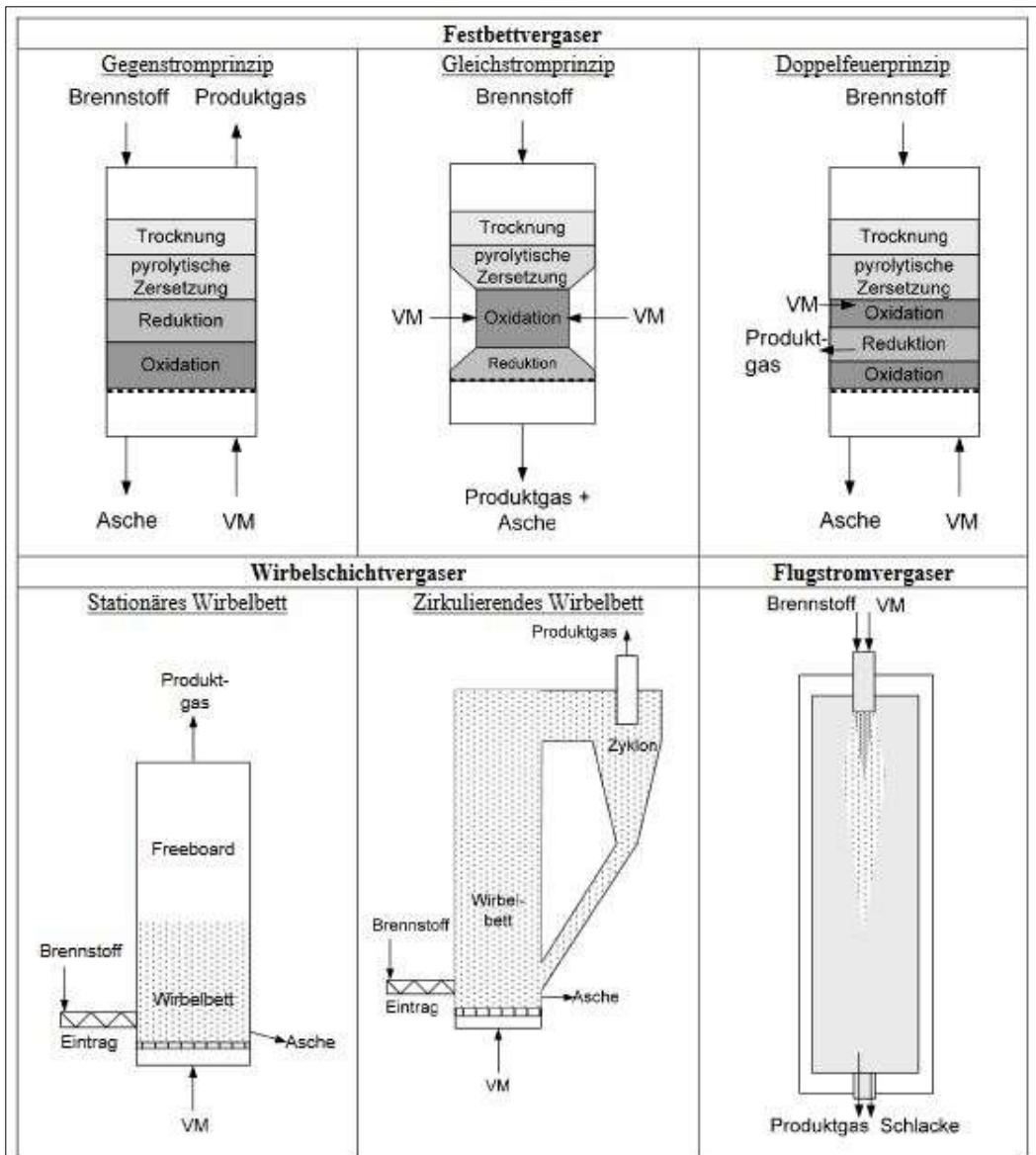


Abbildung 1: Einteilung der Vergasungsverfahren nach dem fluiddynamischen Verhalten.  
VM=Vergasungsmittel (Vogel 2007)

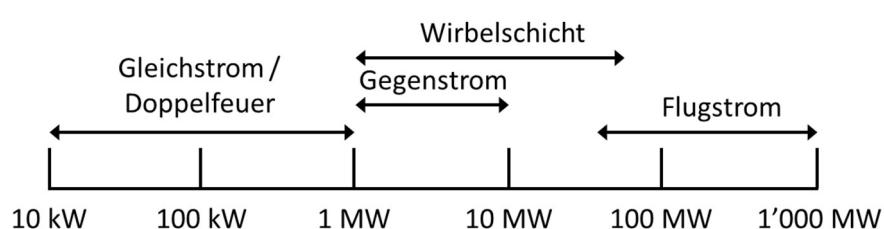


Abbildung 2 Mögliche Feuerungswärmeleistungen unterschiedlicher Vergasertypen (Angepasst nach Basu 2018)



## 2.2 Flammenlose Oxidation

Im Gegensatz zur Vergasung ist für einen vollständigen Verbrennungsprozess die Luftüberschusszahl  $\lambda$  immer gleich oder grösser als 1 ( $\lambda \geq 1$ ). Das Ziel der Verbrennung ist, die im Brennstoff gebundene Energie möglichst vollständig in Wärme umzuwandeln. Die flammenlose Oxidation ist ein Verbrennungsprozess, der als eine stabile Verbrennung ohne Flamme und mit definierter Rezirkulation der heissen Verbrennungsprodukte definiert werden kann. Die Technik der flammenlosen Verbrennung existiert seit Jahrzehnten und ist eine etablierte Technologie, die ursprünglich für gasförmige Kohlenwasserstoff-Brennstoffe wie Erdgas entwickelt wurde. Diese Technik zielt in erster Linie darauf ab, die Bildung von thermischem NOx zu unterdrücken, selbst bei stark vorgewärmer Verbrennungsluft.

Thermisches NOx ist ein bekanntes Phänomen bei der Verbrennung von fossilen wie auch von biogenen Brennstoffen. Thermisches NOx entsteht in den meisten Fällen durch eine inhomogene Mischung von Brenngas und Sauerstoff, was zu Temperaturspitzen führen kann. In diesen lokalen Bereichen mit hoher Flammentemperatur entsteht überproportional viel NOx.

Bei einem Flammlos-Oxidations-Brenner werden das Brenngas und die Luft räumlich getrennt mit hohen Geschwindigkeiten zugeführt. Durch eine hohe Turbulenz im Brennraum vermischen sich Brennstoff und Luft schnell mit dem gesamten Gas im Brennraum und reagieren erst dann homogen im gesamten Volumen ohne sichtbare Flamme. Hierbei bleibt die Verbrennungstemperatur verhältnismässig niedrig, wodurch die thermische NOx-Bildung im Vergleich zu einem herkömmlichen Brenner mit sichtbarer Flamme stark reduziert wird.

Abbildung 3 stellt einen Vergleich zwischen einem konventionellen Brenner mit sichtbarer gelber Flamme und einem Flammlos-Oxidations-Brenner ohne sichtbare Flamme dar.

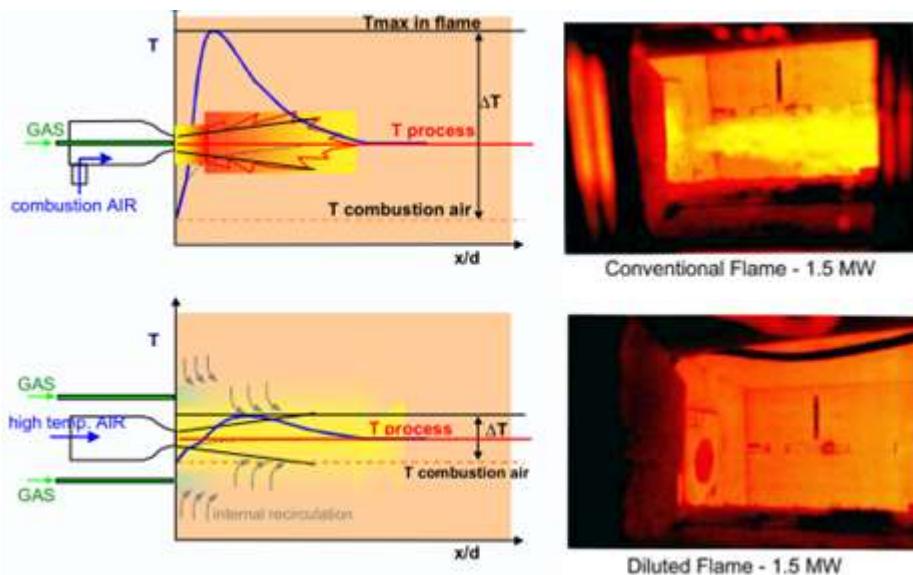


Abbildung 3: Prinzip und Flammenbilder eines konventionellen Brenners (oben) und eines Flammlosen-Brenners (unten) (Milani, A., 2001)



### 3 AP 1: Brennstoffeigenschaften und -potenziale

In diesem Arbeitspaket werden die im vorliegenden Projekt untersuchten Brennstoffe beschrieben (Kapitel 3.1), deren physikalisch-chemischen Eigenschaften (Kapitel 3.2) vorgestellt und schliesslich das Potenzial dieser Brennstoffe für die Umwandlung in Prozesswärme gegeben (Kapitel 3.3).

Inwiefern sich die Substrate für die energetische Nutzung eignen, ist nicht zuletzt von den brennstofftechnischen Eigenschaften wie Wassergehalt, Aschegehalt, Schüttdichte, Elementare Zusammensetzung (C, H, N, S) und Heizwert abhängig. Die Analyse der Brennstoffe ist jeweils als Momentaufnahme zu verstehen und gelten nur für die untersuchte Charge. Für eine erste Abschätzung der grundsätzlichen Eignung und der mit den Brennstoffen verbundenen Risiken sind sie dennoch gut geeignet. Die für die Verbrennungs-Versuche tatsächlich verwendeten Chargen werden vorab auf die wichtigsten brennstofftechnischen Eigenschaften hin untersucht (Kapitel 3.2).

#### 3.1 Brennstoffbeschreibung

Nachfolgend sind die einzelnen Substrate, die in diesem Projekt untersucht werden, genauer beschrieben.

 1: Stückholz, geeignet für den AHT-Vergaser	 2: "Siebüberlauf grün" aus einer Kompostieranlage	 3: "Siebüberlauf braun" aus einer Kompostieranlage
 4: Holzkorkbriketts mit einem Durchmesser von 7 cm	 5: "Astmaterial" aus einer Kompostieranlage	 6: Brikettierte HTC-Kohle
 7: Siebüberlauf aus Kompostierung		

Abbildung 4: Bilder der verwendeten Substrate (Beispiele 2, 3, 5, 7 müssen für den Einsatz im Vergaser brikettiert werden)



Die diversen Brennstoffe müssen in Form von ca. 5 – 10 cm grossen Stücken in den ausgewählten Vergaser aufgegeben werden. Holz kann entsprechend zugesägt und gespalten werden. Bei den kleinteiligen Substraten (z.B. Astmaterial) ist eine Brikettierung zu Briketts der erforderlichen Dimension notwendig. Eine Brikettiermaschine kann z.B. von der Firma Ruf angemietet werden.

### 3.1.1 Naturbelassenes Holz

Gemäss der Studie der WSL (Thees et al., 2017) wird Holz, das nach der Ernte im Wald der energetischen Nutzung zugeführt wird, als Waldenergieholz bezeichnet. Eine vorherige stoffliche Verwendung findet nicht statt. In diesem Projekt wird naturbelassenes Holz (d.h. Waldenergieholz) für die Inbetriebnahme und als Referenzbrennstoff des Vergasers verwendet.

### 3.1.2 Holzkorkbriketts

Holzkorkbriketts entsprechen in dieser Studie den Rückständen, die bei der Verarbeitung von Korkmaterial bei der Herstellung von Parkett anfallen. Bei diesen Rückständen handelt es sich um Verbundmaterial, das hauptsächlich aus vier Materialien besteht: hochdichte Faserplatte (engl. high-density fiberboard (HDF)) (73%), Kork (15%), Restholz (10%) und Polyvinylchlorid (PVC) (2%). Die Rückstände durchlaufen einen Brikettierungsprozess, womit eine geeignete Stückigkeit (7 cm Durchmesser) für den Vergaser erreicht wird (Abbildung 4).

Zurzeit fallen bei der Firma Li&Co im schweizerischen Val Müstair pro Woche 30 – 40 Tonnen Materialabfall an, welcher anschliessend rund 300 km weit transportiert werden muss, um in einer Altholzverbrennungsanlage thermisch verwertet zu werden.

Im Laufe des Projekts wurde der Herstellungsprozesse der Briketts durch Installation einer weitergehenden mechanischen Aufbereitungsstufe verändert, wodurch der PVC-Anteil im Brennstoff deutlich reduziert werden konnte. Der Chloranteil sank entsprechend von 6.9 Gew.-%(wf) auf 0.21 Gew.-%(wf).

### 3.1.3 Holzige Rückstände aus Biogasanlagen

Die untersuchten Substrate, die in Biogasanlagen anfallen, werden in drei Fraktionen unterschieden: Siebüberlauf grün, Siebüberlauf braun und Astmaterial, das zusätzlich zu den Siebüberläufen aus separat angeliefertem Landschaftspflegematerial (z.B. Äste) anfällt. Dieses Astmaterial wird in der Regel in einem Schredder zerkleinert und einer thermischen Behandlung zugeführt (z.B. in einer Altholzverbrennungsanlage).

Die Siebüberläufe grün und braun entsprechen dem groben und meist holzigen Material, das aus einem Siebtrennungsprozess kommt. Die in der vorliegenden Studie untersuchten Siebüberläufe fallen in Trockenvergärungsanlagen (Kompogasanlagen) an.

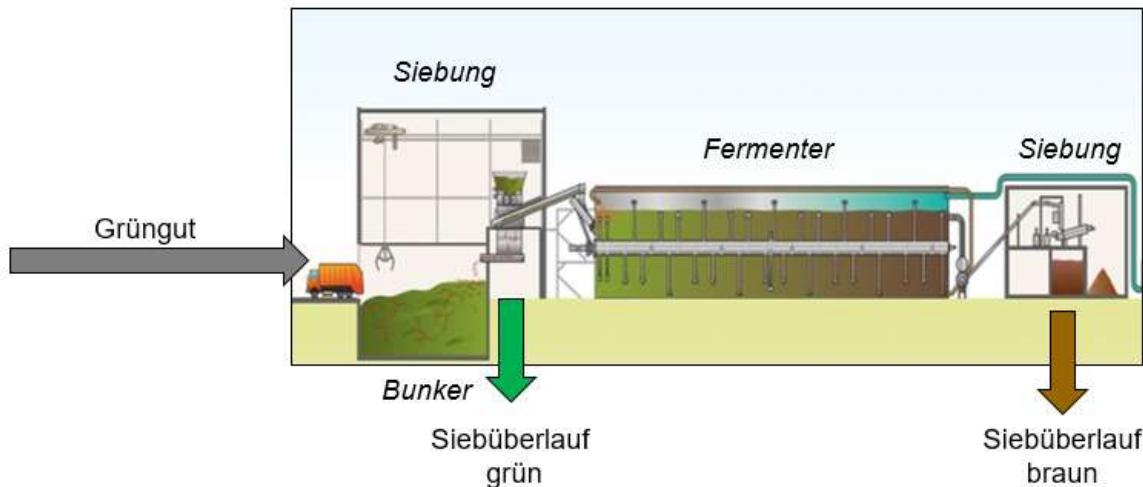


Abbildung 5: Schema einer Kompogasanlage mit den Siebüberläufen. Schema basierend auf (Kronenbergh und Fenner 2016)

In Kompogasanlagen findet in der Regel bereits vor dem anaeroben Fermenter ein erster Siebschritt des Ausgangsmaterials statt. Das gesamte Grüngut wird dabei geschreddert und danach gesiebt. Die groben Stücke fallen dabei als «Siebüberlauf grün» an und werden aussortiert. Es handelt sich dabei um grössere Holzstücke, aber auch Störstoffe wie Steine, Kunststoffe, oder Metallteile.

Ein zweiter Siebschritt erfolgt nach der Vergärung. Das aus dem Fermenter austretende Fest-Flüssig-Gemisch (Gärrest) wird zunächst mittels Schneckenpresse in eine feste und eine flüssige Fraktion getrennt. Die Feststofffraktion wird weiter durch Siebung in eine Grob- und eine Feinfraktion getrennt. Diese Grobfraktion wird hier als "Siebüberlauf braun" bezeichnet.

Die Siebüberläufe grün und braun können eine heterogene Struktur aufweisen, deren Zusammensetzungen und Mengen von einer Kompogasanlage zur anderen und im Laufe des Jahres variieren können. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die Siebüberläufe im Allgemeinen einen grossen Anteil an holzigen Materialien haben, wobei auch andere Materialien, wie z.B. Kunststoffe, Steine und Metalle, gefunden werden können. Zudem sind sie oft durch eine unregelmässige Masse und einen hohen Wassergehalt charakterisiert.

Heutzutage werden die Siebüberläufe in der Regel einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) zugeführt, was mit Aufwendungen für Transport und Entsorgungsgebühren verbunden ist.

### 3.1.4 Siebüberlauf aus Kompostierung

In Kompostierungsanlagen wird nach der Rote das verbleibende holzige Material abgesiebt. An diesem haften mineralische Rückstände des Komposts wie Sand und erdige Bestandteile an, wodurch sich der hohe Ascheanteil des Brennstoffs von ca. 47 % (wf) ergibt. Derzeit wird das Material in einer Kehrichtverbrennungsanlage thermisch verwertet.

### 3.1.5 HTC-Kohle aus Klärschlamm (optional)

HTC-Kohle ist eines der Produkte des hydrothermalen Karbonisierungsverfahrens, das in vorliegendem Fall aus Faulschlamm aus Abwasserreinigungsanlagen gewonnen wird. Dieses Substrat steht in Chur aus dem BFE P+D Projekt «Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung» zur Verfügung. Mit der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) wird der Klärschlamm in Abgase, HTC-Kohle und Prozesswasser umgewandelt. Es wurde gezeigt, dass der Energieaufwand zur Entwässerung des



Klärschlamms durch HTC deutlich reduziert wird. Durch HTC entsteht aus Klärschlamm ein Brennstoff mit niedrigem Wassergehalt, was die energetische Verwertung erleichtern würde.

Um eine homogene Stückigkeit zu erhalten, wird die HTC-Kohle im Anschluss an die Pressung ebenfalls brikettiert. In dieser Form könnte das Substrat ebenfalls in im AHT-Vergaser genutzt werden.

### 3.2 Physikalische und Chemische Eigenschaften der Brennstoffe

Die Ergebnisse der Laboranalysen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die folgenden Zusammensetzungen und Eigenschaften der Brennstoffe sind eine Momentaufnahme während der Projektphase, in der die Brennstoffe ausgewählt und charakterisiert wurden. Die Zusammensetzung variiert prozessbedingt von Charge zu Charge. Insbesondere bei den nicht industriell verarbeiteten Brennstoffen auf Basis biogener Abfälle können starke jahreszeitliche Schwankungen der Materialzusammensetzungen auftreten. Für die Chargen, die in den Verbrennungsversuchen (Kapitel 6) verwendet wurden, wurden die wichtigsten Brennstoff-Eigenschaften nochmals bestimmt. Anhand des Vergleiches der Chargen in Tabelle 1 wird sichtbar, wie stark die Chargen variieren. Es ist wichtig kritische Parameter (z.B. Chloranteil) mittels einer Spezifizierung des Brennstoffes und einer Qualitätssicherung im Produktionsprozess zu kontrollieren.

Tabelle 1 Eigenschaften der untersuchten Brennstoffe

Eigenschaft	Wassergehalt	Aschegehalt	Heizwert trocken	C	H	N	S	O (Diff.)	Cl
Brennstofftyp	Gew-%	Gew-% (wf)	MJ/kg (wf)	Gew-% (wf)					
Waldhackschnitzel	7.8*	1.3	18.4	52.5	6.7	0.1	0.01	39.4	0.02**
Holzkorkbriketts A	4.8*	13.3	16.7	40.9	5.0	2.4	0.02	38.4	6.9***
Holzkorkbriketts B	7.0*	6.9	19.2	50.3	6.9	3.5	0.1	32.3	0.21
Holzkorkbriketts C	9.0*	22.7	15.0	41.8	4.8	3.5	0.3	26.9	4.2
Siebüberlauf grün	45.6	5.9	17.5	48.2	6.1	0.9	0.07	38.8	0.48***
Astmaterial	47.4	11.1	16.6	46.6	5.8	0.8	0.02	35.7	0.04***
Siebüberlauf Vergärung (braun) A	53.1	15.7	16.1	44.6	5.5	1.1	0.1	33.0	0.89***
Siebüberlauf Vergärung (braun) B	5.4*	20.7	15.5	41.6	5.5	1.1	0.1	31.0	0.28
Siebüberlauf Kompostierung	5.9*	47.7	10.3	28.7	3.3	0.7	0.1	19.5	0.11
HTC-Kohle	31.5	36.6	17.1	41.0	6.0	1.7	0.5	14.2	0.19***

wf: wasserfreier Zustand

\* Vorgetrocknet

\*\* Werte aus (BFE 2019)

\*\*\* Werte mit Unsicherheit behaftet, da über XRF-Messung erhalten

#### Wassergehalt

Die Substrate «Holzkorkbrikett» und «HTC-Kohle» durchliefen bereits eine Aufbereitung (Trocknung/Brikettierung) und weisen daher eher einen geringen Wassergehalt auf. Anders sieht dies bei den Substraten «Astmaterial», «Siebüberlauf grün» und «Siebüberlauf braun» aus. Diese Substrate weisen einen Wassergehalt von über 45% auf.

Allgemein kann ausgesagt werden, dass sämtliche hier untersuchten Substrate ursprünglich einen zu hohen Wassergehalt für eine energetische Nutzung aufweisen. Eine Trocknung bis zu einem Wassergehalt von 15% ist vor der Brikettierung erforderlich.

#### Aschegehalt

Bis auf die HTC-Kohle handelt es sich grundsätzlich um holzartige Substrate. Beim «Siebüberlauf braun» ist der Aschegehalt mit 15.7% etwas höher. Dies könnte auf Verunreinigungen mit



Sand/Schlamm zurückzuführen sein. Bei der HTC-Kohle aus Klärschlamm ist der anorganische Anteil erwartungsgemäss hoch.

### **Energiegehalt**

Im Folgenden werden die Energiegehalte, falls nicht angegeben, als Heizwert im wasserfreien Zustand ausgedrückt. Holzkorkbriketts weisen einen Energiegehalt von 16.7 MJ/kg auf. Dieser Wert ist etwa 10% niedriger als der Energiegehalt von Holzschnitzeln (18.4 MJ/kg). Naturbelassenes Holz ist das grundlegende Einsatzmaterial für den Vergaser und gilt als Referenzmaterial für die Bewertung der physikalischen und chemischen Eigenschaften.

Die Eigenschaften der Substrate Astmaterial, sowie Siebüberlauf grün und braun sind leicht unterschiedlich. Siebüberlauf grün hat den höheren Energiegehalt (17.5 MJ/kg), während Astmaterial und Siebüberlauf braun einen Energiegehalt von 16.6 MJ/kg bzw. 16.1 MJ/kg haben. Trotz einiger Abweichung sind sie alle durch einen hohen Wassergehalt (> 45%) gekennzeichnet. Ein Trocknungsschritt vor der Vergasung ist erforderlich, sonst fällt der Heizwert deutlich tiefer aus.

Die Ergebnisse der analysierten Hackschnitzel liegen im Bereich der für naturbelassenes Holz typischen Werte. Für Grünschnitzel mit einem Wassergehalt von >40% würde wiederum eine Trocknung nötig.

Die HTC-Kohle weist einen Energiegehalt von 17.1 MJ/kg auf. Der Prozess der hydrothermalen Karbonisierung führt in der Regel zu einer Erhöhung des spezifischen Energiegehaltes im Vergleich zum Ausgangsrohstoff des Prozesses, denn Faulschlamm hat in der Regel einen Energiegehalt von etwa 10.5 MJ/kg.

### **Elementare Zusammensetzung**

Erwartungsgemäss haben die holzartigen Materialien, zu denen sicherlich das Astmaterial, Siebüberlauf grün und braun und die Holzschnitzel zählen, einen hohen Kohlenstoffanteil.

Gemäss Obernberger und Brunner (2015) werden Biomassen mit einem Stickstoffgehalt unter 0.4% als Brennstoff mit niedrigem N-Gehalt eingestuft, während Stickstoffgehalte zwischen 0.4 % und 1 % als mittel und zwischen 1 und 10% als hoch eingestuft werden. Nach dieser Definition gehören Holzkorkbriketts, Siebüberlauf braun und HTC-Kohle zu den Brennstoffen mit hohem N-Gehalt, was bei der Verbrennung zu hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen führen könnte.

In Abbildung 6 sind die zu erwartenden Stickstoffemissionen in Funktion des Brennstoffstickstoffgehaltes dargestellt. Die Darstellung wurde für holzartige Brennstoffe entwickelt und ist somit nur tendenziell auf die hier in diesem Projekt untersuchten Substrate übertragbar. Der Brennstoffstickstoffgehalt liegt bei den Holzkorkbriketts mit 2.4% am höchsten. Je nach Abgasnachbehandlung und Verbrennungstechnologie sind dabei unterschiedliche Emissionen im Abgas nachzuweisen.

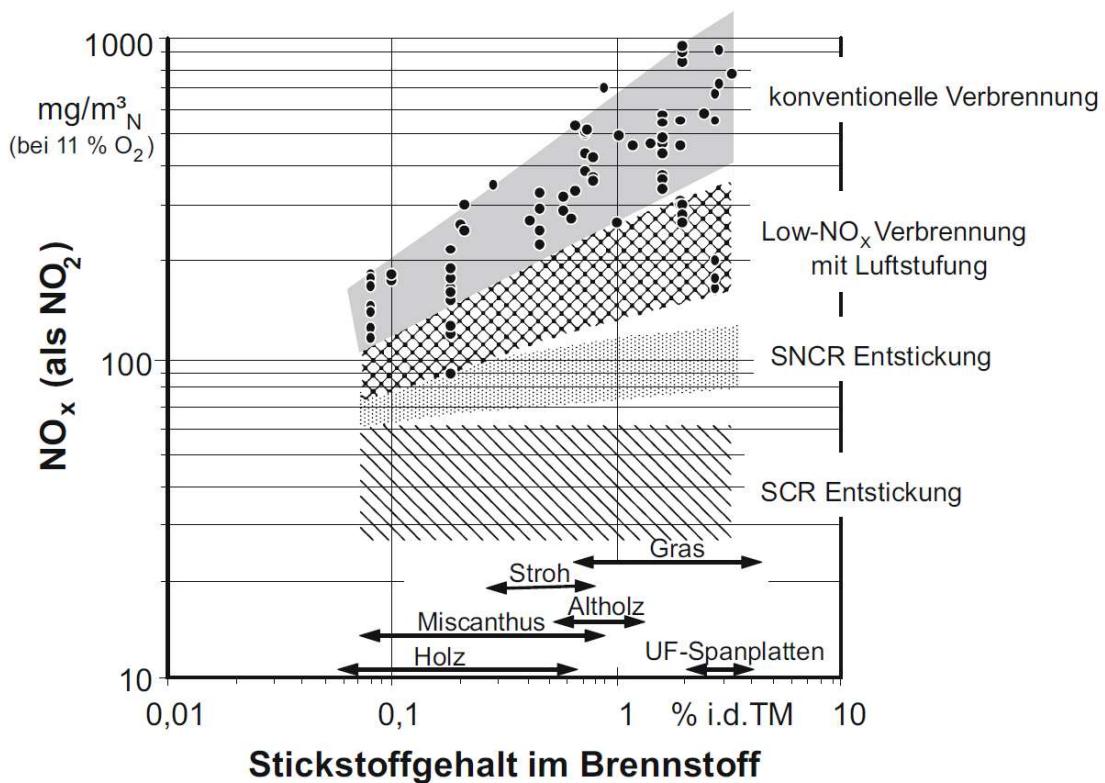


Abbildung 6: Stickstoffoxidemissionen als Funktion des Brennstoffstickstoffgehalts (Kaltschmitt et al. 2016)

Bei der HTC-Kohle wurde mit 1 % der höchste Schwefelgehalt gemessen. Dies führt zu erhöhten Schwefeldioxid-Emissionen, annähernd proportional zum Brennstoff-Schwefelgehalt.

Das Element Chlor (Cl) kommt bei den Holzkorbriketts in einer Konzentration von 70 g/kg vor. Diese hohe Konzentration ist eine direkte Folge des im Material enthaltenen PVC. Chlor wird bei der Verbrennung zum grössten Teil zu HCl umgesetzt. Bei diesem Substrat ist daher mit nicht unerheblichen HCl-Emissionen sowie mit der Bildung polychlorierter Dioxine und Furane zu rechnen. Deshalb werden im späteren Projektverlauf während der Messung bestimmter Substrate Proben für die Dioxinanalyse gesammelt. Auch beim Siebüberlauf grün und braun ist der Chlorgehalt gegenüber Holz deutlich erhöht (Tabelle 1).



## Ascheerweichungstemperatur

Tabelle 2 Ascheerweichungstemperaturen diverser Biomassen

Eigenschaft	Erweichungstemperatur [°C]	Halbkugeltemperatur [°C]	Fliesstemperatur [°C]
Brennstofftyp			
Waldhackschnitzel*	1'350	1'410	1'430
Holzkorkbriketts A	810	870	910
Holzkorkbriketts B	n.g.	n.g.	n.g.
Holzkorkbriketts C	n.g.	n.g.	n.g.
Siebüberlauf grün	n.g.	n.g.	n.g.
Astmaterial	n.g.	n.g.	n.g.
Siebüberlauf Vergärung (braun) A	1'230	1'250	1'270
Siebüberlauf Vergärung (braun) B	n.g.	n.g.	n.g.
Siebüberlauf Kompostierung	n.g.	n.g.	n.g.
HTC-Kohle	1'190	1'270	1'330

\* Literaturwerte aus Kaltschmitt, Energie aus Biomasse, 3. Auflage, S. 609

n.g. : nicht gemessen

Astmaterial besteht nach den bisherigen Untersuchungen praktisch nur aus holzigen Anteilen und ist nur minimal verschmutzt. Siebüberlauf grün besteht ebenfalls zu einem erheblichen Anteil aus Holz, kann aber auch Verunreinigungen mit Kunststoff enthalten. Da für die Ascheerweichungstemperatur von Holz in der Literatur genügend Werte zur Verfügung stehen, wurde auf eine Analyse für Hackschnitzel, Astmaterial und Siebüberlauf grün verzichtet.

Holz ist relativ unkritisch bezüglich der Ascheerweichungstemperatur. Im Gegensatz dazu können die Holzkorkbriketts mit einer Erweichungstemperatur von 810 °C als kritisch eingestuft werden.

### 3.3 Brennstoffpotenziale

Die Ergebnisse der Massen- und Energiepotenziale, der möglichen CO<sub>2</sub>-Reduktion sowie der Brennstoffkosten der Substrate sind in Tabelle 3 dargestellt.



Tabelle 3 Potenziale der Brennstoffe für die Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme

Brennstofftyp		Theoretisches Potenzial**		Nachhaltiges Potenzial**		Prozesswärme Erzeugung		geschätzte Brennstoffkosten	
		Frischsubstanz	Primärenergieinhalt	Frischsubstanz	Primärenergieinhalt	verfügbare Energie	CO2-Verminderung	Preisspanne	
		t/a	GJ/a	t/a	GJ/a	GJ/a	tCO2/a	CHF/t <sub>FM</sub>	
Untersuchte Brennstoffe	Waldenergieholz*	13'503'000	107'526'815	3'301'000	26'119'000	18'805'680	1'285'473	170	240
	Holzkorkbriketts	1'564	24'740	1'564	24'740	17'813	1'218	-100	-50
	Siebüberlauf Vergärung (grün)	2'321	19'488	1'857	15'590	11'225	767	-75	-25
	Siebüberlauf Vergärung (braun)	13'154	82'258	10'523	65'806	47'380	3'239	-75	-25
	Siebüberlauf Kompostierung	52'500	355'871	42'000	284'697	204'982	14'012	-75	-25
	HTC-Kohle aus Klärschlamm	402'564	4'416'670	80'513	883'334	636'001	43'474	0	50
Andere Brennstoffe	Altholz <sup>b</sup>	998'000	14'400'000	817'000	11'713'000	-	-	-	-
	Restholz <sup>b</sup>	2'463'000	23'960'000	756'000	7'620'000	-	-	-	-
	Flurholz <sup>b</sup>	1'213'000	9'400'000	611'000	4'754'000	-	-	-	-

\* Werte des theoretischen und nachhaltigen Potenzials aus (Thees et. al, 2017).

\*\* Das theoretische und nachhaltige Potenzial entspricht der Definition nach (Thees et. al, 2017)



### 3.3.1 Waldenergieholz

Waldenergieholz ist in der Schweiz eine der Biomassekategorien mit dem grössten theoretischen Potenzial (107 PJ/a) und zusätzlichem nachhaltigen Potenzial (26 PJ/a) (Thees et al., 2017). Aufgrund dieser grossen Verfügbarkeit von Waldenergieholz wird geschätzt, dass die Verwendung von Holz für Hochtemperaturprozesswärme zu einer theoretischen Reduzierung von 1'285'473 t CO<sub>2</sub>/a führen würde. Im Gegensatz zu Biomasse-Reststoffen hat Holz in Form von Holzhackschnitzeln einen Marktpreis, der weniger schwankt. Trockene Holzhackschnitzel haben einen Preis zwischen 170 und 240 CHF/t.

### 3.3.2 Holzkorkbriketts

Holzkorkbriketts fallen bei der Firma Li&Co das ganze Jahr über mit etwa 30 Tonnen pro Woche an. Dies entspricht ca. 1'560 Tonnen pro Jahr. Basierend auf dem frischen Material (Wassergehalt von 6.8%) wird ein Heizwert von 16.7 MJ/kg für Holzkorkbriketts verwendet und entspricht somit einem theoretischen energetischen Potenzial von rund 24'740 GJ pro Jahr. Es wird angenommen, dass das nachhaltige Potenzial gleich dem theoretischen Potenzial ist. Die Verwendung dieses Ausgangsstoffes für die Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme würde zu einer geschätzten Reduzierung von 1'218 t CO<sub>2</sub>/a führen. Holzkorkbriketts haben potenzielle Brennstoffpreise von -100 bis -50 CHF/t<sup>2</sup>. Diese eher konservative Spanne basiert auf den aktuellen Entsorgungskosten und berücksichtigt nicht einen möglichen Wertanstieg, der sich aus der effektiven Verwertung als Prozesswärmebrennstoff ergeben würde.

### 3.3.3 Kompogas Siebüberlauf

Es fallen jährlich ca. 15'500 Tonnen Siebüberläufe in Kompogasanlagen an. Es wurde angenommen, dass Siebüberlauf grün einen Anteil von 15% und Siebüberlauf braun einen Anteil von 85% der gesamten Siebüberläufe ausmachen. Basierend auf dem frischen Material (Wassergehalt von 46%) wird ein Heizwert von 8.4 MJ/kg für den Siebüberlauf grün verwendet und entspricht somit einem energetischen Potenzial von rund 19'500 GJ pro Jahr. Bei einem Heizwert von 6.2 MJ/kg (Wassergehalt von 53%) entspricht der Siebüberlauf braun somit einem energetischen Potenzial rund 82'000 GJ pro Jahr. Es wird angenommen, dass das nachhaltige Potenzial von Siebüberlauf grün und braun 15'600 GJ/a bzw. 65'800 GJ/a beträgt. Die Verwendung von Siebüberlauf grün und braun für die Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme würde zu einer geschätzten Reduzierung von 767 bzw. 3'239 t CO<sub>2</sub>/a führen. Hierbei ergibt sich bei Siebüberlauf ein potenzieller Gewinn, wenn man annimmt, dass die Entsorgungskosten zwischen -25 und -75 CHF/t<sup>2</sup> betragen. Ähnlich wie bei Holzkorkbriketts basiert die Preisspanne auf den aktuellen Entsorgungskosten und berücksichtigt nicht einen möglichen Wertanstieg, der sich aus der effektiven Verwertung als Prozesswärmebrennstoff ergeben würde<sup>3</sup>.

### 3.3.4 HTC-Kohle

Das energetische Potenzial von HTC-Kohle basiert daher auf dem Potenzial von Klärschlamm in der Schweiz. Basierend auf einer entwässerten Kohle (Wassergehalt von 31.5%) wird ein Heizwert von 17.1 MJ/kg für die HTC-Kohle verwendet und entspricht somit einem energetischen Potenzial von rund 4.4 PJ pro Jahr. Es wird angenommen, dass das nachhaltige Potenzial rund 636'500 GJ/a beträgt. Aufgrund dieser grossen potenziellen Verfügbarkeit von HTC-Kohle wird geschätzt, dass die Verwendung von HTC-Kohle für Hochtemperaturprozesswärme zu einer Reduzierung von 43'474 t CO<sub>2</sub>/a führen würde. Für HTC-Kohle, potenziellen Brennstoffpreisen von 0 bis 50 CHF/t wurden geschätzt.

---

<sup>2</sup> Die bisherigen entfallenden Entsorgungskosten sind als negative Kosten (= Erträge) für den Betreiber der Anlage ausgewiesen

<sup>3</sup> Die bestehende Konkurrenzsituation wird daher den lokalen Preis des Materials beeinflussen



### 3.3.5 Sonstige Biomassen

Bei den untersuchten Biomassen wie Holzkorkbriketts oder Kompogas-Rückständen handelt es sich um spezifische Biomasse, die in viel breitere Biomassekategorien zugeordnet werden können. In der Studie der WSL werden die Ressourcen an verholzten Biomassen in vier Kategorien unterteilt: Waldholz, Flurholz, Restholz und Altholz. Sollte die Durchführbarkeit des Vergasungs-Verbrennungsprozesses nachgewiesen werden, würde er damit den Weg für die energetische Nutzung vieler Biomassearten öffnen.

## 4 AP 2: Design und Aufbau der Versuchsanlage

### 4.1 Anlagekonzept

Die Anlage diente ursprünglich zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung. Das im Vergaser erzeugte Rohgas enthält Staub und Teer und muss deshalb vor der Nutzung im Gasmotor durch eine Gasreinigung aufbereitet werden.

#### 4.1.1 Brennstoffzufuhr

Die Brennstoffzufuhr erfolgt über zwei Förderbänder aus dem Brennstoffbunker.

#### 4.1.2 Vergaser

In Doppelfeuervergasern wird das Vergasungsmittel an mehreren Stellen eingebracht. Das Prinzip des Doppelfeuervergasers kann als eine Kombination aus Gleichstrom- und Gegenstromvergaser angesehen werden. Der Hauptteil des Vergasers funktioniert jedoch wie ein Gleichstromvergaser. Die erwarteten Vorteile dieser Bauart sind ein geringer Teergehalt des Produktgases und eine hohe Kohlenstoff-Konversion (geringer Kohlenstoffgehalt in der Asche) (FNR 2014). Abbildung 7 zeigt ein Schema eines Doppelfeuervergasers, wie er im Projekt eingesetzt wurde.

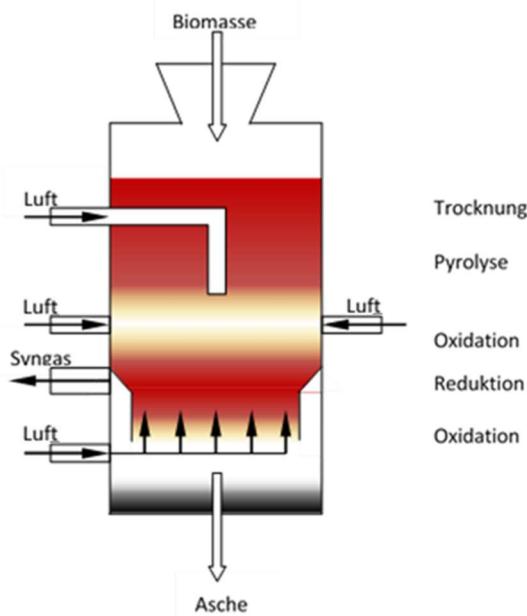


Abbildung 7 Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip des A.H.T. Doppelfeuervergasers

Der A.H.T.-Doppelfeuervergaser hat eine Bruttolleistung von ca. 900 kW (Die Energiemenge im Synthesegas ist noch um den Vergaserwirkungsgrad reduziert und beträgt ca. 720 kW). Der Vergaser weist zwei Reaktionszonen auf: In der oberen Zone wird das Einsatzmaterial pyrolysiert, wodurch eine Art Holzkohle entsteht, die für die fast vollständige Vergasung in der unteren Oxidationszone sehr gut



geeignet ist. Drei Lufteinlässe (anstelle von einem) führen der jeweiligen Oxidationszone den benötigten Sauerstoff aus der Umgebungsluft zu. So erzeugt das Doppelfeuer-Prinzip ein teer- und aschearmes Synthesegas.

Der Vorteil aus der Kombination von zwei Vergasungsverfahren ist, dass die Bedingungen des Abbrands an den Einsatzstoff angepasst werden können.

Darüber hinaus benötigt der A.H.T.-Vergaser aufgrund der höheren Kohlenstoffumwandlungsrate weniger Einsatzmaterial pro kWh, was ihn effizienter macht und ein reines Produktgas und nahezu reine Asche freisetzt. Auch das Verschlackungsverhalten ist Aufgrund der Möglichkeit der Dosierung der Luft an verschiedenen Stellen besser. Daraus ergeben sich weniger strenge Anforderungen an die Konditionierung sowie die Art des Einsatzmaterials und darüber hinaus ein breiteres Spektrum an Einsatzmöglichkeiten wie die hier beschriebenen, da Qualitätsschwankungen den Vergasungsprozess nicht so stark beeinflussen.

#### Anpassungsmöglichkeiten

Für die Einsatzstoffe, die hier verwendet werden, sind Anpassungen am Vergaser vorgesehen. So besteht die Möglichkeit die Zone der absteigenden Vergasung auf drei Längen (1250, 950, 659 mm) einzustellen. Damit kann die Verweilzeit des Einsatzstoffes in der Zone der absteigenden Vergasung eingestellt werden. Zusätzlich kann die Verteilung der Luft über eine der drei oberen Düsenreihen und der unteren Luftzugabe eingestellt werden.

Im unteren Bereich kann zum einen Luft über den Ascherost zum anderen seitlich unterhalb des Ascherostes zugegeben werden.

Somit können die Durchlaufzeiten und Verweilzeiten des Einsatzstoffes eingestellt werden.

Zusätzlich ist die Möglichkeit vorgesehen, dass die Entaschung angepasst werden kann. Dazu sind die Höhe des Ascherostes und der Spalt des Ascherostes verstellbar. Dies ist notwendig, wenn sich die Parameter des Einsatzstoffes insbesondere in Bezug auf den Aschegehalt aber auch das Ascheerweichungsverhalten ändern. Der Ascherost kann um 150 mm verstellt werden und somit der Spalt für den Ascheaustrag zwischen 20 mm und 170 mm eingestellt werden. Die Häufigkeit des Entaschens ist flexibel in der Steuerung hinterlegt und kann dort beliebig eingestellt werden.

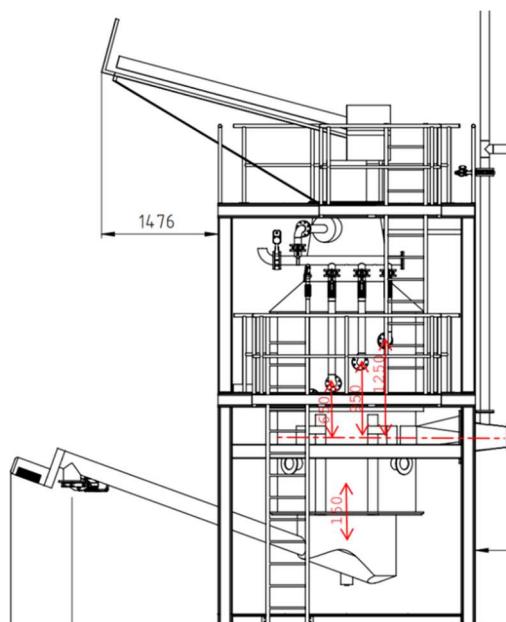




Abbildung 8: Darstellung der möglichen Rost- und Luftzufuhreinstellung des A.H.T. Doppelfeuervergasers

#### 4.1.3 LowNOx-Brenner

Beim Brenner handelt es sich um ein Produkt der Firma CharcoTec in den Niederlanden, welche sich auf die Entwicklung von LowNOx-Brennern basierend auf flammenloser Verbrennungstechnologie spezialisiert hat.

Der LowNOx -Brenner hat eine maximale thermische Nennleistung von ca. 100 kW entsprechend einem Produktgasstrom von etwa 100 Nm<sup>3</sup>/h. Er besitzt einen Startbrenner, der mit Erdgas oder Propan betrieben wird. Hiermit wird die Brennkammer auf die für die flammenlose Oxidation erforderliche Betriebstemperatur aufgeheizt. Erst bei genügend hoher Brennkammertemperatur kann auf Produktgasbetrieb im flammenlosen Modus umgestellt werden.

Das heisse Produktgas wird mittels Saugzuggebläse am Ende der Abgasleitung aus dem Vergaser entnommen und in den Brenner eingeleitet. Das Produktgas muss für die Verbrennung nicht gereinigt werden. Es wird bis zum Eintritt in den Brenner in wärmeisolierten Leitungen geführt. Dadurch sollen die enthaltenen Öle und Teere in der Gasphase bleiben und im Brenner verbrannt werden. Die Verbrennungsluft wird ebenfalls vom Brenner aus der Umgebung angesaugt (Abbildung 9). Am Eintritt des Gasanschlusses ist ein Regelventil angeordnet, womit der Gasdurchfluss eingestellt werden kann. Die Luftmenge wird über eine Klappe geregelt.

Im Brenner findet die Verbrennung des Produktgases als flammenlose Oxidation statt. Die Brennkammer ist innen vollkommen mit keramischer Isolation ausgekleidet, um Wärmeverluste zu minimieren. Die Verweilzeit in der Brennkammer liegt bei etwa einer Sekunde. Das Abgas wird anschliessend mit frischer Aussenluft verdünnt, um es unter die maximal erlaubte Temperatur des Saugzuggebläse zu kühlen.

Für die Durchführung der Versuche wurde der Brenner an einer bestehenden Vergasungsanlage nachgerüstet. Diese wiederum wurde ursprünglich für den Betrieb mit einem BHKW ausgelegt, dessen Gasverbrauch grösser ist als die des verfügbaren Brenners. Daher ist für den Vergasungs-Verbrennungs-Betrieb zusätzlich die Fackel oder das BHKW mit reduzierter Leistung zu nutzen, um den Vergaser in seinem Betriebsfenster betreiben zu können.

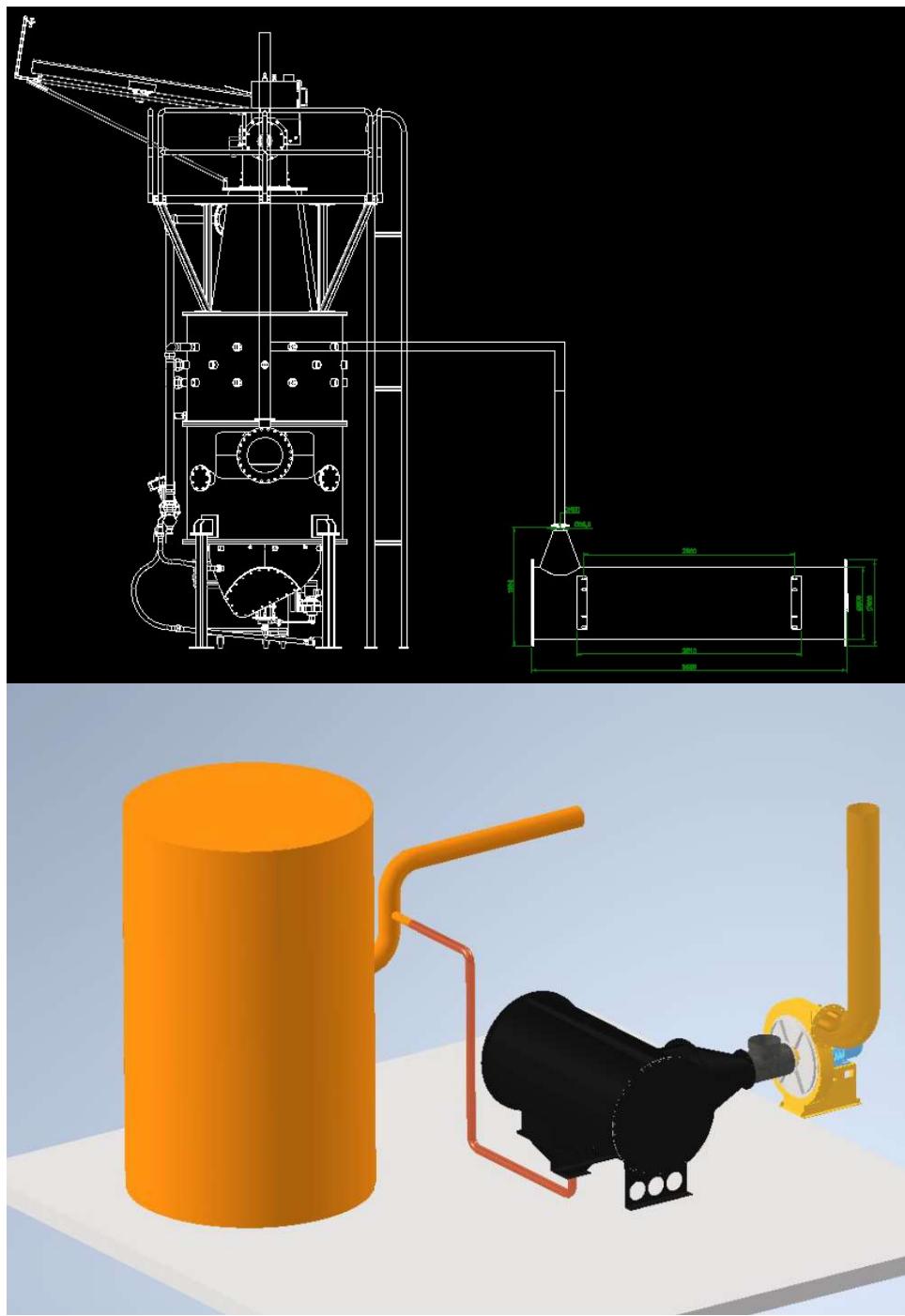


Abbildung 9: Vereinfachte Prozesslayouts von Vergasung und Verbrennung



#### 4.1.4 R&I-Schema

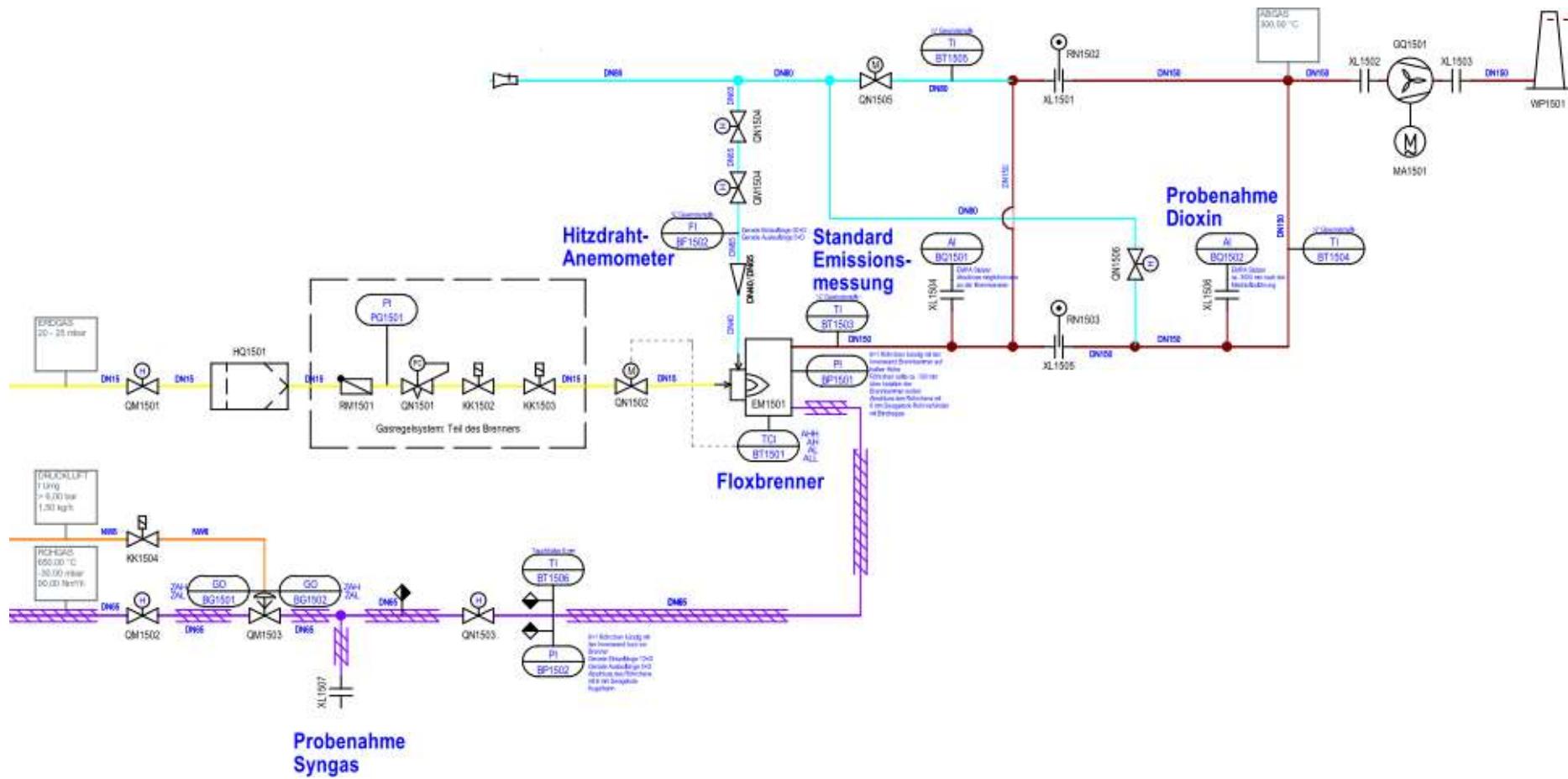


Abbildung 10 : R&I-Schema des Verbrennungsteils der Anlage



#### 4.1.5 PCDD/PCDF-Messung

Bei chlorhaltigen Substraten soll das Verbrennungsabgas auf polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/PCDF) untersucht werden. Diese Stoffe werden bevorzugt im Temperaturbereich zwischen 200 und 400 °C in Abgasen aus chlorhaltigen Brennstoffen gebildet. In der Anlage gibt das Verbrennungsabgas seine Wärme jedoch nicht in einem Wärmeaustauscher an einen Wärmeträger ab, sondern es wird durch Einmischung von Kaltluft rasch auf eine Temperatur unter 250 °C abgekühlt. Dies ist erforderlich, um den Ventilator am Ende der Anlage nicht durch hohe Temperatur zu beschädigen. Bei dem Mischvorgang wird das Dioxin-relevante Temperaturfenster schnell durchlaufen, so dass sich kaum Dioxine bilden können. Bei einer späteren Nutzung in industriellen Prozessen ist jedoch anzunehmen, dass das Temperaturfenster zwischen 200 und 400 °C langsamer durchlaufen wird und damit genug Verweilzeit für die Bildung von Dioxinen zur Verfügung steht. Um in der Anlage Dioxin-Bildungsbedingungen zu erreichen, war ursprünglich vorgesehen, einen Teil der Verbrennungsabgase mit so viel Kaltluft zu mischen, dass die Mischtemperatur etwa 300 °C beträgt. Diese Mischung sollte das Bypassrohr mit entsprechender Verweilzeit durchströmen und dann wieder dem abgekühlten Hauptabgasstrom zugemischt werden. Die Probenahme zur Dioxinbestimmung wird am Ende des Bypassrohres durchgeführt. In Abbildung 11 ist diese Massnahme schematisch dargestellt.

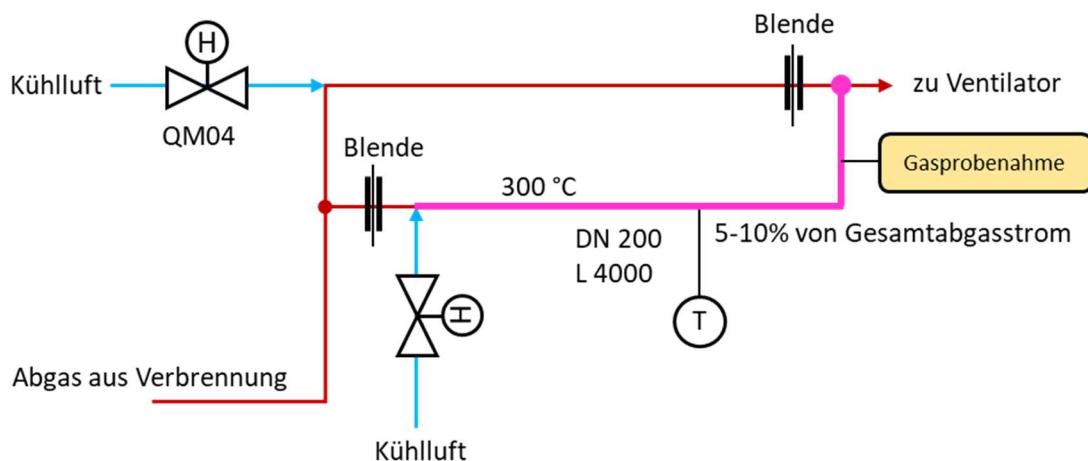


Abbildung 11: Bypassströmung zur Erzeugung von Dioxin-Bildungsbedingungen (erste Version)

In ersten Verbrennungstests im Dezember 2022 hat sich dann gezeigt, dass der ganze Abgasstrom durch die Dioxin-Strecke geleitet werden kann, da das Abgas schon durch die Wärmeabgabe der unisolierten Rohrleitung an die Umgebung merklich abgekühlt wird. Mit der über die manuell betätigten Klappe zugeführten Kühlluft konnten sowohl Dioxin bildende Temperaturen (300 – 400 °C) als auch für das Gebläse verträgliche Temperaturen (<250 °C) eingestellt werden (Abbildung 12).

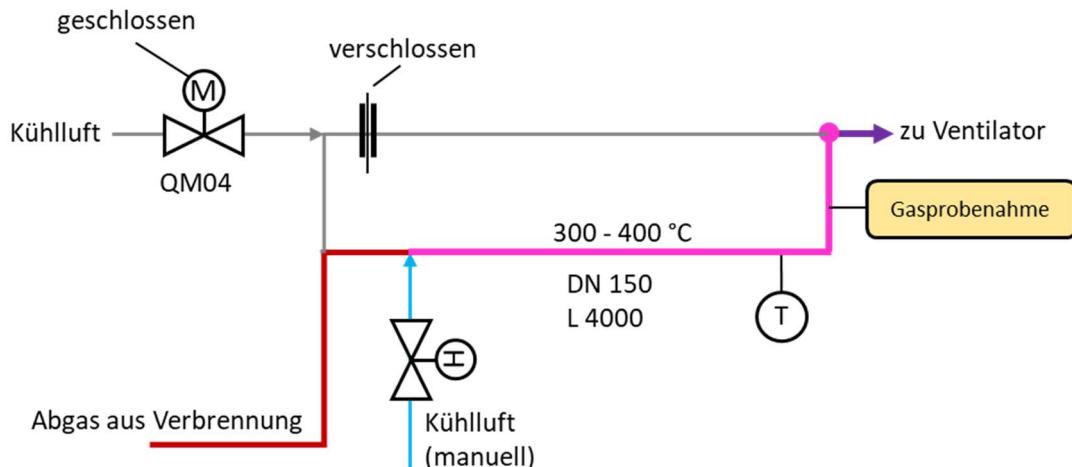


Abbildung 12: Strömungsstrecke zur Erzeugung von Dioxin-Bildungsbedingungen (aktuelle Version)

#### 4.1.6 Instrumentierung und Datenerfassung

Um an der Anlage die Verbrennungseigenschaften und Emissionen der aus den verschiedenen Substraten erzeugten Gase untersuchen zu können, mussten Prozesswerte wie Durchflüsse, Temperaturen, Drücke, Gaszusammensetzungen etc. gemessen und aufgezeichnet werden. Aus dem R&I-Schema (Abbildung 10) sind die Messstellen und Messgrößen ersichtlich.

Die Anschlüsse der Messsensoren und Gasentnahmesonden an der Anlage mussten gasdicht ausgeführt werden. Um zu verhindern, dass brennbare und eventuell giftige Gase aus der Anlage austreten können, wird diese im Unterdruck betrieben. Bei Undichtigkeiten könnte daher Luft eingesaugt werden und zur Entzündung des Brenngases führen. Die Probenahme mittels Gasentnahmesonden benötigte deshalb entsprechend starke Messgaspumpen, um gegen den Unterdruck saugen zu können.

Die Erfassung der Prozessdaten zur Darstellung und Speicherung erfolgte durch Messmodule von National Instruments.

Die Verarbeitung der Messsignale zur Darstellung und Speicherung erfolgt mit der Software LabView von National Instruments.

#### 4.1.7 Risikoanalyse

Für die Vergasungs-Verbrennungs-Anlage wurde eine Risikobeurteilung analog DIN EN ISO 12100 durchgeführt. Da es sich bei dieser Risikoanalyse um vertrauliche und betriebsinterne Informationen der Firma AHT Syngas handelt, wurde für die Risikoanalyse ein separates Dokument erstellt, welches nicht veröffentlicht werden darf.



## 5 AP 3: Inbetriebnahme

### 5.1 Anfahrprozess

Im Dezember 2022 konnte die Verbrennungsanlage in Betrieb genommen werden.

Zur Inbetriebnahme der Verbrennung muss zuvor der Vergaser auf Betriebsbedingungen gebracht werden. Das beim Startvorgang des Vergasers erzeugte Produktgas wird dabei zunächst über die Fackel abgeleitet und sicher verbrannt. Wenn der Vergaser seine Standardbetriebsbedingung erreicht hat, wird der Erdgasbrenner gestartet. Die Erdgasflamme brennt hierbei mit sichtbarer Flamme, wodurch eine sehr stabile Flamme erreicht wird, jedoch mit deutlich höheren Emissionen im Vergleich zur flammlosen Verbrennung. Nach Erreichen einer genügend hohen Temperatur in der Brennkammer wird Produktgas aus dem Vergaser zugeführt und der Erdgasstrom entsprechend gedrosselt, bis die Verbrennung nur noch mit Produktgas läuft.

### 5.2 Ergebnisse und Massnahmen

Leider konnte in den ersten Tests im Dezember 2022 weder mit Erdgas noch mit Holzgas ein kontinuierlich stabiler Betrieb der Anlage erreicht werden.

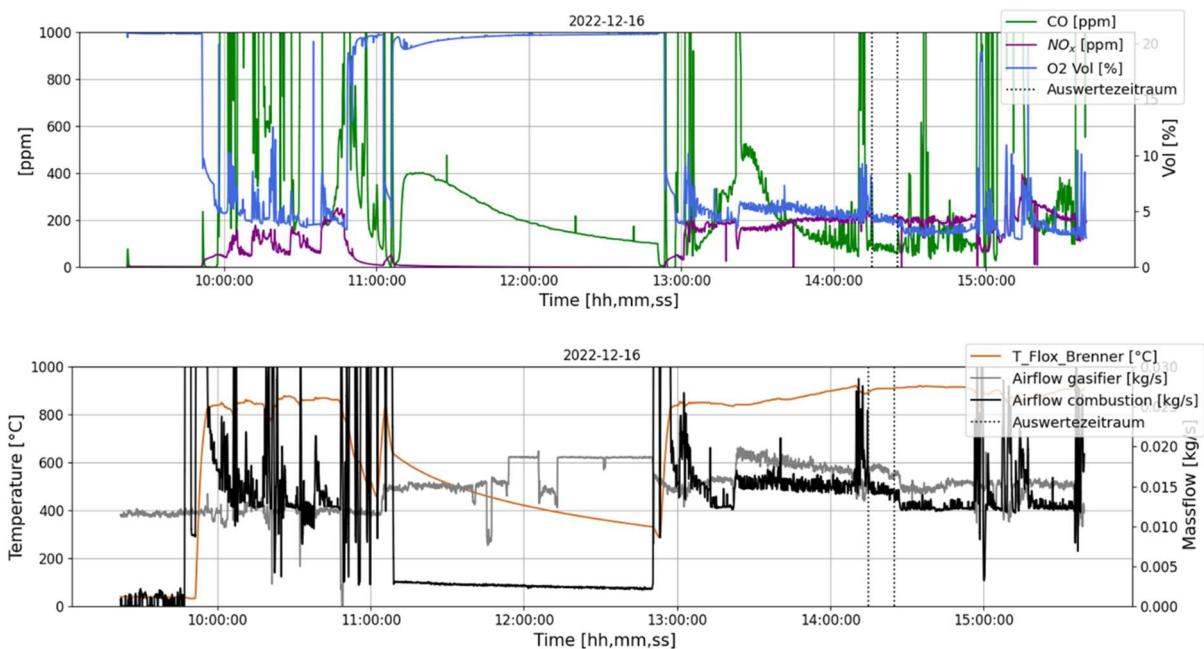


Abbildung 13: Testverlauf mit Holzgas am 16.12.2022

Als Grund für die starken Schwankungen wurden folgende Ursachen ermittelt:

- Gleichzeitige Ansteuerung der Regelorgane für Produktgasmenge, Verbrennungsluftmenge und Kühlluftmenge mit der Brennkammertemperatur als Regelgröße
- Kein gleichzeitiger Betrieb von Fackel und LowNOx-Verbrennung. Bei zu niedriger oder zu hoher Temperatur in der Brennkammer wurde die Gaszufuhr komplett von Produktgas auf Erdgas umgestellt und das Produktgas auf die Fackel geleitet.



Zur Abhilfe wurden mehrere Massnahmen durchgeführt:

- Paralleler Betrieb von Fackel und LowNOx-Brenner. Dafür muss sichergestellt werden, dass von der Fackel keine Luft in den Vergaser gelangen kann.
- Manuelle Einstellung des Gasstroms in den Brenner mittels Handventil.
- Brennkammertemperatur wird nur über die Verbrennungsluftregelklappe von der Steuerung geregelt.

Wie bereits erwähnt, wurde auch eine Änderung der Durchströmung der Dioxinstrecke beschlossen (Abbildung 12).

Alle Modifikationen an der Anlage wurden bis März 2023 durchgeführt und getestet. Die Anlage läuft deutlich stabiler als im ersten Inbetriebnahmetest. Es gibt Phasen mit sehr konstanten Werten abwechselnd mit instabilen Phasen mit leichten Regelschwankungen. Der Brenner war eigentlich für maximal 100 kW thermische Leistung ausgelegt. Die Verbrennung konnte jedoch nur mit maximal 50 kW über mehrere Stunden stabil betrieben werden kann. Die Ursache für die auftretenden Instabilitäten konnte nicht ermittelt werden. Die hierdurch zu geringe Gasabnahme vom Vergaser kann durch gleichzeitigen Betrieb der Fackel und des Brenners ausgeglichen werden.

#### 5.2.1 Analysen von Produktgas

Zur Analyse des Produktgases wird Gas, das für das BHKW gereinigt wurde und einen leichten Überdruck zur Atmosphäre besitzt, in spezielle Gasbeutel abgefüllt.

#### 5.2.2 Analysen von Abgas

Das Abgas wird am Austritt aus der Brennkammer sowie am Ende der Dioxinstrecke, verdünnt mit Kühlluft, analysiert. Es werden mobile Messgeräte von MRU benutzt. Zur gravimetrischen Staubmessung über Filter wird Abgas ebenfalls am Brenneraustritt entnommen. Die Probenahme für die Dioxin/Furan- und PAK-Bestimmung wird gemäss EN 1948-1 durchgeführt. In Tabelle 4 sind die Messmethoden für die analysierten Substanzen aufgeführt.

Tabelle 4: Übersicht über die gemessenen Werte im Abgas

Parameter	Messprinzip	Messgerät / Methode
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	paramagnetisch	Gas-Analysator MRU Vario luxx
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	NDIR <sup>a</sup>	Gas-Analysator MRU Vario luxx
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU Vario luxx
Schwefeloxide (SO <sub>2</sub> )	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU Vario luxx
Kohlenmonoxid (CO)	elektrochemisch + NDIR <sup>a</sup>	Gas-Analysator MRU Vario luxx
Methan (CH <sub>4</sub> )	NDIR <sup>a</sup>	Gas-Analysator MRU Vario luxx
Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)	GC-HRMS (extern)	Gekühltes-Absaugrohr-Methode

<sup>a</sup> Nichtdispersive Infrarot-Photometrie



## 6 AP 4: Substrat-Versuche

### 6.1 Substrate

Von den ursprünglich geplanten Substraten wurden in dieser Testreihe folgende Substrate aufbereitet (trocken brikettiert) und getestet:

- LICO-Holzkorkbriketts
- Siebüberlauf aus der Vergärung (Siebüberlauf braun), brikettiert
- Siebüberlauf aus der Kompostierung, brikettiert

Der Siebüberlauf grün aus der Anlieferung für die Vergärung wurde durch den Siebüberlauf aus der Kompostsiebung ersetzt. HTC-Kohle war nur optional geplant und wurde nicht getestet. Tabelle 6 führt die Zusammensetzungen der getesteten Brennstoffchargen auf. Bei den Siebüberläufen sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass diese Brennstoffe starken saisonalen und auch regionalen Schwankungen unterliegen, sodass diese Werte als Momentaufnahme der vorhandenen Charge zu verstehen sind. Bei den Holzkorkbriketts wurde aufgrund der optimierten Produktionsbedingungen beim Erzeuger und den damit einhergehenden Veränderungen in der Brennstoffzusammensetzung die neue Charge B für die Versuche ausgewählt (vgl. Kap. 3.1.2).

Tabelle 5 Verwendete Substrate in brikettierter Form

LICO-Holzkorkbriketts	Siebüberlauf Vergärung	Siebüberlauf Kompostierung
		

Tabelle 6: Brennstoffeigenschaften der Substrate für die Verbrennungsversuche

Eigenschaft	Einheit	Holz	Holzkorkbriketts B	Siebüberlauf Vergärung (braun) B	Siebüberlauf Kompostierung
Wassergehalt	Gew-%	7.8	7.0	5.4	5.9
Aschegehalt 550°C	Gew-% (wf)	1.3	6.9	20.7	47.7
Kohlenstoff	Gew-% (wf)	52.5	50.3	41.6	28.7
Wasserstoff	Gew-% (wf)	6.7	6.9	5.5	3.3
Stickstoff	Gew-% (wf)	0.1	3.5	1.1	0.7
Schwefel	Gew-% (wf)	0.01	0.1	0.1	0.1
Chlor	Gew-% (wf)	n.g.	0.21	0.28	0.11

wf: wasserfreier Zustand

n.g.: nicht gemessen



## 6.2 Ergebnisse

Die Tests konnten mit allen angelieferten Substraten erfolgreich durchgeführt werden. Über die für die Staub- bzw. Dioxinmessungen erforderlichen Testlaufzeiten von jeweils 5 bis 6 Stunden war nach dem Start und der Einregulierung ein stabiler Betrieb möglich.

### 6.2.1 Übersicht

Die folgend angeführten Grenzwerte dienen der Einordnung der Emissionen. In der folgenden Tabelle sind die Mittelwerte der Messungen aus den Testläufen eingetragen. Die LRV-Grenzwerte nach LRV Art. 74 Anhang 2 Ziffer 742 (Anlagen zum Verbrennen von biogenen Abfällen und Erzeugnissen der Landwirtschaft) von 500 mg/Nm<sup>3</sup> für CO-Emissionen werden sehr gut eingehalten. Die NO<sub>2</sub>-Emissionen liegen im erlaubten Bereich bis 250 mg/Nm<sup>3</sup>, wenn auch nur knapp für den Siebüberlauf aus der Vergärung. Grund für die erhöhten NO<sub>x</sub>-Emissionen könnte ein höherer Stickstoffgehalt im Brennstoff sein. Überraschend ist, dass der LICO-Brennstoff nur unwesentlich höhere Stickoxidemissionen hat, obwohl dieser (gemäss Tabelle 6) deutlich mehr Stickstoff enthält als Holz. Die Staubemissionen liegen, ausser für Siebüberlauf aus der Kompostierung, im erlaubten Bereich. Bei diesem Substrat war nach dem Test ein weisser Belag auf den von Abgas beaufschlagten Flächen aufgefallen.

Für die SO<sub>2</sub>-, PCDD/F-, und PAK-Emissionen gibt es keine Grenzwerte für biogene Abfälle. Zur Einordnung werden die gemessenen Emissionswerte für den Brennstoff Holz als Vergleich herangezogen. Die Werte für SO<sub>2</sub> liegen bei den LICO-Holzkorkbriketts B in der gleichen Grössenordnung wie bei Holz. Für den Siebüberlauf aus der Vergärung sind die Werte im Vergleich um den Faktor 6.4 höher, bei Siebüberlauf aus der Kompostierung um den Faktor 3. Die PCDD/F-Emissionen zeigen ein ähnliches Bild, wobei die Erhöhungs faktoren für die Siebüberläufe bei 4.7 (Vergärung) und 14 (Kompostierung) liegen. Dies bedeutet, dass mit der vorhandenen Anlage bei der Verwendung der Siebüberläufe trotz gleichen Schwefelgehalts wie bei den Holzkorkbriketts mit erhöhten PCDD/F-Emissionen gerechnet werden muss. Dies liesse sich durch Anpassungen des Anlagendesigns optimieren. Die gemessenen Werte der PAK-Emissionen liegen bei allen betrachteten Brennstoffen deutlich unter denen von Holz.

Tabelle 7 Mittelwerte der Vergasungs-/Verbrennungstests

Bezeichnung	Einheit	LRV 742*	Holz	Holzkorkbriketts B	Siebüberlauf Vergärung (braun) B	Siebüberlauf Kompostierung
Massenstrom Vergasungsluft	g/s		12.6	12	11.2	9.1
Massenstrom Verbrennungsluft	g/s		22.3	22.7	21.2	22
O <sub>2</sub> im Abgas	Vol.-%		5.0	5.3	8.2	7.4
Luftüberschusszahl $\lambda$ Lambda	-		1.65	1.70	2.33	2.13
Thermische Leistung (Verbrennung)	kW		51	50	35	39
Temperatur Brennkammer	°C		929	929	927	929
Temperatur Dioxinstrecke	°C		311	299	303	312
CO (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	500	25	14	30	50
NO <sub>x</sub> (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	250*	111	156	249	163
SO <sub>2</sub> (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>		21	19	134	63
PCDD/F (inkl. BG)** (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	ng/Nm <sup>3</sup>		0.052	0.055	0.243	0.729
PAK (inkl. BG) (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	µg/Nm <sup>3</sup>		18.5	0.7	4.35	1.69
Staub (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	20	2.31	5.74	9.55	29.5

\* LRV-Grenzwerte nach LRV Art. 74 Anhang 2 Ziffer 742 (Anlagen zum Verbrennen von biogenen Abfällen und Erzeugnissen der Landwirtschaft). Gilt, wenn ein NOx-Massenstrom von 2'500 g pro Stunde überschritten wird, was in diesem Fall nicht zutrifft.  
\*\* I-TEQ (NATO/CCMS)

### 6.2.2 Test mit Holz

Zum Vergleich mit den zu untersuchenden Substraten wurde auch ein Test mit dem etablierten Brennstoff Holz durchgeführt. Der Test fand am 09.03.2023 von 14:30 bis 20:30 statt. Abbildung 14 zeigt den Verlauf des Restsauerstoffgehalts im Abgas, sowie die CO- und NOx-Emissionen korrigiert auf 13% O<sub>2</sub> im Abgas. Die Verbrennung konnte über die gesamte für die Dioxin-Probesammlung erforderliche Zeit von 6 Stunden ausreichend stabil betrieben werden.

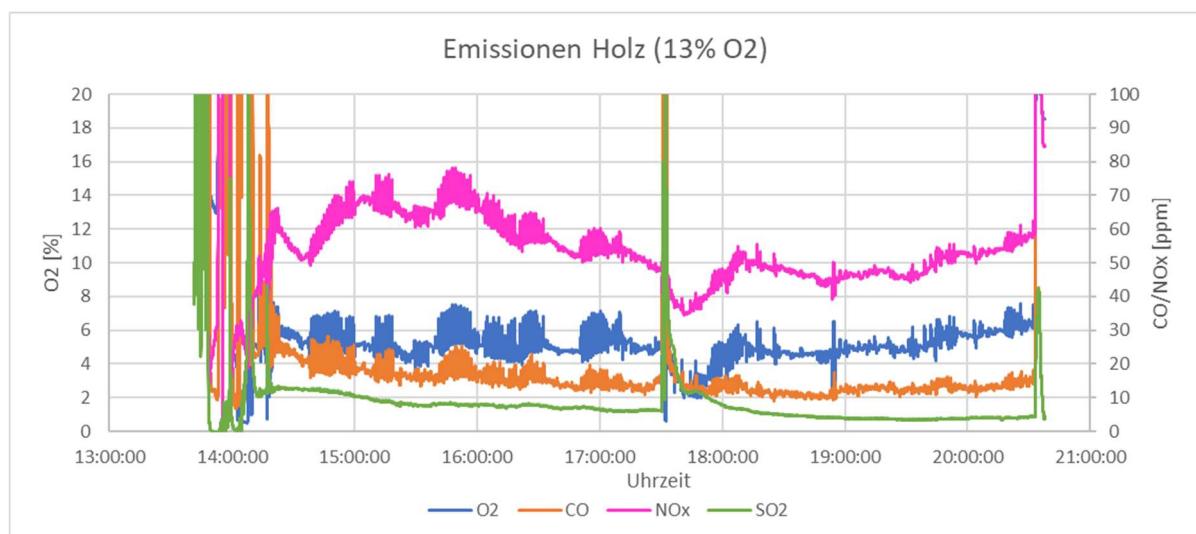


Abbildung 14: Testverlauf von O<sub>2</sub>-Gehalt und Gasemissionen mit Holzgas am 09.03.2023



In Abbildung 15 sind die Temperaturverläufe in der Brennkammer, an der Abgasemissionsmessstelle und in der Dioxinstrecke dargestellt. Hier ist ein sehr konstanter Verlauf über den relevanten Zeitbereich zu erkennen.

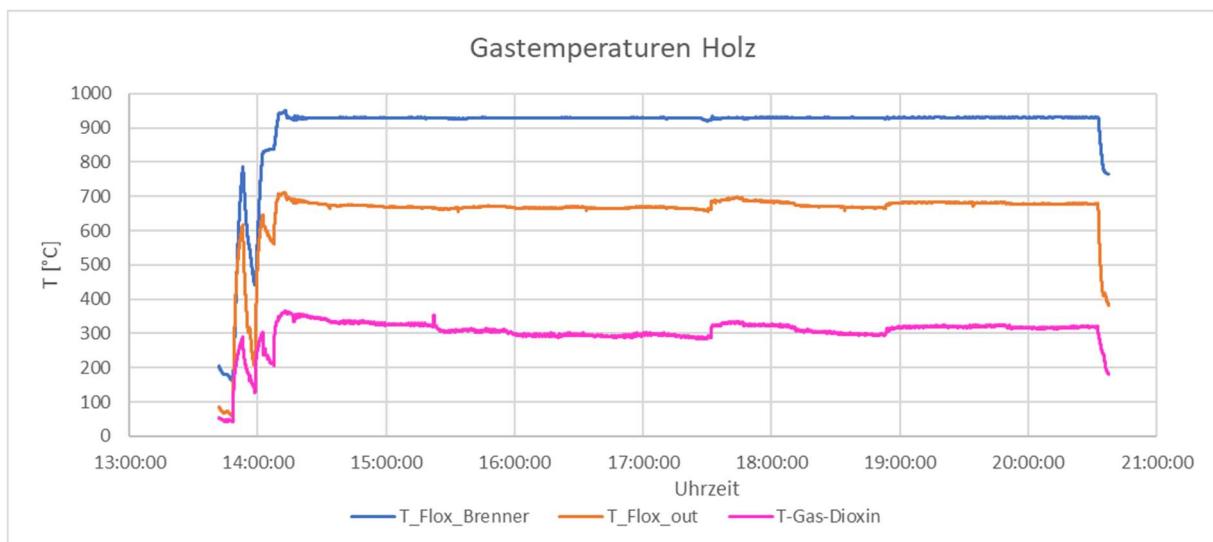


Abbildung 15: Testverlauf einiger Gastemperaturen mit Holzgas am 09.03.2023



### 6.2.3 Test mit LICO-Holzkorkbriketts B

Nach dem Holzgastest am 9. März wurde die Brennstoffzufuhr in den Vergaser auf die LICO-Holzkorkbriketts umgestellt, so dass sichergestellt war, dass der Vergaser am nächsten Morgen komplett mit dem neuen Brennstoff befüllt war. Der 6-stündige Testlauf fand von 10:30 bis 16:30 statt. Auch hier zeigen die Verläufe der Emissionen (Abbildung 16) und Temperaturen (Abbildung 17) eine gute Stabilität des Betriebs im relevanten Zeitbereich.

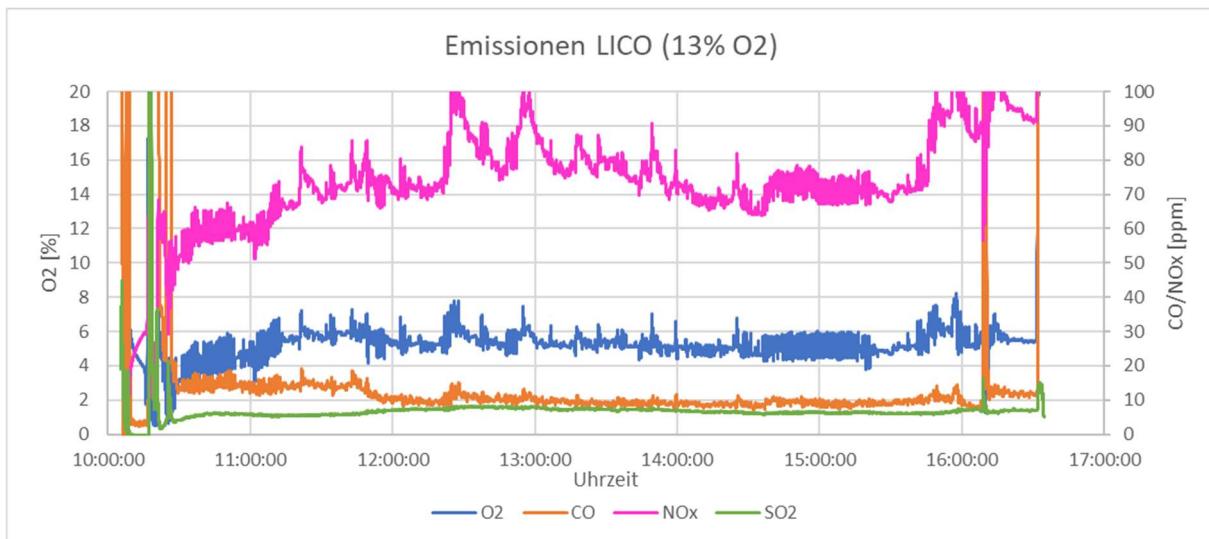


Abbildung 16: Testverlauf von O<sub>2</sub>-Gehalt und Gasemissionen mit LICO-Holzkorkbriketts am 10.03.2023

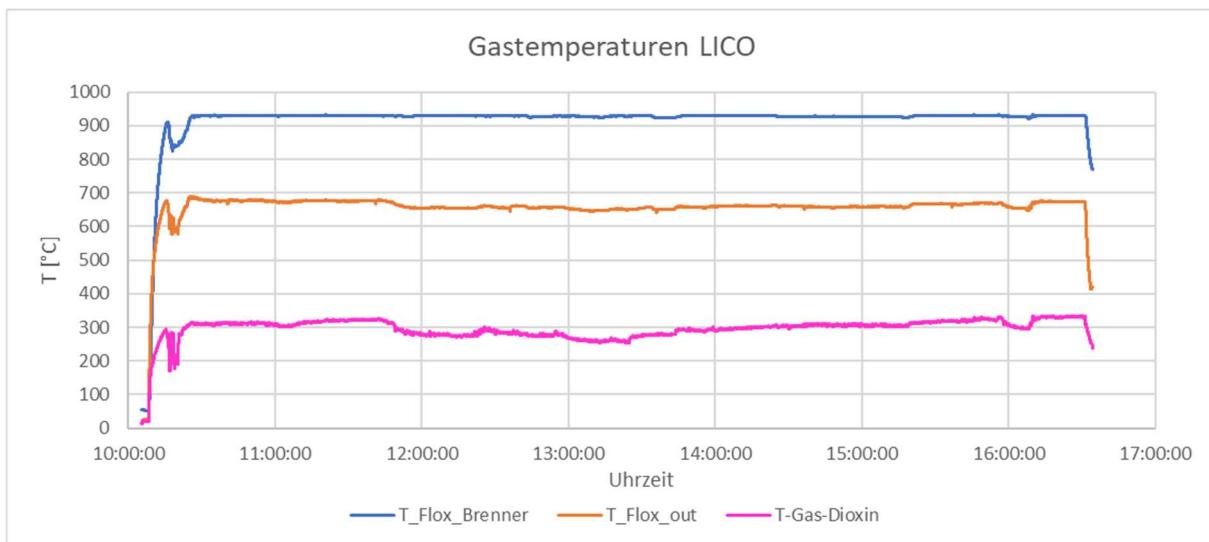


Abbildung 17: Testverlauf einiger Gastemperaturen mit LICO-Holzkorkbriketts am 10.03.2023



#### 6.2.4 Test mit Siebüberlauf aus der Vergärung

Der 5-stündige Testlauf fand am 23.03.2023 von 13:30 bis 18:30 statt. Auch hier zeigen die Verläufe der Emissionen (Abbildung 18, Abbildung 16) eine gute Stabilität des Betriebs im relevanten Zeitbereich.

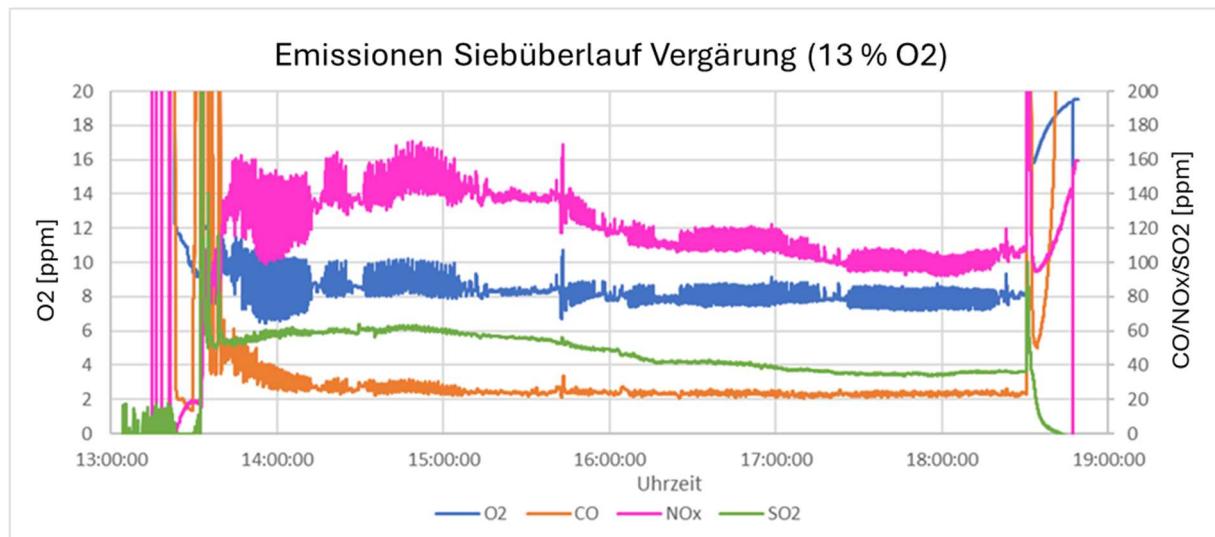


Abbildung 18: Testverlauf von O<sub>2</sub>-Gehalt und Gasemissionen mit Siebüberlauf aus der Vergärung am 23.03.2023

#### 6.2.5 Test mit Siebüberlauf aus der Kompostierung

Dieses Substrat wurde am 24.03.2023 von 11:10 bis 16:00 über fast 5 Stunden getestet. Auch hier war bis auf eine kurze Schwankung um 13:10 (Abbildung 19) ein stabiler Betrieb möglich.

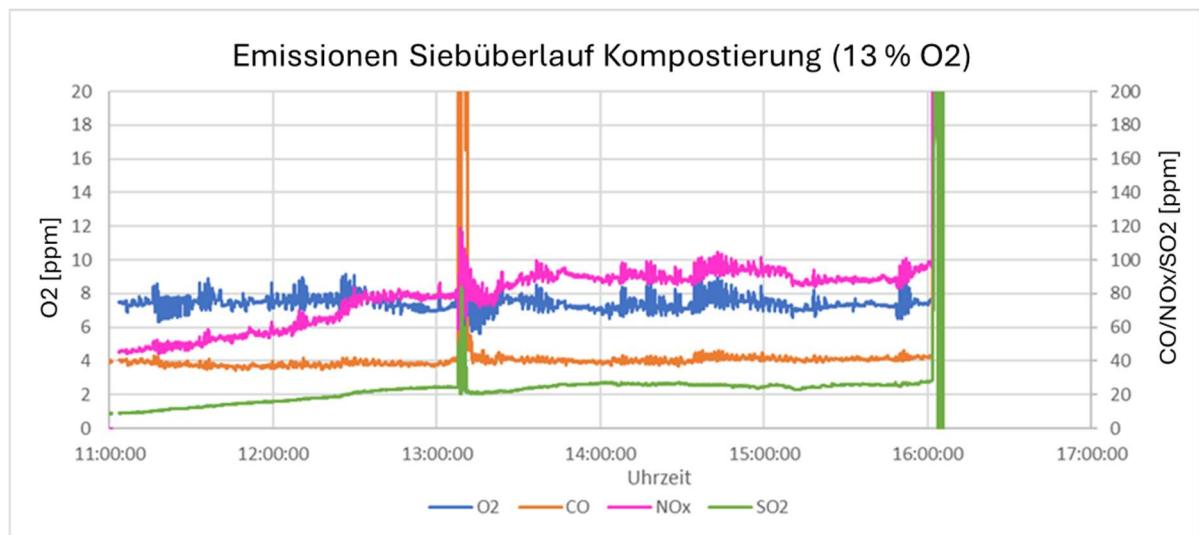


Abbildung 19: Testverlauf von O<sub>2</sub>-Gehalt und Gasemissionen mit Siebüberlauf aus der Kompostierung am 24.03.2023



## 6.3 Diskussion

Die LICO-Holzkork-Briketts B können als Alternative für naturbelassenes Holz zur Vergasung und anschliessender Verbrennung des Gases zur Prozesswärmeerzeugung empfohlen werden. Die Abfälle haben aufgrund der Produktionsbedingungen konstante oder zumindest kontrollierbare Zusammensetzungen. Die Siebüberläufe haben naturgemäß wechselnde Zusammensetzungen. Die hier getesteten Substrate haben zu hohe SO<sub>2</sub>- und für Siebüberlauf aus der Kompostierung zu hohe Staubemissionen gezeigt. Zu anderen Zeiten entnommene Siebüberläufe könnten niedrigere, aber auch höhere Emissionen verursachen.



## 7 AP 5: Langzeitversuche

Aufgrund der Ergebnisse aus AP6 wurden die LICO-Holzkorkbriketts B für einen Langzeitversuch von 50 Stunden Betrieb ausgewählt, bei welchem die Betriebsstabilität und allfällige Schäden an der Anlage durch die Verwendung dieses alternativen Brennstoffes untersucht werden sollte. Der dann tatsächlich verwendete Brennstoff wurde nachträglich nochmals auf die Zusammensetzung untersucht und wird (wegen seiner unterschiedlichen Zusammensetzung) LICO-Holzkorkbriketts C genannt.

### 7.1 Geplanter Ablauf und Versuchsaufbau

In Zusammenarbeit mit dem Amt für Natur und Umwelt Graubünden (ANU) wurde der Ablauf der Langzeitversuche geplant. Ziel war es, insgesamt 50 Stunden Betrieb zu erreichen, ohne dass die Nachbarschaft mit Emissionen belastet wird und Beschwerden gemeldet werden. Deshalb wurde geplant, den Vergaser so lange wie möglich über die Gasreinigung und anschliessendem BHKW zu betreiben (44h) und nur für die Messung der Emissionen aus der Verbrennung des ungereinigten Gases auf den LowNOx-Brenner umzustellen (siehe auch Abbildung 21). Mit dem BHKW kann der Vergaser bei Nennlast betrieben werden, wohingegen mit dem installierten LowNOx-Brenner nur ein Teil der Nenn-Syngasmenge verbraucht werden kann. Um allfällige Langzeiteffekte im Vergaser früher erkennen zu können, sollte dieser bei möglichst hoher Last betrieben werden.

Der LowNOx-Brenner und die Fackel mussten parallel betrieben werden, damit der Vergaser bei etwa halber Nennleistung stabil betrieben werden konnte. Hier gab es seitens des ANU die Auflage diesen Betriebsmodus möglichst kurz zu halten. Auf Wunsch des ANU wurden zusätzlich die HCl-Emissionen erfasst.

	TAG 1				TAG 2				TAG 3				TAG 4				TAG 5				
	6	12	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24	
Inspektion, Vorbereitung		6-18				6-18				6-18				6-18				6-18			
Start mit Holz --> Umstellen auf LICO																					
Vollast mit BHKW																					
Leistung reduzieren für Brenner-Betrieb																					
LowNOx-Brenner-Betrieb mit Fackel, 6h Abgaskondensations-Messung (HCl, PCDD/F, PAK)																AK					
Herunterfahren																					
Inspektion, Abschluss																		6-18			
										~50 h Betrieb mit LICO											
										44 h Gasreinigung --> BHKW											
										6h Betrieb LowNox-Brenner mit Fackel											
										Messung von CO, NOx, SO2											

Abbildung 20: Ablaufplanung Langzeitversuch

1	Vergaserluftstrom
2	Verbrennungsluftstrom
3	Brennertemperatur
4	Kühlluft (Klappenstellung)
MS2:	
5	Abgasanalyse (CO, NOx, SO2), PCDD/F- /PAK- /HCl-Messung
MS1:	
6	Abgasanalyse (CO, NOx, SO2)

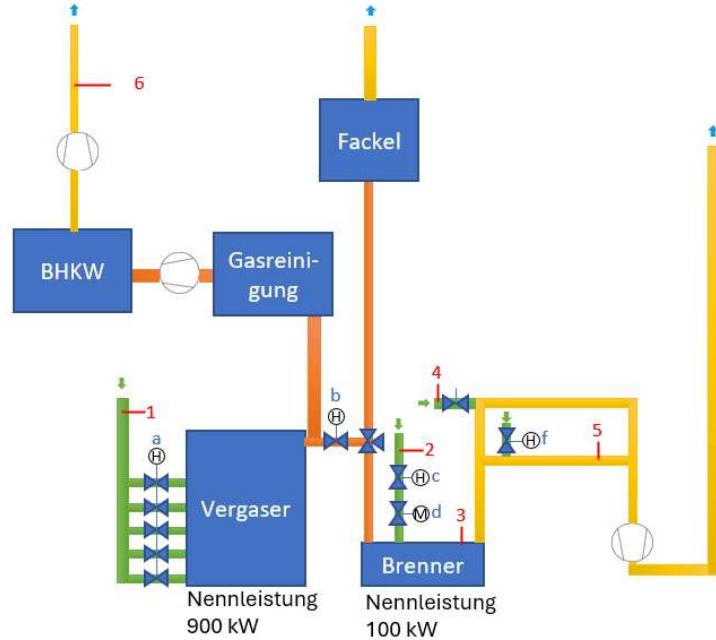


Abbildung 21: Schema und Messstellen für den Langzeitversuch

Folgende Einschränkungen ergeben sich durch die Anlage:

- Abgas aus Low NOx-Brenner kann nicht durch Gasreinigung geführt werden.
- BHKW kann aus Sicherheitsgründen nicht gleichzeitig mit Brenner betrieben werden (Explosionsgefahr, Rückschlagklappen im Syngas nicht sicher ausführbar)
- Vergaser kann mit halber Nennleistung stabil betrieben werden → Betrieb Brenner nur mit Fackel möglich.

Einzelne kritische und gut zugängliche Stellen am Vergaser und der Syngasleitung wurden vorgängig inspiziert und gereinigt, um bei einer Vergleichs-Inspektion nach dem Langzeitversuch allfällige Einflüsse durch die Korrosion feststellen zu können. Auf den Rost konnte leider nicht zugegriffen werden, da sonst der ganze Reaktor hätte gereinigt werden müssen und der Aufwand dafür zu gross gewesen wäre.

## 7.2 Ergebnisse

### 7.2.1 Übersicht

Messung 1 «Abgas aus BHKW» und Messung 2 «Abgas aus LowNOx-Brenner» mit den LICO-Holzkorbriketts C konnten erfolgreich durchgeführt werden. Tabelle 9 zeigt die Mittelwerte über den jeweiligen Messzeitraum der Abgaskondensation für die PCCD/F, PAK und HCl-Messung. Die angeführten Grenzwerte dienen der Einordnung der Emissionen und können nicht direkt angewendet werden. NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> sind erhöht gegenüber den letzten Substrat-Versuchen (Vgl. Kapitel 6.2.1), was mit der relativ grossen Variabilität in der Zusammensetzung der Holzkork-Briketts (vgl. Tabelle 6) zusammenhängt. Die HCl-Emissionen beim LowNOx-Brenner sind auf den hohen Chlorgehalt (ca. 4%) zurückzuführen. PAK ist erhöht gegenüber den Substrat-Versuchen (Faktor 5), die restlichen Emissionen sind in derselben Größenordnung wie bei den Substratversuchen. Die hohen O<sub>2</sub>-Werte nach dem LowNOx-Brenner sind auf Kühlluft zurückzuführen, die zwecks Schutzes des Gebläses ins



Abgas gemischt wird und um für die PCDD/F-Messung in einem guten Temperaturfenster (vgl. Kap. 4.1.5) zu sein.

Tabelle 8: Mittelwerte für Betriebsdaten und Emissionen bei den Langzeitversuchen

Bezeichnung	Einheit	LRV	BHKW	LowNOx-Brenner
Leistung Vergaser	kW		900	260
Massenstrom Vergasungsluft	g/s		66	15
Syngas-Leistung kalt*	kW		450	-
Leistung BHKW	kW		170	-
Thermische Leistung LowNOxBrenner*	kW		-	50
Temperatur Brennkammer	°C		-	930
Temperatur Messgas	°C		-	270
O <sub>2</sub> im Abgas	Vol %		7.5	14.0
CO (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	500	37	51
NO <sub>x</sub> (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	250*	221	271
SO <sub>2</sub> (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>		34	60

\*LRV-Grenzwerte nach LRV Art. 74 Anhang 2 Ziffer 742 (Anlagen zum Verbrennen von biogenen Abfällen und Erzeugnissen der Landwirtschaft). Gilt, wenn ein NOx-Massenstrom von 2'500 g pro Stunde überschritten wird, was in diesem Fall nicht zutrifft.

Tabelle 9: Emissionen von PCDD/F, PAK, und HCl nach dem LowNOx-Brenner

Bezeichnung	Einheit	LRV	Messwerte
PCDD/F* (inkl. BG) (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	ng/Nm <sup>3</sup>		0.064
PAK** (inkl. BG) (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	µg/Nm <sup>3</sup>		3.26
HCl (13 Vol.-% O <sub>2</sub> )	mg/Nm <sup>3</sup>	30***	191.1

\* I-TEQ (NATO/CCMS) inkl. BG, gemessen nach SN EN 1948:2006

\*\* Summe 16 EPA-PAK inkl.BG, gemessen nach SN EN 1911:2010

\*\*\*Dieser Grenzwert aus Anhang 1 der LRV (vorsorgliche Begrenzung der Emissionen von stationären Anlagen) Ziffer 61 gilt erst ab einer Fracht von 300 g/h. Beim LowNox-Brenner mit einem Abgasvolumenstrom von ca. 50 Nm<sup>3</sup>/h ist mit einer Fracht von ca. 10 g/h zu rechnen.

## 7.2.2 Betrieb mit BHKW

Der Vergaser wurde mit Holzscheiten als Brennstoff auf Nennleistung hochgefahren mit Betrieb der Gasreinigung und anschliessendem BHKW. Am 23.4.24 um 07:20 wurde auf LICO-Holzkorkbriketts umgestellt, damit spätestens ab Mittag davon auszugehen war, dass nur noch LICO-Brennstoff im Vergaser ist. Um 11:43 Uhr hat das BHKW abgeschaltet, wegen fehlendem Wasserdruk im Wäscher. Nach Umschalten auf Fackelbetrieb konnte der Fehler schnell behoben werden und das BHKW konnte wieder stabil betrieben werden. Gemäss dem Techniker von AHT, der für das BHKW zuständig war, mussten einige Betriebsparameter kontinuierlich angepasst werden, da die Leistung des BHKW langsam, aber stetig zurückging. Gleichzeitig stieg der Unterdruck im System stetig an. Die starken Schwankungen der NOx-Emissionen wurden gemäss AHT-Techniker durch Ein- und Ausschalten des Kaltgaswärmetauschers verursacht. Um ca. Mitternacht musste wieder auf Holzscheite als Brennstoff umgestellt werden, da der Unterdruck im System so gross war, dass die Anlage nicht mehr weiter sicher betrieben werden konnte.

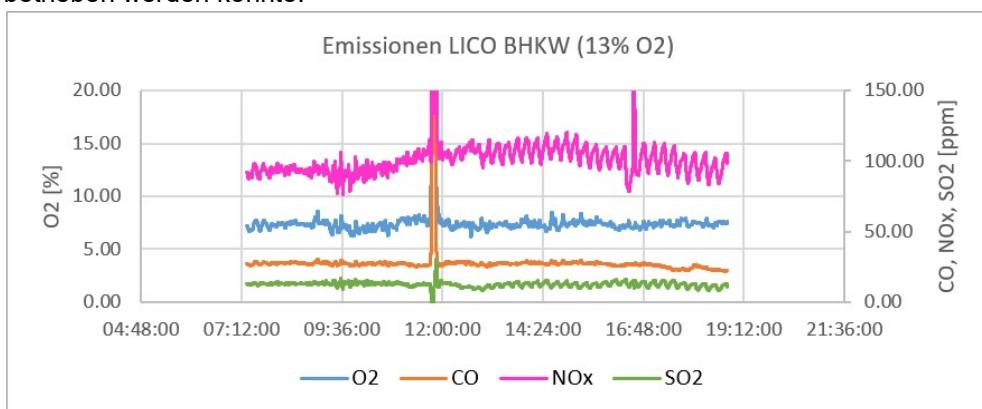


Abbildung 22: Emissionen LICO-Holzkorkbriketts, Messstelle nach BHKW, 23.4.2024

## 7.2.3 Betrieb mit LowNOx-Brenner

Am 25.4.24 um ca. 0 Uhr wurde auf wieder auf LICO-Holzkorkbriketts umgestellt, nachdem zuvor 24 h mit Holzscheiten gefahren worden war. Ziel war es bis am Mittag einen stabilen Betrieb bei ca. halber Vergaser-Nennleistung und Verbrennung des Syngases über Fackel und LowNox-Brenner zu erreichen. Ab 12:30 wurden die Abgaskondensationsmessungen für PCCD/F, PAK und HCl gestartet.

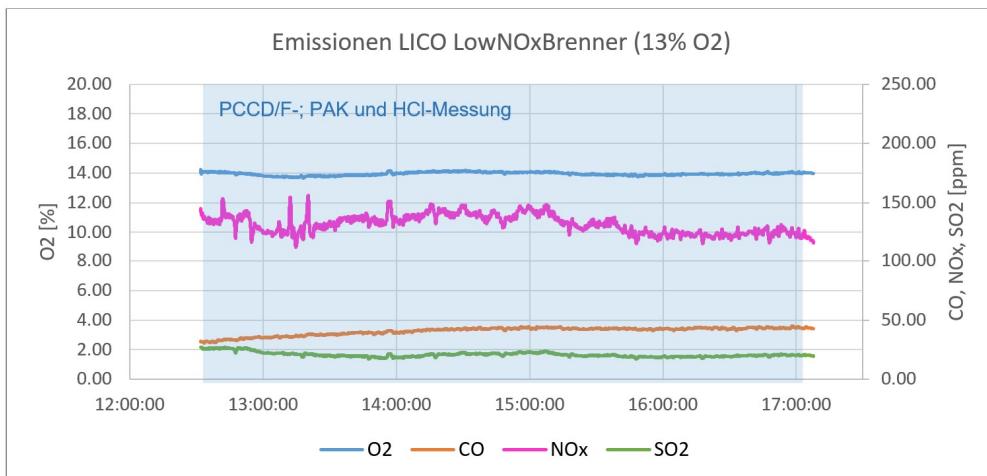


Abbildung 23: Emissionen LICO-Holzkorkbriketts, Messstelle nach LowNox-Brenner, 25.4.2024

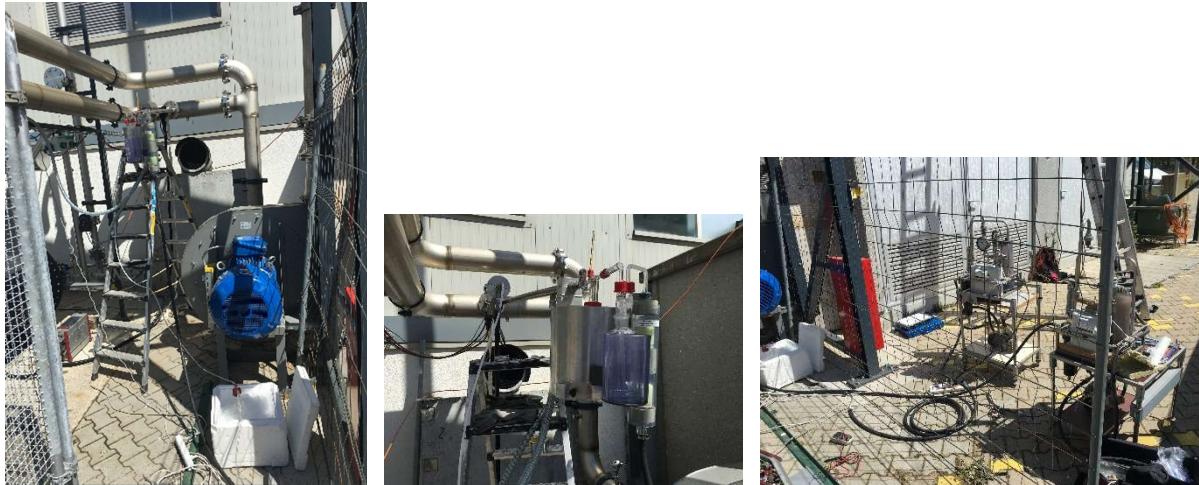


Abbildung 24: Messstelle 2 nach LowNox-Brenner mit PCDD/F- und PAK-Messung (gekühlte Sonde und Waschflaschen und Filtereinheit auf Höhe EMPA-Flansch), HCl-Messung mit beheizter Sonde mit integriertem Staubfilter (Waschflaschen in Styropor-Box auf dem Boden). Auf drittem Bild sind die Absaugeinheiten mit Volumenmessgeräten zu sehen.

### 7.3 Diskussion

Die Inspektion und Reinigung einiger kritischer und gut zugänglicher Stellen vor dem Langzeitversuch wurde vom Team des Energieparks Grischa zusammen mit Anlagenspezialisten von AHT durchgeführt. Die Inspektion derselben Stellen nach dem Versuch ergab keine auf die LICO-Holzkorkbriketts zurückzuführenden Schäden oder Ansätze davon. Insgesamt ist die Anlage bei diesem Versuch nur ca. 24 anstatt der geplanten 50 Stunden mit den LICO-Holzkorkbriketts betrieben worden und der Vergaser musste zweimal mit naturbelassenen Holzscheiten wieder in einen stabilen Betriebszustand gebracht werden (siehe Kap. 7.2). Die Inspektion lieferte deshalb keine weiteren Hinweise auf Schäden durch Korrosion oder Verschlackungen durch die Verwendung des Alternativbrennstoffs.

Der Grund dafür, dass der Vergaser maximal 12 Stunden kontinuierlich mit LICO-Holzkorkbriketts betrieben werden konnte, ist der sehr hohe Feinanteil der LICO-Holzkorkbriketts (war bei den LICO-Holzkorkbriketts C gemäss visueller Beurteilung höher als bei A und B), durch welchen es im Reaktor zu Brückenbildung und für die Vergasungsluft undurchlässigen Zonen kam. Außerdem ist der Aschegehalt des verwendeten Brennstoffs hoch (>20% wf) und der Ascheschmelzpunkt niedrig im Vergleich zu Holz, was in den heißen Zonen zu Verschlackung führte und die Bildung von Brücken unterstützte. Deshalb ist der Unterdruck im Vergaser und den nachfolgenden Leitungen immer größer geworden. Die Betreiber der Anlage befürchteten zudem irreparable Schäden, oder einen grossen Mehraufwand, um die Anlage später wieder in einen betriebsfähigen Zustand bringen zu können.

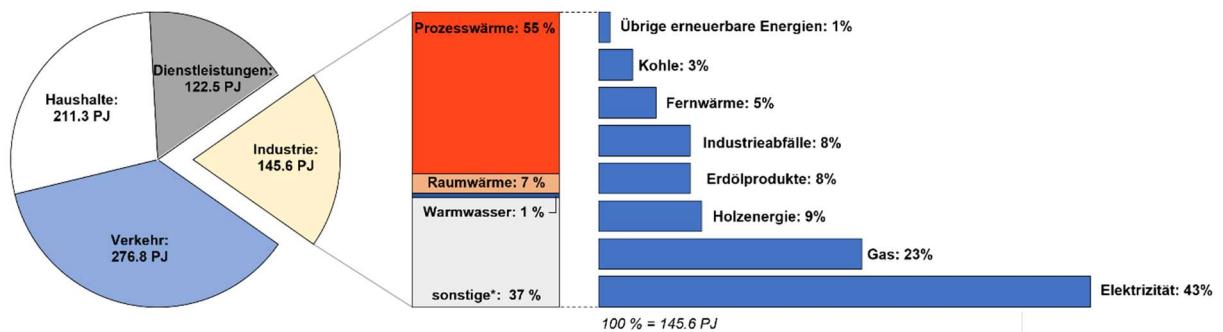
Somit eignen sich die LICO-Holzkorkbriketts aufgrund ihres hohen Feinanteils nicht für einen Langzeitbetrieb in einem Vergaser dieser Bauart. Allenfalls könnte eine Mischung mit Holzscheiten oder ein anderes Brikettierverfahren Abhilfe schaffen. Für die Verwendung der LICO-Holzkorkbriketts in Vergasern muss eine Brennstoffspezifikation mit Werten und Toleranzen zur Zusammensetzung und Beschaffenheit definiert werden und durch geeignete Qualitätssicherungs-Massnahmen im Herstellungsprozess muss sichergestellt werden, dass der Brennstoff der Spezifikation entspricht (analog zu Holzpellets).

## 8 AP 6: Anwendungsbereiche, Ökobilanz und techno-ökonomische Analyse

### 8.1 Anwendungsbereiche

#### 8.1.1 Mögliche Einsatzgebiete für Prozesswärme aus Biomasse

Abbildung 24 zeigt die Zusammensetzung der industriell genutzten Endenergie und ihre Herkunft. Vom Gesamtenergieverbrauch in der Schweiz 2022 entfielen 19% (145.6 PJ) auf den Industriesektor (BFE 2022)<sup>4</sup>, wovon 55 % für die Bereitstellung von Prozesswärme benötigt werden. Der industrielle Endenergieverbrauch wird weitgehend durch fossile Brennstoffe gedeckt, wie Erdgas (23 %), Erdölprodukte (8 %) und Kohle (3 %)<sup>5</sup> (AEE SUISSE 2019).



\*Sonstige: Antriebe, Prozesse; Beleuchtung; Klima, Lüftung & Haustechnik; Information und Kommunikation, Unterhaltung, Sonstige.

Abbildung 25 Gesamtenergieverbrauch der Schweiz 2022 und Detailbetrachtung des Industriesektors

Die Schweiz hat sich zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen auf Netto-Null bis 2050 verpflichtet. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Industriesektor zügig dekarbonisiert werden. Insbesondere im Bereich der industriellen Prozesswärmebereitstellung ist eine Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger essenziell.

In einer aktuellen Studie wurden die Verwertungspfade von Energieholz für das Schweizer Energiesystem und deren Beitrag zur Erreichung des Netto-Null-Ziels im Jahr 2050 untersucht (BAFU 2023). Die Ergebnisse der Studie fordern eine prioritäre Nutzung von Holzenergie für die Erzeugung von Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme. Bei der Prozesswärme ist dies vor allem darauf zurückzuführen, dass Holz in der Lage ist, Hochtemperatur-Prozesswärmee zu erzeugen und damit fossile Brennstoffe dort zu ersetzen, wo andere erneuerbare Alternativen nicht oder nur mit hohem Aufwand einsetzbar sind.

Prozesswärme ist in der Industrie in einem breiten Spektrum von Anwendungen zu finden. Die Technologien zur Erzeugung der Prozesswärme mit Hilfe von Verbrennungsanlagen (z.B. Kessel, Trockner und Öfen) sowie die Temperaturanforderungen führen zu einer Vielzahl von bestehenden Verfahren. Hinsichtlich der Nutzung der in Verbrennungsanlagen erzeugten Wärme kann zwischen einer direkten Nutzung (d.h. in direktem Kontakt mit dem zu behandelnden Gut) und einer indirekten Nutzung (d.h. Übertragung auf ein Wärmeübertragungs-/Wärmeabgabemedium) unterschieden

<sup>4</sup> Die statistische Differenz inkl. Landwirtschaft beträgt 8.9 PJ oder 1%



werden. Die direkte Erwärmung wird in der Regel bei hohen Temperaturen ( $> 400 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) eingesetzt, z. B. in Tunnelöfen oder Hochöfen, während die indirekte Erwärmung im niedrigen ( $< 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) und mittleren ( $100\text{--}400 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) Temperaturbereich erfolgt, wobei in der Regel Wasser, Dampf oder Öl als Übertragungsmedium verwendet wird. Im Falle einer direkten Verwendung kann die Zusammensetzung des Rauchgases für die Prozessleistung und/oder die Produktqualität entscheidend sein (IEA 2021)(Malico et al. 2019).

Was die Temperaturniveaus für Prozesswärme betrifft, so besteht, wie in (IEA 2021) hervorgehoben wird, immer noch kein Konsens über die Kategorisierung der Temperaturniveaus in Niedrig-, Mittel- und Hochtemperaturwärme.

Die Entwicklung und der Einsatz eines Systems, das die Vergasung von Biomasse mit anschliessender Verbrennung des entstehenden Gases umfasst, könnte für die folgenden Arten von Anwendungen in Betracht gezogen werden:

Bei benötigten Temperaturniveaus  $> 600 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Schmelzöfen, Erwärmungsöfen und Wärmebehandlungsöfen in der Eisenindustrie, Stahlindustrie, Buntmetallindustrie und Leichtmetallindustrie
- Tunnelöfen, Brennöfen und Kammeröfen in Ziegelei und Keramikindustrie

Bei benötigten Temperaturniveaus  $< 600 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Trocknungsanlagen
- Kesselfeuerungen (Warmwasser, Dampf, Thermo-Öl)

Heute gibt es eine Reihe von Technologien für die Erzeugung erneuerbarer Prozesswärme wie Solarenergie, Wasserstoff und Strom (Wärmepumpe, Widerstandsheizung, Mikrowellenheizung und Plasmatechnologie (IEA 2021). Neben anderen Faktoren sind die Anforderungen an das Temperaturniveau entscheidend für die Beurteilung der Eignung einer bestimmten Technologie. Die Erzeugung von Wärme auf der Basis von Biomasse hat den Vorteil, dass sie in der Lage ist, Wärme in niedrigen, mittleren und hohen Temperaturbereichen zu erzeugen. Dies ist besonders für Anwendungen im mittleren und hohen Temperaturbereich relevant, wo fossile Brennstoffe (z. B. Erdgas) heute weit verbreitet sind und andere Technologien nicht oder nur mit erheblichem Aufwand eingesetzt werden können.

### 8.1.2 Pilotanlage

Die Installation einer kombinierten Anlage zur Vergasung und Verbrennung von Substraten zur Wärmegewinnung stellt eine sinnvolle Form der Verwertung von Reststoffen dar, sofern folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Das Substrat fällt vor Ort an
- Es existiert eine gesicherte Verfügbarkeit des Brennstoffs
- Der Aufwand für die Brennstoffaufbereitung wie beispielsweise Zerkleinerung, Trocknung und Brikettierung ist minimal
- Es besteht ein Wärmenutzungspotential vor Ort und/oder in der nahen Umgebung
- Das Material wird bisher zu weiter entfernten Entsorgungsanlagen gefahren
- Die Grenzwerte der LRV können ohne weitere Rauchgasreinigung sicher eingehalten werden



Hieraus ergeben sich denkbare Einsatzfelder in der verarbeitenden Industrie und der Landwirtschaft. Diese beiden Sektoren sind interessante Bereiche für die Integration von Prozesswärme aus Biomasse, da dort häufig Biomasserrückstände oder Nebenprodukte direkt vor Ort anfallen.

Mögliche Einsatzgebiete und -industrien für eine Pilotanlage sind beispielsweise:

- Dampfherstellung für die Naturdüngerproduktion
- Gastrocknungsanlagen
- Thermalölerhitzung in der Chemieindustrie
- Ziegeleien
- Isolationshersteller
- Molkereien
- Brauereien
- Holzverarbeitende Industrie
- Zementindustrie
- Glasindustrie
- Keramikindustrie

In diesem Projekt wurde gezeigt, dass die Erzeugung von Hochtemperaturwärme durch die Vergasung von Biomasserrückständen und die anschliessende Verbrennung des entstehenden Gases technisch machbar ist. Es hat sich gezeigt, dass die Emissionsgrenzwerte für NOx, CO, PM10 und PCDD/F mit geeignetem Brennstoff eingehalten werden können.

Die industrielle Prozesswärme erfordert Lösungen für die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Alternativen. Die Entwicklung von Vergasungs- und Verbrennungssystemen würde die Dekarbonisierung dieses Sektors ermöglichen und dazu beitragen, das Ziel von Netto-Null-Emissionen bis 2050 zu erreichen. Ein Pilot-/Demoprojekt würde es ermöglichen, ein optimiertes Gesamtkonzept für die Erzeugung und Nutzung von Prozesswärme in einem relevanten industriellen Umfeld zu entwickeln und so den dringend benötigten Einsatz erneuerbarer Prozesswärme zu unterstützen.

## 8.2 Ökobilanz

### 8.2.1 Einleitung und Methodik

Die vorliegende Ökobilanz ist Teil des sechsten Arbeitspakets (AP6) des Projekts. Ziel des Projekts ist die Bewertung der Eignung des Verfahrens der kombinierten Vergasung und Verbrennung für verschiedene biogene Abfallströme.

Für jeden Stoffstrom wird die Variante "Vergasung-Verbrennung" mit dem heutigen Verwertungspfad verglichen. Das Ziel ist, den ökologischen Mehrwert der untersuchten Variante gegenüber der heutigen Situation zu beurteilen. Für jedes Szenario werden die wichtigsten Faktoren in Bezug auf die Umweltwirkungen identifiziert.

Der Vergleich wird mit zwei Indikatoren durchgeführt. Der Indikator Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-Äq.) wird mithilfe der Global Warming Potential 100 Methode (GWP100) der IPCC ermittelt. Die Berechnung des Indikators Umweltbelastungspunkte (UBP) erfolgt über die Methode der ökologischen Knapheit 2013.

Mit der GWP100-Methode werden die Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgewandelt und deren Beitrag zur Klimaerwärmung ermittelt. Diese Aggregation ermöglicht den Vergleich unter den Varianten.



Wichtige Umweltwirkungen wie der Eintrag von Schwermetallen in den Boden oder in Gewässer werden jedoch mit dieser Methode nicht berücksichtigt.

Die Methode der ökologischen Knappheit trägt zur Abschätzung der Umweltwirkungen auf Ökosysteme, Menschen und Tiere bei. Emissionen, Ressourcenverbrauch usw. führen jeweils zu einem spezifischen UBP-Wert. Diese Werte werden dann für ein Substrat und eine Variante aufsummiert und führen wiederum zu einem Gesamtscore, welcher eine Basis für den Vergleich liefert. Diese Methode ermöglicht die Beurteilung von Umweltwirkungen, welche nicht oder nur indirekt durch die GWP100-Methode berücksichtigt werden. Bei vollaggregierten Methoden wie diesen ist darauf zu achten, dass Informationen während der Umwandlung zu UBP verloren gehen, beziehungsweise für den vollen Informationsgehalt immer auch die Hintergründe zu betrachten sind.

Die Struktur der Ökobilanz entspricht dem ISO-Standard 14040 (Abbildung 25).

### **Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**

In der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen wird festgelegt, wofür die Ökobilanz verwendet werden soll. Es werden Nutzen und Funktionen des zu untersuchenden Objekts festgelegt. Es werden Annahmen und Einschränkungen definiert sowie die vorläufigen Grenzen der Untersuchung festgelegt (Festlegung der Systemgrenze).

### **Erstellen der Sachbilanz: Datenerhebung, Modellierung**

In der Sachbilanz werden die Stoff- und Energieflüsse innerhalb der definierten Systemgrenze erhoben und abgebildet. Die Sachbilanz ist ein rein deskriptives (beschreibendes) Modell ohne Wertung. Allerdings beinhaltet jede Sachbilanz implizite Wertungen, die sich aus den vorher definierten Zielen und aus dem Untersuchungsrahmen ergeben.

In der Sachbilanz werden Daten erhoben, auf welche sich die Umweltanalyse stützt. Bei den Daten wird zwischen Vordergrund- und Hintergrunddaten unterschieden.

**Vordergrunddaten** entsprechen den Massen- und Energieflüssen der Verwertungsszenarien. Bei der vorliegenden Analyse stammen die Vordergrunddaten von den in den anderen Arbeitspaketen des Projektes durchgeführten Experimenten und Versuchen, aus der Literatur und aus begründeten Annahmen.

**Hintergrunddaten** werden benötigt, da die Umweltanalyse den ganzen Lebenszyklus von Materialien und Energie beurteilt, also auch vor- und nachgelagerte Prozesse wie die Produktion des Rohmaterials und der Energie oder die Entsorgung von Verbrauchsmaterialien. Die Hintergrunddaten stammen aus der Ökobilanzdatenbank Ecoinvent oder wurden auf Basis von wissenschaftlicher Literatur spezifisch für dieses Projekt erstellt.

### **Wirkungsabschätzung: Bewerten der Umweltauswirkung**

Die Wirkungsabschätzung teilt die Ergebnisse der Sachbilanz nach wissenschaftlich basierten qualitativen Gesichtspunkten in verschiedene Wirkungskategorien ein. Das Ergebnis der Wirkungsabschätzung sind die quantitativen Umweltauswirkungen, die das analysierte Objekt verursacht. Dieser Schritt beinhaltet (meist implizit) eine Bewertung, einerseits durch die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethoden und deren Wirkungskategorien an sich und andererseits durch die Auswahl der Emissionen, die in den betroffenen Wirkungskategorien berücksichtigt werden.

### **Auswertung: Interpretation und Diskussion**

In der Auswertung werden für das Ergebnis wichtige Parameter (z. B. einzelne Lebenswegabschnitte



oder Wirkungskategorien) identifiziert und beurteilt. Aus den Ergebnissen werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen entwickelt.

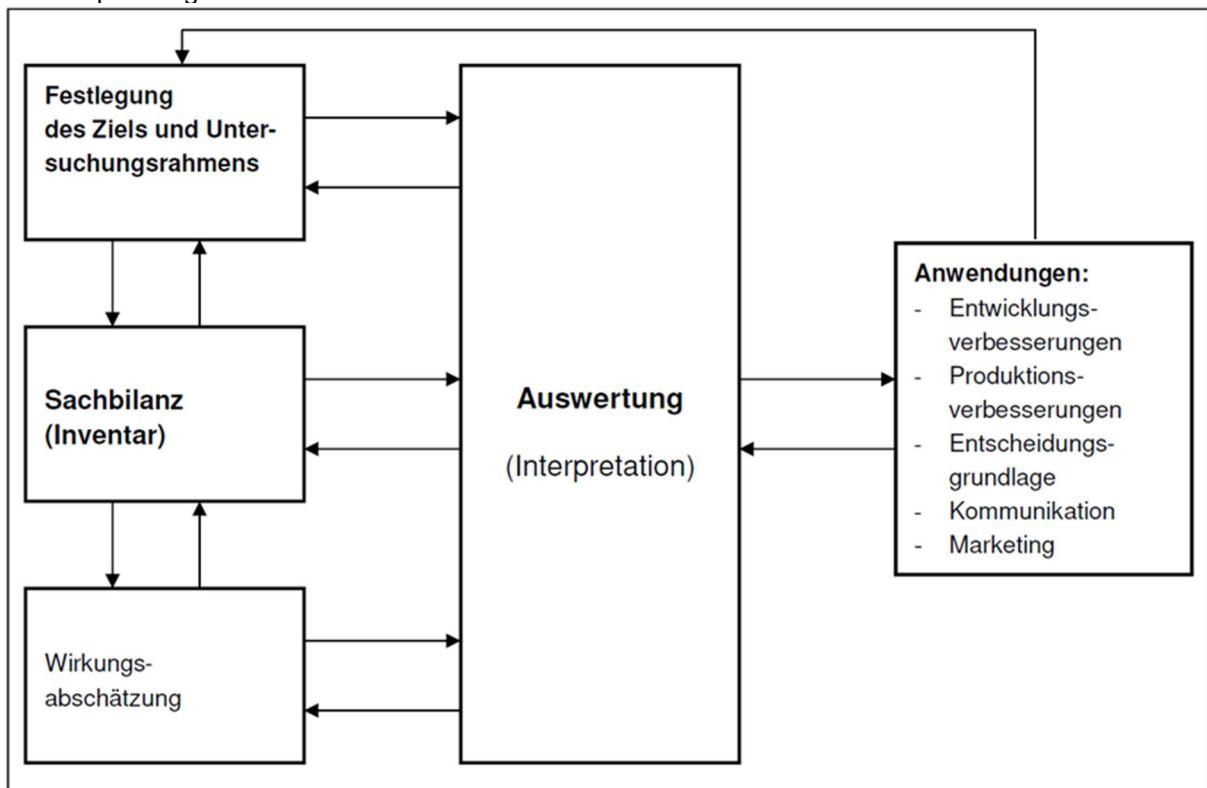


Abbildung 26 Die Phasen der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44

### 8.2.2 Ziel und Untersuchungsrahmen

#### Ziel

Das Ziel der vorliegenden Ökobilanz ist, quantitative Informationen zu den Umweltwirkungen der kombinierten Vergasung und Verbrennung der ausgewählten Stoffströme im Vergleich zu den jeweiligen heutigen Verwertungspfaden zu erhalten.

#### Systemgrenzen

Das System der vorliegenden Ökobilanzierung umfasst die Verwertung von 1 kg ausgewähltem Substrat von seinem Ort der Erfassung bis zu seiner Entsorgung oder Verwertung in einem oder mehreren Produkten. Da es sich bei den untersuchten Substraten ausschliesslich um Abfallströme handelt, für die verschiedene Verwertungswege verglichen werden sollen, wird auf die Bilanzierung ihrer jeweiligen Entstehungspfade verzichtet. Da zusätzlich alle Abfallströme in grossen Mengen auf Betriebshöfen anfallen, kann auf eine Bilanzierung einer Erfassung bzw. Sammlung verzichtet werden. Die heutigen Verwertungswege repräsentieren die aktuell von den Substraten durchlaufenen Behandlungen wie von den Betreibern angegeben. Eine abweichende Entsorgung ähnlicher Ströme anderer Erzeuger ist denkbar.



## Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit dient als Vergleichsbasis für die Untersuchung verschiedener Szenarien. Da verschiedene Verwertungspfade miteinander verglichen werden, wird 1 kg gesammeltes Ausgangsmaterial als funktionelle Einheit und somit als Vergleichsbasis gewählt.

Die Ausgangsmaterialien wurden in den vorangegangenen Berichten und Kapiteln bereits ausführlich diskutiert und vorgestellt. Letztendlich ökobilanziell betrachtet wurden:

- LICO-Holzkorkbriketts
- Siebüberlauf aus der Vergärung
- Siebüberlauf aus der Kompostierung.

## Szenarien der heutigen Entsorgung

Die Substrate und ihre jeweilige Vorbehandlung können wie folgt beschrieben werden:

- Holzkorkbriketts fallen bei einem Hersteller für Bodenbeläge in Form von Staub und Spänen an. Diese werden für den Transport vor Ort zu Briketts verpresst und anschliessend ca. 300 km zu einer Kehrichtverbrennungsanlage gefahren.
- Siebüberlauf ist ein Rückstand aus der Vergärung von biogenen Abfällen. Der Gärrest wird gesiebt. Der hierbei anfallende Siebüberlauf setzt sich überwiegend aus holzigen Bestandteilen zusammen.
- Siebüberlauf aus der Kompostierung ist ebenfalls eine Siebüberlauffraktion mit verhältnismässig hohem Anteil an Inertmaterial.

Allen Substraten ist gemein, dass sie einer Kehrichtverbrennungsanlage zugeführt werden. Dort werden sie energetisch zu Strom und Wärme umgewandelt. Die entstehende Asche wird deponiert.

## Szenarien Vergasung-Verbrennung

Bei der Vergasung-Verbrennung werden die Substrate zunächst in einen Vergaser eingebracht. Das dort entstehende Synthesegas wird in einen LowNOx-Brenner geleitet und vollständig verbrannt. Im Vergaser verbleibt als Rückstand der Ascheanteil der Brennstoffe und kann dort gesammelt und anschliessend entsorgt werden. Eine Nutzung der Wärme erfolgt ebenfalls. Die Konditionierung der verschiedenen Substrate wird nachfolgend beschrieben:

- Holzkorkbriketts: Die Holzkorkspäne werden brikettiert. Eine weitere Aufbereitung ist nicht notwendig.
- Siebüberlauf Vergärung: Der Siebüberlauf aus der Vergärung wird getrocknet, zerkleinert und anschliessend brikettiert, um die Anforderungen des Vergasers an den Brennstoff zu erfüllen.
- Siebüberlauf Kompostierung: Die Aufbereitung des Siebüberlaufs aus der Kompostierung ist identisch mit der Aufbereitung des Siebüberlaufs aus der Vergärung.

## Systemerweiterungen

Mit Hilfe von Systemerweiterungen werden die Nebenprodukte der heutigen Verwertungspfade sowie der Vergasung-Verbrennung berücksichtigt. Die Berücksichtigung dieser Produkte ist wichtig und kann einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung haben. Dazu kann mit Systemerweiterung sichergestellt werden, dass die Vergleichsbasis einheitlich ist und die wichtigsten Elemente (diejenigen mit den grössten Einflüssen auf die Umweltwirkungen) nicht vergessen werden. In der vorliegenden Ökobilanzierung wird das Gutschriftverfahren eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden die Umweltwirkungen der ersetzen Produkte von der Summe der Umweltwirkungen eines Szenarios abgezogen. Beispielsweise werden bei der Entsorgung von Siebüberläufen aus der Kompostierung in der Kehrichtverbrennung die Umweltwirkungen aus der Produktion von Strom und



Wärme abgezogen und bei den Szenarien zu „Vergasung-Verbrennung“ nur die aus der Wärmeproduktion. Die Gutschriften werden anhand der Anlagenwirkungsgrade und der Heizwerte der Substrate berechnet.

### **Strom**

Strom wird bei der Verbrennung von holzigen Materialien in einer Kehrichtverbrennungsanlage erzeugt und ersetzt somit Strom aus einer anderen Quelle. Es wird angenommen, dass die durch die Verbrennung der drei Substrate produzierte Strommenge die gleiche Menge Strom aus dem Schweizer Energiemix ersetzt. Die Höhe der Gutschrift ergibt sich aus dem Heizwert je Substrat und dem Stromwirkungsgrad für Altholzverbrennungsanlagen.

### **Wärme**

Wärme wird sowohl bei der Vergasung-Verbrennung als auch bei der Verbrennung in einer Kehrichtverbrennungsanlage aller berücksichtigten Substrate erzeugt. Ähnlich wie bei der Gutschrift von Strom ersetzt die Wärmemenge aus der energetischen Verwertung von organischem Material die gleiche Wärmemenge, die durchschnittlich mit Erdgas in der Schweiz produziert worden wäre. Mangels Datensatz zum Wärmemix in der Schweiz wird auf Erdgas als Referenzenergieträger zurückgegriffen. Der verwendete Datensatz für Wärme gilt sowohl für Industrie- als auch Fernwärme und berücksichtigt daher alle vorliegenden Temperaturniveaus. Diese sind in den betrachteten Verfahren zum einen Hochtemperaturwärme für die Industrie bei der Vergasung-Verbrennung und zum anderen Hochtemperaturwärme und Fernwärme in variablen Verhältnissen bei der Kehrichtverbrennung. Die Höhe der Gutschrift ergibt sich aus dem Heizwert je Substrat und dem Wärmewirkungsgrad der betrachteten Anlagen.

#### **8.2.3 Sachbilanz**

Die Tabellen im Anhang 13.3 geben Auskunft über die Herkunft der einzelnen Datenpunkte.

#### **Heutige Verwertungspfade**

Die Sachbilanzdaten der Szenarien der heutigen Verwertung werden aus der Literatur und Interviews mit Experten erhoben. Die Emissionsdaten für die Kehrichtverbrennungsanlage können aufgrund der Abgasreinigung und der Grösse der Anlage für alle Substrate als gleich angenommen werden. Die im Datensatz hinterlegten Einträge werden daher nicht an die einzelnen Substrate angepasst.

#### **Vergasung-Verbrennung**

Die Sachbilanzdaten der Szenarien der Vergasung-Verbrennung werden aus der Literatur, aus Interviews mit Experten und aus Feld- und Laborversuchen (siehe Ergebnisse der Arbeitspakte 1, 3 und 4 für weitere Informationen zu den durchgeföhrten Versuchen) erhoben.

#### **Transporte**

Die Transportdistanzen werden, sofern nicht genauer bekannt, geschätzt. Für alle Transporte wird das gleiche Transportmittel angenommen.

#### **Ascheentsorgung**

Die Ascheentsorgung ist für die heutigen Verwertungspfade bereits im Datensatz für die Kehrichtverbrennung enthalten. Dabei wird angenommen, dass eine Variation des Aschegehalts der betrachteten Substrate auf die Bilanz der Gesamtanlage keinen Einfluss hat, da die Mengen der



Substrate im Vergleich zum Gesamtdurchsatz verschwindend gering sind. Daher wird die Ascheentsorgung nur für die Vergasung-Verbrennungsprozesse separat berücksichtigt.

#### 8.2.4 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung wird ein Indikator für den Klimawandel (CO2-Bilanz resp. CO2-Fussabdruck) anhand der GWP100-Methode sowie einer für die Gesamtumweltauswirkung (Umweltbelastungspunkte) anhand der Methode der ökologischen Knappheit verwendet. Dabei wird für jedes Substrat ein Vergleich des heutigen Verwertungspfads mit der Variante Vergasung-Verbrennung verglichen.

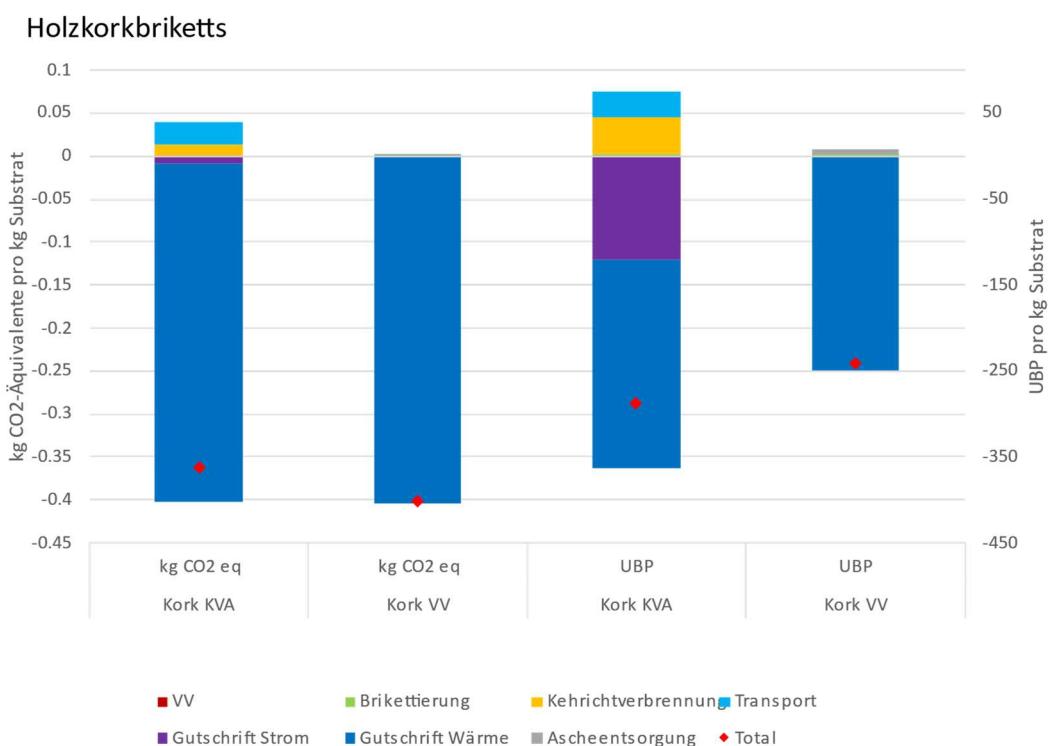


Abbildung 27 Umweltwirkungen der Verwertungsszenarien (Kehrichtverbrennung KVA und VergasungVerbrennung VV) pro kg Holzkorkbriketts in kg CO2-Äquivalente (links) und UBP (rechts)



### Siebüberlauf Kompostierung

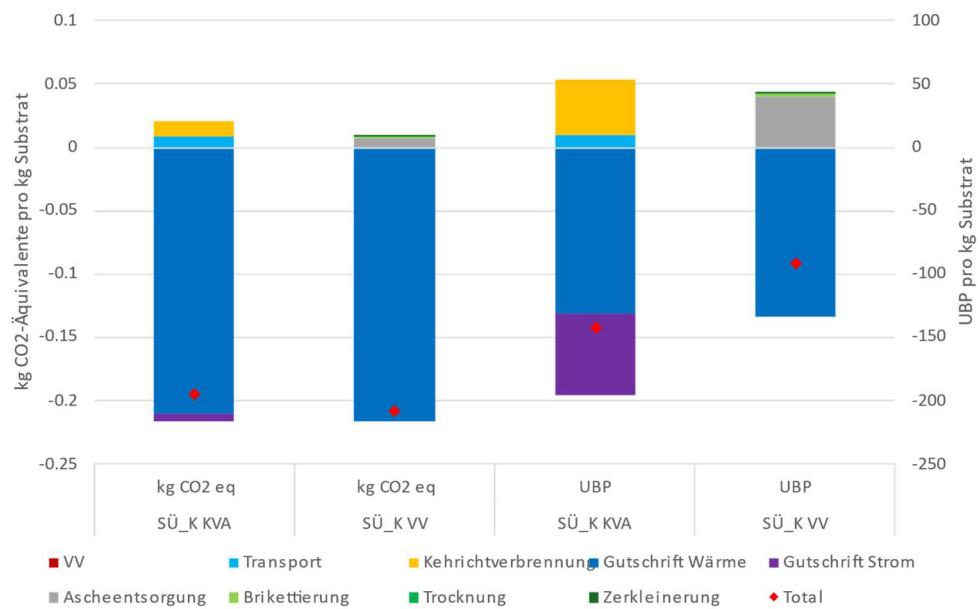


Abbildung 28 Umweltwirkungen der Verwertungsszenarien (Kehrichtverbrennung KVA und VergasungVerbrennung VV) pro kg Siebüberlauf aus der Kompostierung in kg CO2-Äquivalente (links) und UBP (rechts)

### Siebüberlauf Vergärung

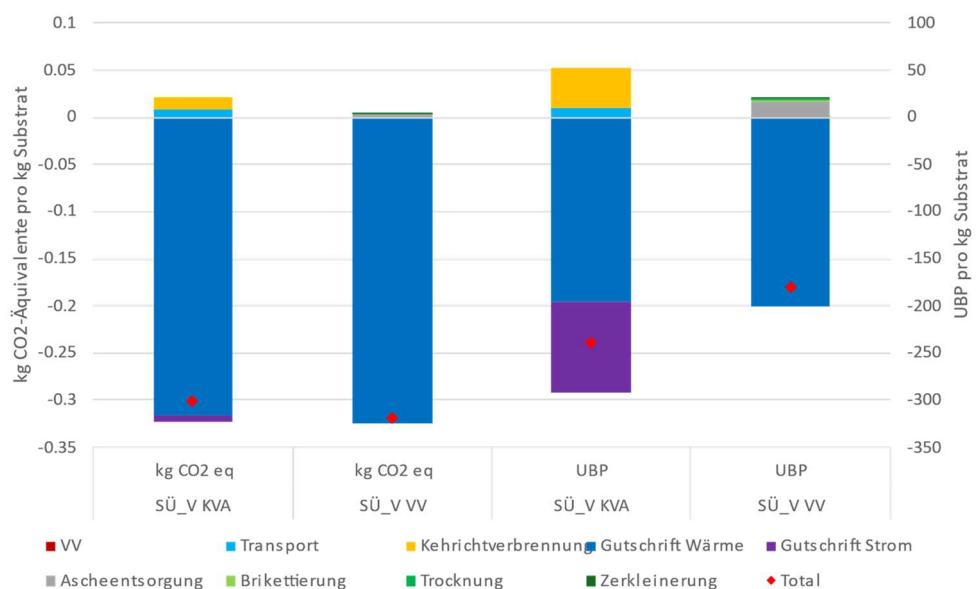


Abbildung 29 Umweltwirkungen der Verwertungsszenarien (Kehrichtverbrennung KVA und VergasungVerbrennung VV) pro kg Siebüberlauf aus der Vergärung in kg CO2-Äquivalente (links) und UBP (rechts)



## 8.2.5 Beurteilung der Ergebnisse und Diskussion

### Allgemein

Die folgende Diskussion der berechneten Umweltwirkungen legt den Fokus auf den Vergleich der Verwertungspfade für jedes Substrat und nicht auf den Vergleich der Substrate miteinander.

Dank dem Gutschriftverfahren werden in allen Szenarien die Umweltaufwände (Emissionen, Energieverbräuche, usw.) durch die gewährten Gutschriften kompensiert und dementsprechend negative Umweltwirkungen erreicht.

Mit der GWP100-Methode werden in allen Szenarien die Umweltauswirkungen vollständig kompensiert, das Szenario Vergasung-Verbrennung schneidet bei allen Substraten leicht besser ab als der heutige Verwertungspfad. Bei der Betrachtung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) ist aus ökologischer Sicht in allen Fällen der heutige Verwertungspfad vorzuziehen.

### Holzkorkbriketts

Im heutigen Szenario erfolgt eine energetische Verwertung der Holzkorkbriketts in Form von Strom und Wärme. Das Szenario Vergasung-Verbrennung bedeutet ebenfalls eine energetische Verwertung der Holzkorkbriketts, diese liefert jedoch abhängig von der verwendeten Berechnungsmethode nicht zwingend ökologisch bessere Ergebnisse als die heutige Verwertung.

Pro Kilogramm verwerteter Holzkorkbriketts werden im aktuellen Verwertungspfad -0.36 kg CO<sub>2</sub>-Äq. emittiert. Ein Grossteil der emittierten CO<sub>2</sub>-Äquivalente entfällt dabei auf Transport und Kehrichtverbrennung mit jeweils 66 % bzw. 31 %. Die durch die Erzeugung von Wärme und Strom gewährten Gutschriften für den Ersatz von Energieaufwendungen nach dem Schweizer Energiemix kompensieren die Aufwände und ermöglichen eine klimapositive Verwertung der Holzkorkbriketts. Beim Szenario Vergasung-Verbrennung werden mit -0.4 kg etwas weniger CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittiert als über den aktuellen Verwertungspfad. Dabei tragen die Ascheentsorgung und die Brikettierung etwa zu gleichen Teilen zu den Umweltauswirkungen bei.

Durch die heutige Verwertung in einer Kehrichtverbrennung werden -288 UBP pro kg Holzkorkbriketts berechnet. Die Umweltbelastungspunkte der heutigen Verwertung werden hauptsächlich durch die Kehrichtverbrennung selbst und den Transport verursacht. Die Gutschriften für die Produktion von Wärme und Strom kompensiert die UBP vollständig und führt zu einer negativen UBP-Summe. Das Szenario Vergasung-Verbrennung schneidet mit -242 UBP schlechter ab als der heutige Verwertungspfad über eine Kehrichtverbrennung. Durch die Betrachtung mehrerer Wirkungskategorien fallen die verschiedenen Umweltauswirkungen der Ascheentsorgung stärker ins Gewicht als bei der GWP100-Methode. Die Gutschrift aus der Wärmeproduktion führt dennoch in Summe zu einer negativen Umweltbelastung.

### Siebüberlauf Kompostierung

Der Siebüberlauf aus der Kompostierung wird heute in einer Kehrichtverbrennungsanlage verwertet. Im Szenario Vergasung-Verbrennung ist vor der Behandlung eine Aufbereitung des Substrats notwendig.

Die heutige Verwertung des Siebüberlaufs Kompostierung führt zu -0.19 kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro kg Substrat. Von den relevanten Emissionen entfallen 41 % auf den Transport und 59 % auf die Verbrennung. Die Aufwände werden durch die Gutschriften für die Erzeugung von Strom und Wärme kompensiert, sodass ein klimapositives Ergebnis zustande kommt. Im Szenario Vergasung-Verbrennung werden -0.2 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kg Substrat emittiert. Trotz aufwendiger Brennstoffaufbereitung hat die



Ascheentsorgung den grössten Einfluss auf die Emissionen, da das Substrat durch mineralische Verunreinigungen einen sehr hohen Aschegehalt aufweist.

Die heutige Verwertung des Siebüberlaufs Kompostierung ergibt eine Belastung von -142 UBP pro kg Substrat. Die Umweltbelastungspunkte werden hauptsächlich durch die Kehrichtverbrennung verursacht, wobei alle schädlichen Umweltwirkungen durch die Gutschriften für die Strom- und Wärmeproduktion kompensiert werden. Im Szenario Vergasung-Verbrennung ergibt sich insgesamt eine Belastung von - 91 UBP. Auch hier werden die Umweltbelastungen, verursacht durch die Aufbereitung und die Ascheentsorgung, durch die Gutschrift für die Wärmeproduktion kompensiert.

### **Siebüberlauf Vergärung**

Der Siebüberlauf aus der Vergärung wird heute in einer Kehrichtverbrennungsanlage verwertet. Im Szenario Vergasung-Verbrennung ist vor der Behandlung eine Aufbereitung des Substrats notwendig.

Die heutige Verwertung des Siebüberlaufs Vergärung führt zu -0.3 kg CO<sub>2</sub>-Äq. pro kg Substrat. Von den relevanten Emissionen entfallen 41 % auf den Transport und 59 % auf die Verbrennung. Die Aufwände werden durch die Gutschriften für die Erzeugung von Strom und Wärme kompensiert, sodass ein klimapositives Ergebnis zustande kommt. Im Szenario Vergasung-Verbrennung werden -0.32 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kg Substrat emittiert.

Die heutige Verwertung des Siebüberlaufs Vergärung ergibt eine Belastung von -239 UBP pro kg Substrat. Die Umweltbelastungspunkte werden hauptsächlich durch die Kehrichtverbrennung verursacht, wobei alle schädlichen Umweltwirkungen durch die Gutschriften für die Strom- und Wärmeproduktion kompensiert werden. Im Szenario Vergasung-Verbrennung ergibt sich insgesamt eine Belastung von - 181 UBP.

### **Gutschriften**

Das Gutschriftverfahren wurde für die durchgeführte Ökobilanz gewählt, um Produkte der Verwertung berücksichtigen zu können. Die Ergebnisse zeigen die hohe Relevanz der gewährten Gutschriften für jede Verwertungsmethode und jedes Substrat. Somit müssen die Ergebnisse immer im Kontext betrachtet werden. Für den bei der Verbrennung von Holzkorkbriketts erzeugten Strom wurde zum Beispiel angenommen, dass damit die gleiche Strommenge zum Schweizer Strommix ersetzt werden kann. Dies ist in der Realität nur für eine nationale Betrachtung gültig, bei einer Änderung der geografischen Systemgrenzen würde diese Annahme nicht mehr zutreffen. In einer Region oder Firma, bei welcher zertifizierter Strom eingesetzt wird, würde dem durch Verbrennung produzierten Strom eine kleinere Gutschrift zugeordnet werden. Mit dieser Modellierung wird die Nachfrage (z. B. von Wärme oder Strom) nicht berücksichtigt und die Annahme gemacht, dass die produzierte Energie immer abgenommen werden kann, was nicht der Realität entspricht. Dazu werden sich die Umweltwirkungen des Schweizer Strommix mit der Zeit möglicherweise verbessern, was zu kleineren Gutschriften in der Zukunft führen könnte. Ähnliches gilt für die Wärmegutschriften. Hier wurde für alle Prozesse eine Gutschrift für Wärme aus Erdgas vorgenommen, da dieser Datensatz sowohl für Nahwärme als auch industriell genutzte Wärme anwendbar ist. Eine detaillierte Betrachtung des Wärmemix könnte die Gutschriften für einzelne Prozesse reduzieren. Bei dem Vergasungs-Verbrennungsprozess ist nicht mit einer Reduzierung der Gutschrift zu rechnen, da diese Anwendung in jedem Fall Wärme aus fossilen Energieträgern ersetzt. Zudem besteht eine Unsicherheit bezüglich der Wärmeneiveaus, da die produzierten Wärmemengen aus den betrachteten Prozessen in unterschiedlichen Einsatzgebieten verwendet werden können. Dennoch kann die getroffene Annahme der Gleichwertigkeit als valide betrachtet werden, da der verwendete Datensatz sowohl für Fern- als auch für Industriewärme gilt. Damit werden alle tatsächlichen Einsatzgebiete der Wärmeströme abgebildet.



### 8.2.6 Fazit

Die ökobilanzielle Analyse hat die Umweltauswirkung der heutigen Verwertungs- und Pyrolyse-Szenarien für jedes Substrat quantifiziert und miteinander verglichen. In den Umweltbilanzen wurden die Umwelthotspots identifiziert. Die modellierte Ökobilanz zeigt, dass sich die Umsetzung der Vergasung-Verbrennung nur bedingt lohnt. Abhängig von der eingesetzten Berechnungsmethode ist die Vergasung-Verbrennung für keines der betrachteten Substrate aus ökologischer Sicht sinnvoll.

Die Aufwände der heutigen Verwertung der untersuchten Substrate werden hauptsächlich durch den Transport und den Verwertungsprozess selbst verursacht. Bei den Szenarien Vergasung-Verbrennung entstehen die Umweltwirkungen vor allem durch die Ascheentsorgung bei den Substraten mit einem hohen Ascheanteil.

Die gewährten Gutschriften für die Strom- und Wärmeproduktion wirken sich sowohl bei Verwendung der GWP100-Methode als auch der UBP-Methode auf alle betrachteten Szenarien durch eine negative Bilanzsumme aus. Die aktuelle Verwertung in einer Kehrichtverbrennungsanlage ist aufgrund ihrer zusätzlichen Gutschriften für die Stromproduktion und den dadurch höheren Gesamtwirkungsgrad der Anlage derzeit als ökologischer zu bewerten.

Mit weiteren Untersuchungen sollten für alle Ausgangsmaterialien die Modellierung der gewährten Gutschriften verfeinert und eine genauere Prozessabbildung integriert werden. In der durchgeführten Ökobilanz könnten die Unsicherheiten der erhobenen Daten die Differenzen zwischen den einzelnen Ergebnissen verändern, die allgemeinen Erkenntnisse werden jedoch als stabil beurteilt.



## 8.3 Techno-ökonomische Bewertung

### 8.3.1 Vorgehen und Methode

In diesem Kapitel wird eine techno-ökonomische Bewertung durchgeführt, um zu ermitteln, ob die Verwendung von biogenen Reststoffen zur Wärmeerzeugung durch ein Vergasungs-Verbrennungs-Konzept wirtschaftlich attraktiver ist als ihre heutige Behandlung. Zu diesem Zweck werden für jeden Brennstoff (naturbelassenes Holz (Referenz), Holzkorkbriketts, Siebüberlauf Vergärung und Siebüberlauf Kompostierung) die Kosten und Erlöse, die durch diese alternative Nutzung entstehen, mittels der Annuitätenmethode in Jahreswerte umgerechnet. Daraus wird der Preis bestimmt, der für die Beschaffung des Brennstoffs entweder ausgegeben (positiver Wert) oder erhalten (negativer Wert) werden muss. Dieser Preis entspricht dem Wert, bei dem die Summe der jährlichen Erlöse und Ausgaben für den Betreiber der Vergasungsanlage gleich Null ist (Break-Even-Point). Dieser Preis (in CHF pro Tonne angeliefertem Brennstoff) wird mit den aktuellen Marktpreisen bzw. Entsorgungsgebühren verglichen. Der Vergleich mit den aktuellen Preisen erlaubt eine grobe Einschätzung, ob die Nutzung des Brennstoffs im neuen Nutzungspfad einen Anreiz sowohl für den Brennstoffbesitzer als auch für den Betreiber der Anlage darstellt.

Die Kosten und Erlöse werden aus der Sicht des Vergasungsanlagenbetreibers betrachtet. Für die Berechnung der Varianten werden die Geldströme in vier Kategorien unterteilt:

- Kapitalgebundene Kosten
- Verbrauchsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten
- Erlöse

In allen Varianten wird eine Vergasungs-Verbrennungs-Anlage betrachtet, die 3'240'000 kWh thermische Energie erzeugt. Tabelle 9 zeigt die grundlegenden Daten, die in allen vier Varianten verwendet werden.

Tabelle 10 Rahmenbedingungen für die Anwendung von Brennstoffen in einem Vergasungs- und Verbrennungskonzept.

Basisdaten	Einheit	Wert
Nennleistung Vergaser (Feuerungswärmeleistung)	kW <sub>FWL</sub>	900
Wirkungsgrad der Vergasung (Kaltgaswirkungsgrad)	-	0.8
Nennleistung Vergaser (Gasleistung)	kW <sub>syngas</sub>	720
Wirkungsgrad der Verbrennung	-	0.9
Jahresvollaststunden	h/a	5'000
Kalkulatorischer Mischzinssatz	%	4%
Betrachtungsdauer	a	15
Annuitätsfaktor	-	0.090
Strompreis	CHF/kWh <sub>el</sub>	0.30
Wärmeverkaufspreis	CHF/kWh <sub>th</sub>	0.12
Entsorgungskosten Asche	CHF/t	350
Personalkosten	CHF/Personen*a	100'000
Instandhaltung	CHF/a	4% * Investitionskosten
Verwaltung	CHF/a	0.5% * Investitionskosten
Versicherung	CHF/a	1.0% * Investitionskosten
Unvorhergesehenes	CHF/a	0.5% * Investitionskosten



Die in dieser Analyse verwendeten Werte basieren sowohl auf experimentellen Ergebnissen, Daten der Partnerunternehmen als auch auf Annahmen. Diese Analyse stellt eine erste Bewertung der wirtschaftlichen Machbarkeit der Nutzung spezifischer biogener Reststoffe für die Wärmeerzeugung durch ein Vergasungs- und Verbrennungskonzept dar.

### 8.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 11 Kostenschätzung für die 4 Varianten

		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Element	Einheit	Holz (Referenz)	Holzkorkbriketts	Siebüberlauf Vergärung	Siebüberlauf Kompostierung
<b>Kapitalgebundene Kosten</b>					
Trockner	CHF	0	0	100'000	100'000
Zerkleinerer	CHF	0	0	100'000	100'000
Brikettierungsanlage	CHF	0	0	100'000	100'000
Vergaser, Brenner und Heissgasgebläse	CHF	1'100'000	1'100'000	1'100'000	1'100'000
Sonstige Peripherie (Lager, Förderer, Steuerung etc.)	CHF	200'000	200'000	200'000	200'000
<b>Summe Investitionskosten</b>	CHF	1'300'000	1'300'000	1'600'000	1'600'000
<b>Jährl. Kapitalgebundene Kosten</b>	CHF/a	<b>116'923</b>	<b>116'923</b>	<b>143'906</b>	<b>143'906</b>
<b>Verbrauchsgebundene Kosten<sup>1</sup></b>					
Stromverbrauch	kWh <sub>el</sub> /a	100'000	100'000	172'981	170'724
<b>Jährl. Stromkosten</b>	CHF/a	30'000	30'000	51'894	51'217
Asche Mengen	t/a	9	60	214	207
<b>Jährl. Entsorgungskosten Asche</b>	CHF/a	3'053	21'094	74'906	72'589
<b>Summe Verbrauchsgebundene Kosten*</b>	CHF/a	<b>33'053</b>	<b>51'094</b>	<b>126'800</b>	<b>123'807</b>
<b>Betriebsgebundene Kosten</b>					
Personalkosten	CHF/a	50'000	50'000	100'000	100'000
Instandhaltung	CHF/a	52'000	52'000	64'000	64'000
Verwaltung	CHF/a	6'500	6'500	8'000	8'000
Versicherung	CHF/a	13'000	13'000	16'000	16'000
Unvorhergesehenes	CHF/a	6'500	6'500	8'000	8'000
<b>Summe Betriebsgebundene Kosten</b>	CHF/a	<b>128'000</b>	<b>128'000</b>	<b>196'000</b>	<b>196'000</b>
<b>Erlöse</b>					
Jährliche Wärmeenergiebereitstellung	kWh <sub>th</sub> /a	3'240'000	3'240'000	3'240'000	3'240'000
<b>Erlös Wärmeverkauf</b>	CHF/a	388'800	388'800	388'800	388'800
<b>Maximaler Anschaffungspreis für Brennstoff</b>					
<b>Erlöse-Kosten<sup>1</sup></b>	CHF/a	<b>110'823</b>	<b>92'783</b>	<b>-77'906</b>	<b>-74'912</b>
Brennstoffbedarf	t <sub>FM</sub> /a	1'026	926	2'200	1'890
Maximaler Anschaffungspreis für Brennstoff (Frei Anlage) <sup>2</sup>	CHF/t <sub>FM</sub>	108	100	-35	-40

<sup>1</sup> ohne Brennstoffkosten

<sup>2</sup> Ein negativer Preis weist auf einen Erlös für die Annahme des Brennstoffs hin.

#### Variante 1: Holz

In Variante 1 beträgt der maximale Brennstoffpreis (Holz) 108 CHF/t<sub>TS=15%</sub>. Die Verwendung von vorgetrocknetem, naturbelassenem Holz bietet mehrere Vorteile für das Vergasungs-Verbrennungskonzept. Besonders zu erwähnen sind: (i) Verringerung der (vor Ort) erforderlichen Aufbereitungsschritte wie Trocknung, Zerkleinerung oder Verdichtung, (ii) Verringerung der zu entsorgenden Aschemenge und (iii) Verringerung des Personalbedarfs aufgrund der weniger aufwändigen Aufbereitungskette (z.B. Trockner, Brikettierungsanlage).



Der Marktpreis für trockenes Holz in Form von Hackschnitzeln liegt im Bereich zwischen 170 und 240 CHF/t<sup>6</sup> [1]. Der Marktpreis für Hackschnitzel liegt über dem maximalen Kaufpreis des Brennstoffs, weshalb die Beschaffung der Brennstoffe zum Marktpreis und unter den untersuchten Rahmenbedingungen nicht kostendeckend wäre.

Andererseits, wenn der Brennstoff (Holz) für 205 CHF/t<sub>TS=15%</sub> gekauft wird, ergibt dies Wärmegestehungskosten von 15.1 Rp/kWh<sub>th</sub>.

### **Variante 2: Holzkorkbriketts**

Der maximale Abnahmepreis für Holzkorkbriketts beträgt 100 CHF/t<sub>TS=93%</sub>. Ähnlich wie beim Holz (Variante 1), wird der Brennstoff bereits trocken und brikettiert in der Vergasungsanlage vom Erzeuger angeliefert. Dies reduziert den Bedarf an Aufbereitung vor Ort, sodass für diese Variante keine kapitalgebundenen Kosten für die Brennstoffaufbereitung für den Betreiber der Anlage berücksichtigt werden müssen. Die verbrauchsgebundenen Kosten sind aufgrund des höheren Aschegehaltes von Holzkorkbriketts (Aschegehalt=7%) und der damit verbundenen grösseren zu entsorgenden Aschemengen im Vergleich zu Holz höher. Der niedrige Wassergehalt führt zu einer leicht reduzierten Brennstoffmenge pro Jahr im Vergleich zu trockenem Holz.

Es wird geschätzt, dass für die heutige Entsorgung von Holzkorkbriketts zwischen 50 und 100 CHF pro Tonne bezahlt werden (Entsorgungskosten, inklusive Transportkosten). Aus Sicht des Anlagenbetreibers bedeutet dies einen theoretischen Abnahmepreis (angegeben als negativer Preis) von -100 bis -50 CHF/t. Diese Werte liegen deutlich unter dem maximalen Kaufpreis von 100 CHF/t<sub>TS=93%</sub> und würden einen interessanten Fall darstellen, in dem sowohl der Anlagenbetreiber als auch der Brennstoffanbieter einen wirtschaftlichen Anreiz hätte, diesen Brennstoff zu verwerten. Es kann angenommen werden, dass der Konsenspreis in der Mitte dieser beiden Werte liegen würde, nämlich bei 0 CHF/t<sub>TS=93%</sub>. Wenn dieser Brennstoff zum Nullpreis (0 CHF/t<sub>TS=93%</sub>) beschafft wird, betragen die Wärmegestehungskosten 9.1 Rp/kWh<sub>th</sub>.

### **Variante 3: Siebüberlauf Vergärung**

Der maximale Anschaffungspreis für Siebüberlauf Vergärung beträgt -35 CHF/t<sub>TS=47%</sub>. Der negative Wert bedeutet, dass der Anlagenbetreiber mindestens diesen Betrag erhalten muss, um die Kosten für die Nutzung dieses Brennstoffs zu decken.

Der Siebüberlauf aus der Vergärung ist durch einen hohen Wassergehalt und eine heterogene Zusammensetzung und Partikelgrösse gekennzeichnet. Darüber hinaus weist dieses Material einen hohen Aschegehalt auf. Diese Eigenschaften haben grosse Auswirkungen auf die Investitionen und Betriebskosten, die mit den erforderlichen Aufbereitungsschritten (Trocknung, Zerkleinerung, Brikettierung) verbunden sind. Auffallend sind auch die grossen Mengen an zu entsorgender Asche (214 t/a) im Vergleich zu naturbelassenem Holz (9 t/a). Es wird angenommen, dass die Wärme zur Trocknung des Brennstoffs als Abwärme zur Verfügung steht. Zusätzliche Kosten müssen berücksichtigt werden, wenn keine Abwärme vorhanden ist. Schliesslich ist aufgrund der grösseren Aufbereitungsschritte vor Ort mit höheren Personalkosten zu rechnen.

Die heutigen Entsorgungskosten liegen schätzungsweise im Bereich von 25 CHF/t<sub>TS=47%</sub> (exklusive Transportkosten), was einen theoretischen Abnahmepreis von -25 CHF/t<sub>TS=47%</sub> für den Anlagenbetreiber bedeutet. Da der theoretische Preis von -25 CHF/t<sub>TS=47%</sub> über dem maximal tolerierbaren Preis von -35 CHF/t<sub>TS=47%</sub> liegt, gibt es unter den hier untersuchten Rahmenbedingungen weder für den Brennstoffbesitzer noch für den Anlagenbetreiber Anreize für eine Verwendung im Vergasungs-Verbrennungskonzept. Angenommen, der Brennstoff Siebüberlauf Vergärung wird zu einem Preis von -30 CHF/t<sub>TS=47%</sub> besorgt, betragen die Wärmegestehungskosten 12.4 Rp/kWh<sub>th</sub>.

<sup>6</sup> Unter der Annahme einer Preisspanne von 50-60 CHF/Sm<sup>3</sup> (Laubholz, trockene Hackschnitzel) und Schüttdichte von 0.25-0.3 t/Sm<sup>3</sup>



#### **Variante 4: Siebüberlauf Kompostierung**

Der maximale Anschaffungspreis für Siebüberlauf Kompostierung beträgt -40 CHF/t<sub>TS=53%</sub>. Die Eigenschaften des Brennstoffs Siebüberlauf Kompostierung sind denen von Siebüberlauf Vergärung (Variante 3) sehr ähnlich, die Aussagen zu den höheren Investitions- und Betriebskosten sind daher ebenfalls zutreffend. Auch hier werden die aktuellen Entsorgungskosten auf etwa 25 CHF/t<sub>TS=53%</sub> geschätzt (exklusive Transportkosten), was für den Anlagenbetreiber einen theoretischen Abnahmepreis von -25 CHF/t<sub>TS=53%</sub> bedeutet. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen ist es unwahrscheinlich, dass ein Konsenspreis zwischen dem Brennstoffbesitzer und dem Anlagenbetreiber gefunden wird, daher besteht vordergründig kein Anreiz, den Siebüberlauf der Kompostierung in einem Vergasungs-Verbrennungskonzept zu verwerten.

Angenommen, der Brennstoff wird zu einem Preis von -32.5 CHF/t<sub>TS=53%</sub> besorgt, betragen die Wärmegestehungskosten 12.4 Rp/kWh<sub>th</sub>.

#### **Fazit:**

Anhand der vier Varianten ist erkennbar, dass die Eigenschaften der unverarbeiteten Ausgangsmaterialien den Bedarf einer spezifischen Logistik bestimmen werden, insbesondere in Bezug auf die Aufbereitung der Substrate (Stückigkeit, Trocknung). Bei Brennstoffen, die eine aufwändige Aufbereitung erfordern, führt dies zu zusätzlichen Kosten, sowohl in Bezug auf die Investitionen als auch auf die verbrauchsgebundenen Kosten (insbesondere für Stromkosten und Ascheentsorgung). Wenn keine Abwärme zur Verfügung steht, um feuchte Brennstoffe vorzutrocknen, sind zusätzliche Kosten zu berücksichtigen.

Ein zentraler Vorteil der Verwendung von biogenen Reststoffen besteht darin, dass die entstehenden Mehrkosten durch eine kostengünstige Verfügbarkeit der Brennstoffe kompensiert werden können. Dies ist bei Variante 2 (Holzkorkbriketts) der Fall. Bei Variante 1 (Holz), Variante 3 (Siebüberlauf Vergärung) und Variante 4 (Siebüberlauf Kompostierung) hat sich herausgestellt, dass es aufgrund des aktuellen Marktpreises schwierig ist, den Brennstoff zu einem Preis zu erhalten, der einen kostendeckenden Betrieb ermöglicht. Da die Bedingungen auf lokaler Ebene stark variieren können, insbesondere die Brennstoffpreise, ist eine genauere Untersuchung des Einzelfalls erforderlich, um festzustellen, ob ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist oder nicht. Das Vorhandensein von Anlagen (Trockner, Brikettierungsanlage, etc.) am oder in der Nähe des Projektstandorts, die Verfügbarkeit von Finanzierungsprogrammen und Skaleneffekte sind Faktoren, die sich auf die Rentabilität eines Projekts auswirken und die im Einzelfall geprüft werden müssen.



## 9 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Feldmessungen haben gezeigt, dass der Vergasungs-Verbrennungsprozess für bestimmte biogene Reststoffe mit definierter konstanter Zusammensetzung und Brennstoffeigenschaften (z.B. Stückigkeit, Feinanteil) prinzipiell möglich ist und niedrige Emissionswerte erreicht werden können. Die Emissionen von SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> und PCDD/F bei der Verwendung der untersuchten Brennstoffe hängen stark von der Brennstoffzusammensetzung ab. Es hat sich gezeigt, dass sowohl die Zusammensetzung als auch die anderen Brennstoffeigenschaften (z.B. Feinanteil) stark variieren können. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass sich die im Projektverlauf favorisierten LICO-Holzkorkbriketts aufgrund ihres hohen Feinanteils nicht für einen Langzeitbetrieb in einem Vergaser dieser Bauart eignen. Allenfalls könnte eine Mischung mit Holzscheiten oder ein anderes Brikettierverfahren Abhilfe schaffen.

Für die Verwendung der alternativen Brennstoffe in Vergasern muss eine Brennstoffspezifikation mit Werten und Toleranzen zur Zusammensetzung und den Brennstoffeigenschaften definiert werden und durch geeignete Qualitätssicherungs-Massnahmen im Herstellungsprozess muss sichergestellt werden, dass der Brennstoff der Spezifikation entspricht (analog zu Holzpellets). Wie diese Spezifikation aussehen könnte, sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Das Verfahren kann einen ökologischen Mehrwert gegenüber der Behandlung der biogenen Reststoffe in Kehrichtverbrennungsanlagen darstellen, wenn der Gesamtwirkungsgrad der Vergasungs-Verbrennungsanlage gesteigert wird, z.B. durch die Erzeugung von Strom und Wärme. Zusätzlich besteht eine ökonomische Attraktivität, sofern die Entsorgungskosten für holzige Abfallströme steigen. Unter diesen Umständen kann das getestete Verfahren der kombinierten Vergasung und Verbrennung eine Möglichkeit darstellen, lokal Wärme mit höherer Temperatur für industrielle Anwendungen zur Verfügung zu stellen.

## 10 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Anwendung der Vergasung-Verbrennung steht zum jetzigen Zeitpunkt noch vor einigen Herausforderungen. Dies betrifft insbesondere die Notwendigkeit weiterer Entwicklungsarbeit in Bezug auf den Vergaser, der gewisse Anforderungen an die Brennstoffzusammensetzung und insbesondere den physikalischen Brennstoffeigenschaften (z.B. Stückigkeit, Feinanteil) stellt. Weiterhin stellt die Bewilligung dieser Anlagen eine Hürde dar. Zudem ist zum aktuellen Zeitpunkt der Markt für die untersuchten Brennstoffe fraglich, daher erscheint eine Markteinführung des Verfahrens in naher Zukunft unwahrscheinlich.

Aktuell ist eine Verwertung der untersuchten Brennstoffe wie bisher in grösseren Anlagen mit hohem Wirkungsgrad und grosstechnischer Abgasreinigung vermutlich sinnvoller. Die Abwärme aus der Stromproduktion dieser Anlagen ist jedoch meist niedrigerer Temperatur als bei Vergasung-Verbrennung und kann nicht die ganze Prozesswärme mittels fossiler Energieträger ersetzen. Eine Verfeinerung der Basisdaten für die Ökobilanzierung könnte für weitergehende Vergleiche der Prozesse wertvolle Informationen liefern. Weiterhin sollte überlegt werden, welche Vergleichsbasis gewählt werden soll. Bei Überlegungen, die den Ersatz fossiler Brennstoffe in industriellen Anwendungen zum Gegenstand haben, sollte statt der Entsorgungswege der biogenen Reststoffe der zu ersetzende Wärmebereitstellungsprozess als Vergleichsprozess betrachtet werden.



## 11 Nationale und internationale Zusammenarbeit

An diesem Projekt haben zwei weitere Unternehmen, die nicht in der Schweiz ansässig sind, mitgearbeitet.

Der Biomasse-Vergaser wurde von der deutschen Firma AHT CleanTech Solutions erstellt. AHT ist ein börsennotiertes, hochinnovatives CleanTech Unternehmen mit drei Jahrzehnten gewachsener Engineering-Expertise und starken Technologie-Partnern. Sie konzipieren und installieren auf die Kundenbedürfnisse ausgelegte Biomassekraftwerke und CleanTech-Anlagen, die zurzeit auf vier Kontinenten für saubere Energie sorgen.

Im vorliegenden Projekt hat AHT unter der Federführung von Gero Ferges Vorversuche mit den ausgewählten Biomassen durchgeführt, ihre Eignung für den Doppelfeuervergaser untersucht und die Prozessparameter des Vergasers für die Vergasung der verschiedenen Biomassen optimiert.

Der Synthesegas-Brenner wurde von der niederländischen Firma CharcoTec geliefert. Diese Firma ist spezialisiert auf Prozesse zur Herstellung von Pflanzenkohle und schadstoffarmer Verbrennung der Pyrolysegase.

Den LowNOx-Brenner für das vorliegende Projekt hat CharcoTec in Koordination mit AHT ausgelegt und hergestellt.

Der Energiepark Grischa in Chur weist eine hohe räumliche Dichte und Vielfalt an Produktionsstätten für erneuerbare Energie mit zukunftsträchtigen und innovativen Technologien auf. Er soll an realen Beispielen auf kleinem Raum die erneuerbaren Energien anschaulich vorstellen und somit das Bewusstsein und das Verständnis u.a. für eine nachhaltige Land- und Forstwirtschaft als Energielieferantin stärken.

## 12 Literaturverzeichnis

AEE SUISSE (2019) «Faktensammlung Wärme Herkunft und Nutzung in der Schweiz»

BAFU (2023): «Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2022 nach Verwendungszwecken»

Basu P. (2018): "Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory"

BFE (2019): "Staubförmiger Biomasse-Brennstoff für den Thermoölprozess" [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=35218> [Zugegriffen: 01-Juli-2020].

BFE (2023): «Verwertungspfade Holzenergie Ressourceneffizienz verschiedener Verwertungspfade zur Nutzung von Energieholz»

FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2014): «Leitfaden Feste Biobrennstoffe», ISBN 9783000153891

IEA (2021): «Decarbonizing industrial process heat: the role of biomass»

Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (2016): «Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren»; 3. Auflage; Springer

Kronenberg, A., Bernard C. F. (2016): «Kompogas – Closing the Loop for Bio Waste». Bio Waste, 20.



Malico et al. (2019): "Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry"

Milani, A., Saponaro, A. (2001): IFRF Combust. J., Article Number 200101

Obernberger, I., Brunner, T. (2015): «Advanced Characterisation Methods for Solid Biomass Fuels»

Thees, O.; Burg, V.; Erni, M.; Bowman, G.; Lemm, R. (2017): «Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET». WSL Berichte, 57. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.

Vogel, A. (2007): «Dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen – Eine technische und ökonomische Bewertung der Vergasung im Vergleich zur Verbrennung», 2. Ausgabe, Institut für Energetik und Umwelt GmbH

## 13 Anhang

### 13.1 Vorversuche mit Holzkorkbriketts

Mit den Holzkorkbriketts wurden Abbrandversuche vorgenommen. Der Versuchsaufbau und die Anordnung der Messstellen sind in Abbildung 29 zu sehen. Der Druckabfall wird alle 2 Minuten direkt unterhalb des Gitterrosts gemessen. Die Temperatur wird mit Thermoelementen vom Typ K an vier verschiedenen Stellen oberhalb des Gitterrosts gemessen und kontinuierlich aufgezeichnet. Der Luftvolumenstrom wird über einen Seitenkanalverdichter bereitgestellt, über einen Kugelhahn reguliert und mit einem ifm SD8000 Druckluftzähler gemessen.

#### **Abstände der Temperaturmessstellen**

##### **zum Gitterrost:**

Temp. 1: 50 mm

Temp. 2: 100 mm

Temp. 3: 250 mm

Temp. 4: 400 mm

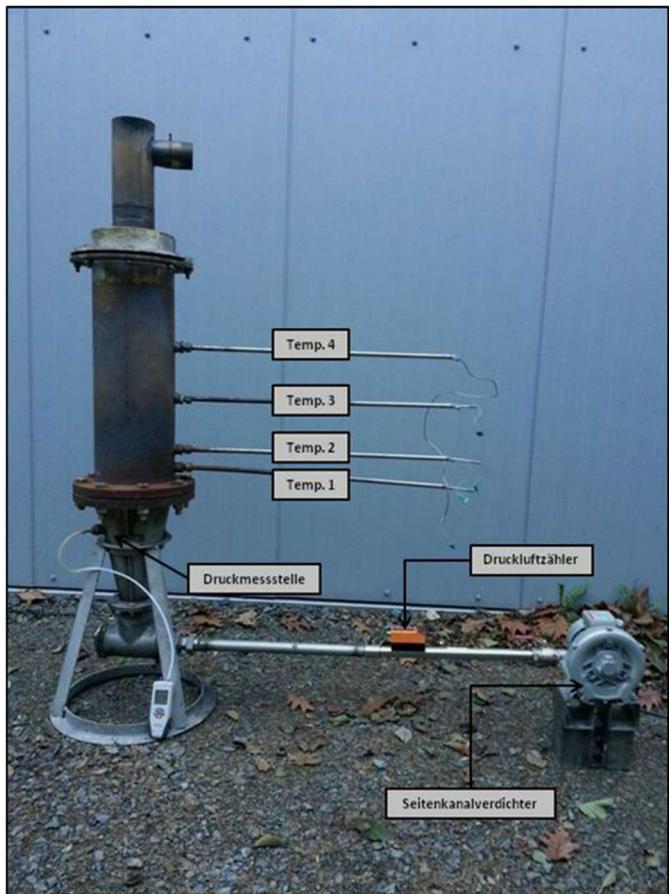
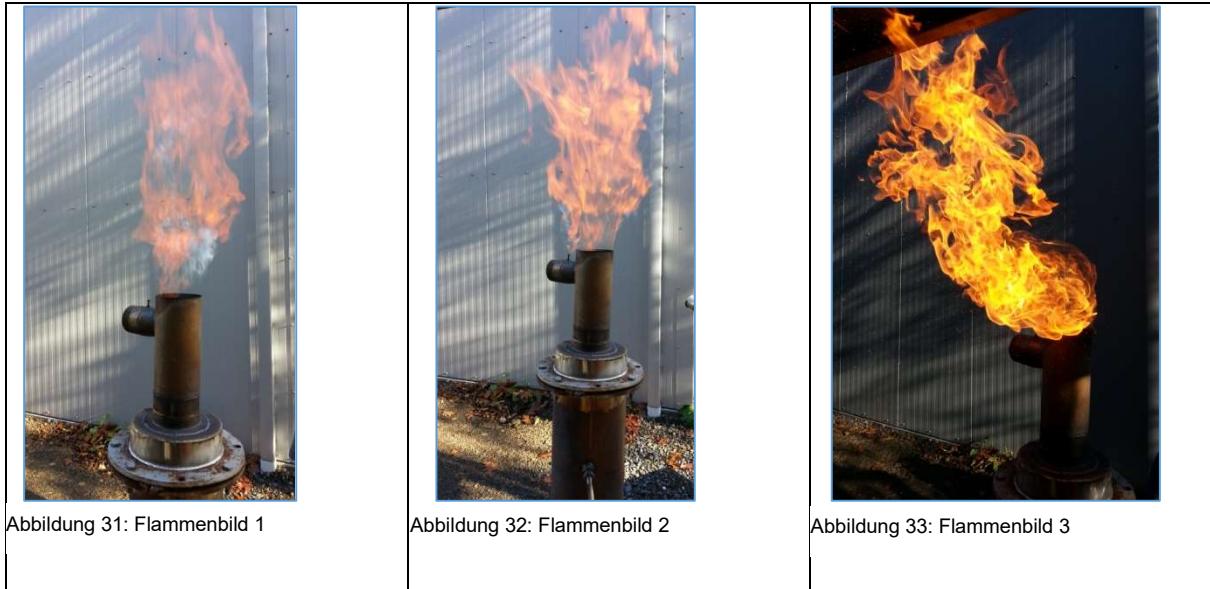


Abbildung 30: Versuchsaufbau

### Beobachtungen

Die Probe bildete, nach anfänglicher Rauchentwicklung, ein leicht entzündliches Gas, welches mit gelb-orangener Flamme brannte (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31). Die Flamme brannte für ca. 40 Minuten. Zwischenzeitlich kam es zu erheblichem Funkenflug und erhöhter Gasfreisetzung, was die Stabilität der Flamme deutlich beeinflusste (siehe Abbildung 32).



Die gemessenen Temperaturen in Abhängigkeit der Zeit sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Verläufe zeigen, dass die Temperatur mit zunehmendem Abstand vom Gitterrost abnimmt. Der höchste gemessene Wert liegt mit ca. 1300 °C bei Temp. 1 vor.

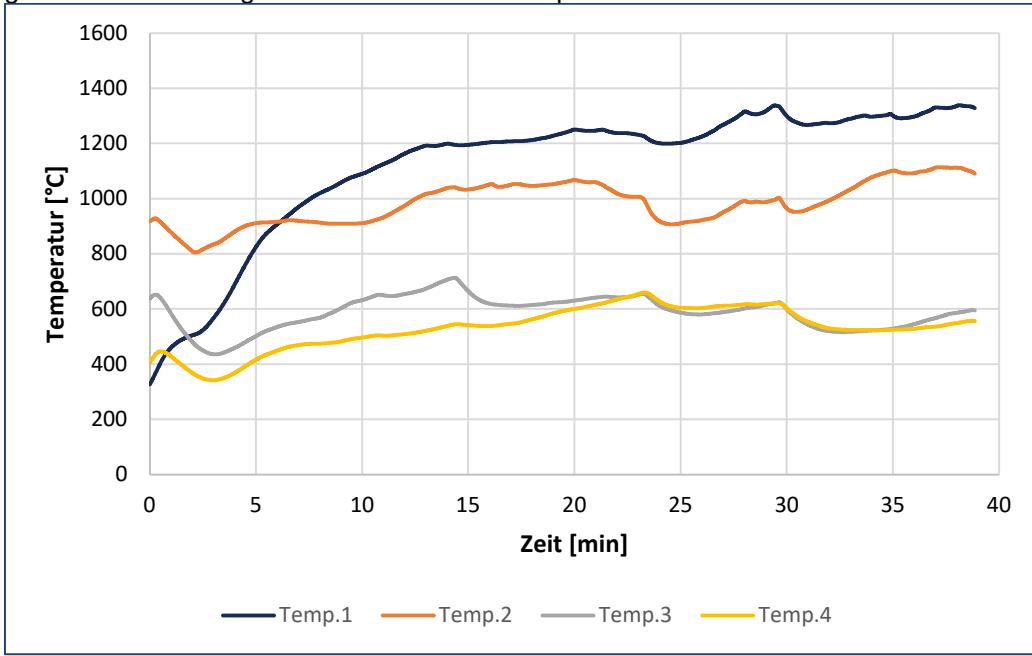


Abbildung 34: Temperaturverläufe der Vorversuche mit Holzkorkbriketts

Der gemessene Druckverlauf unter dem Gitterrost ist in Abbildung 34 zu sehen. Der Druckverlust steigt mit zunehmender Versuchsdauer und unterliegt zum Teil starken Schwankungen.

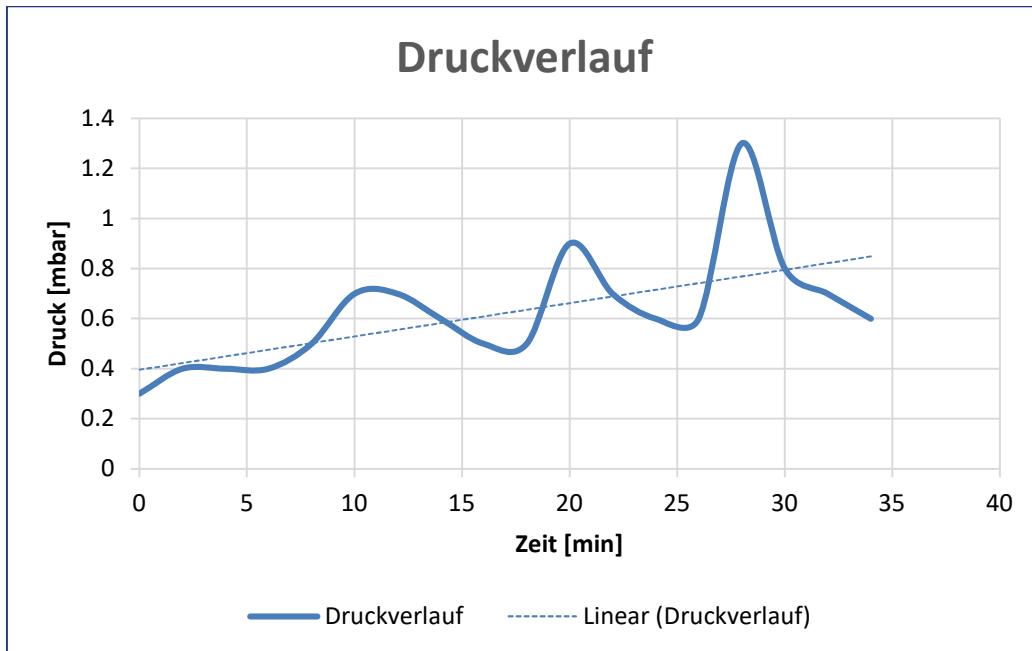


Abbildung 35: Verlauf von Druckverlust über Versuchsdauer

Bei den Vorversuchen der LICO-Holzbriketts stellten wir fest, dass diese ein langsameres Reaktionsverhalten haben, verglichen zu Briketts, die aus frischer Biomasse hergestellt werden. Ferner besitzen diese Briketts einen höheren Ascheanteil.

Daraus folgerte sich die Zielsetzung, dass die Verweilzeit des Brennstoffes und die Menge der auszutragenden Asche angepasst werden müssen.

Ferner müssen umfangreichere weitere Versuche mit dem Brennstoff durchgeführt werden.

Wie in dem zuvor beschrieben wurden daher die Anpassung der Luftzuführung und die Verstellung des Ascherostes vorgesehen.

### 13.2 Instrumentierungskonzept

Bezeichnung	Messgrösse	Messprinzip	Koordinaten (P&ID)	Schnittstelle AHT	Schnittstelle FHNW
FI 1	Verbrennungsluftmassenstrom, total	Einlaufdüse: Luftdruck abs. Differenzdruck Temperatur	Ansaugstutzen (B1)	Runder Rohrquerschnitt am Eintritt der Luftansaugung.	Einlaufdüse zum Aufstecken auf Rohrdurchmesser
FI 2	Verbrennungsluftmassenstrom, Pilotbrenner	Hitzdrahtanemometer	Pilotluftleitung (BC6)	- $\frac{3}{4}$ " Gewindemuffe - Gerade Einlauflänge 20 D - Gerade Auslauflänge 5 D	Messsonde mit $\frac{3}{4}$ " Gewinde
FI 3	Verbrennungsluftmassenstrom, Syngasbrenner	Hitzdrahtanemometer	Brennerluftleitung (C7)	- $\frac{3}{4}$ " Gewindemuffe - Gerade Einlauflänge 20 D - Gerade Auslauflänge 5 D	Messsonde mit $\frac{3}{4}$ " Gewinde



PI 1	Gasdruck vor Brenner	Differenzdruck	Gasleitung (C6)	<ul style="list-style-type: none"><li>- 6x1 Röhrchen Bündig mit der Innenwand der Gasleitung kurz vor dem Brenner.</li><li>-Gerade Einlauflänge: 10D</li><li>-Gerade Auslauflänge: 5D</li><li>- Abschluss des Röhrchen mit einem 6mm Swagelok Kugelhahn.</li></ul>	Messleitung mit 6mm Swagelock
PI 2	Druck im Brennraum	Differenzdruck	EM01	<ul style="list-style-type: none"><li>-6x1 Röhrchen Bündig mit der Innenwand der Brennkammer ca. auf halber Höhe der Brennkammer</li><li>-Röhrchen sollte ca. 100mm über die Isolation der Brennkammer ragen.</li><li>-Abschluss des Röhrchens mit einem 6mm Swagelok Rohrverinder mit Blindkappe.</li></ul>	Messleitung mit 6mm Swagelock
TI 1	Gastemperatur vor Brenner	PT 100	Gasleitung (C6)	Tauchhülse 6mm.	PT 100 6mm
TI 2	TI2 Abgastemperatur nach Brennkammer	Thermoelement Typ K		<ul style="list-style-type: none"><li>- <math>\frac{1}{2}</math>" Gewindemuffe</li><li>- Abschluss möglichst nahe an der Brennkammer</li></ul>	Thermoelement mit $\frac{1}{2}$ " Gewinde
TI 3	Abgastemperatur bei zweiter EMI Messung	Thermoelement Typ K	Abgasleitung (C7)	<ul style="list-style-type: none"><li>- <math>\frac{1}{2}</math>" Gewindemuffe</li><li>Gerade Stromab der EMI</li><li>Messung</li></ul>	Thermoelement mit $\frac{1}{2}$ " Gewinde
TI 4	Temperaturmessung vor Rauchgasgebläse	Thermoelement Typ K	Abgasleitung (C7)	<ul style="list-style-type: none"><li>- <math>\frac{1}{2}</math>" Gewindemuffe</li><li>Gerade Stromab der EMI</li><li>Messung</li></ul>	Thermoelement mit $\frac{1}{2}$ " Gewinde
QI 1	Syngaszusammensetzung vor LowNOx-Brenner	Absaugung, Verdünnung mit N2 dann zu Gasanalysator / Sammeln der Proben in einem Probesack	Gasleitung (D4)	<ul style="list-style-type: none"><li>- 8x1 Röhrchen Bündig mit der Innenwand der Gasleitung kurz vor dem Brenner.</li><li>- Abschluss des Röhrchen mit einem 8mm Swagelok Kugelhahn.</li></ul>	Messleitung mit 8mm Swagelok
QI 2	Abgaszusammensetzung unverdünnt direkt nach der Brennkammer	Absaugung zu Gasanalysator	Abgasleitung (C7)	<ul style="list-style-type: none"><li>EMPA Stutzen</li><li>Abschluss möglichst nahe an der Brennkammer</li></ul>	EMPA Flansch mit den Anschlüssen für die Emissionsmessung
QI 3	Abgaszusammensetzung Dioxinmessstelle	Absaugung zu Gasanalysator	Abgasleitung (C7)	<ul style="list-style-type: none"><li>- EMPA Stutzen</li><li>- Ca 3000 mm nach der Mischluftzuführung</li></ul>	EMPA Flansch mit den Anschlüssen für die Emissionsmessung



QI 4	Syngaszusammensetzung mit Betrieb des BHKW-Motors jedoch ohne LowNOx-Brenner	Sammeln der Proben in einem Probesack		- 8mm Swagelok Kugelhahn.	Messleitung mit 8mm Swagelok
------	--	---------------------------------------	--	---------------------------	------------------------------

Abbildung 36 Messstellen mit Schnittstellen in der Gasverbrennungsanlage

### 13.3 Ökobilanzierung

#### 13.3.1 Wirkungsabschätzungsmethoden

##### GWP20/100

Die CO<sub>2</sub>-Bilanz (auch CO<sub>2</sub>-Fussabdruck, Treibhausgasbilanz, u.a.) ist ein Mass für den Gesamtbetrag von Kohlenstoffdioxid-Emissionen, der direkt bzw. indirekt durch Aktivitäten oder Lebensstadien von Unternehmen, Produkten oder Personen entstehen bzw. verursacht werden. Neben Kohlenstoffdioxid werden auch andere Treibhausgase bilanziert. Die Methode verwendet Faktoren des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ("IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change," n.d.) und hat als Einheit CO<sub>2</sub>-Äquivalente (kurz CO<sub>2</sub>e) (siehe Abbildung Abbildung 36 Auswahl von Treibhausgasemissionen und deren Faktoren relativ zu CO<sub>2</sub>). In dieser Studie wird der Standardbetrachtungszeitraum von 100 Jahren verwendet.

	Half-life (years)	GWP time horizon	
		20 years	100 years
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	Complex	1	1
Methane (CH <sub>4</sub> )	12.4	84	28
Nitrous oxide (N <sub>2</sub> O)	121	264	265
HFC-23	222	10,800	12,400
HFC-134a	13.4	3710	1300
CF <sub>4</sub> (PFC)	50,000	4880	6630
Sulfur hexafluoride (SF <sub>6</sub> )	3200	17,500	23,500
Nitrogen trifluoride (NF <sub>3</sub> )	500	12,800	16,100

Abbildung 37 Auswahl von Treibhausgasemissionen und deren Faktoren relativ zu CO<sub>2</sub>

##### Umweltbelastungspunkte (UBP)

Die Methode der ökologischen Knaptheit berücksichtigt ein breites Spektrum von Umweltbelastungen und fasst diese durch Vollaggregation in einer Kennzahl zusammen. Das Ergebnis sind Umweltbelastungspunkte (UBP). Zentrale Grösse der Methode sind die Ökofaktoren, welche die Umweltbelastung einer Schadstoffemission resp. Ressourcenentnahme in der Einheit UBP pro Mengeneinheit angeben. Der Ökofaktor eines Stoffes leitet sich aus der Gesetzgebung oder entsprechenden politischen Zielen ab. Je mehr die aktuellen Emissionen resp. der Ressourcenverbrauch das gesetzte Umweltschutz-Ziel überschreiten, desto grösser wird der Ökofaktor, ausgedrückt in UBP (Frischknecht and Büsser Knöpfel 2013).

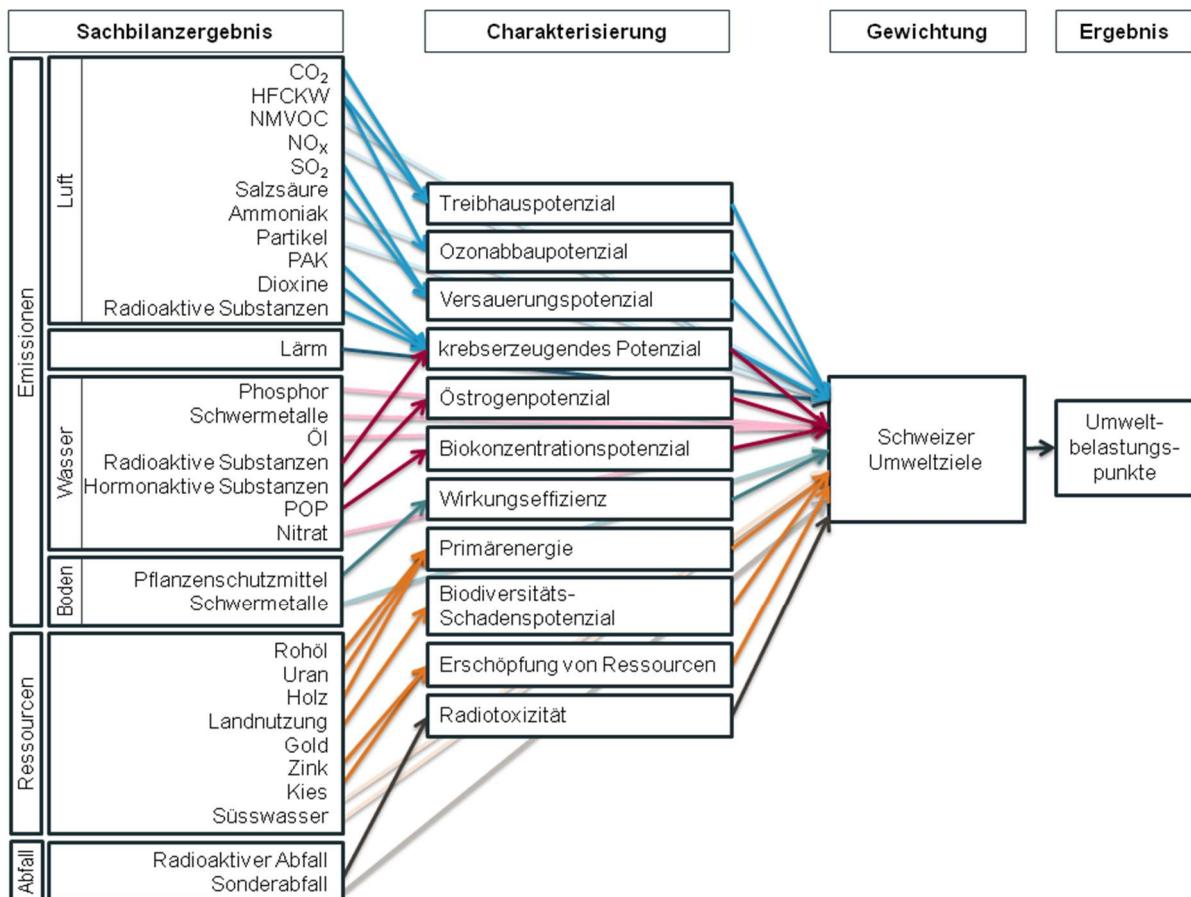


Abbildung 38 Struktur der Wirkungsabschätzungs methode Umweltbelastungspunkte (Frischknecht und Büsser Knöpfel 2013)

### 13.3.2 Sachbilanzdaten

Holzkorkbriketts - Heute	Wert	Einheit	Quelle
Transport LKW	0.3	tkm	Angabe Erzeuger
Brikettierung	8.73E-3	kWh/kg	Berechnung
Altholzverbrennung	1	kg	Berechnung
Gutschrift - Strom	-0.8	kWh/kg	Berechnung
Gutschrift - Wärme	-13.45	MJ/kg	Berechnung

Siebüberlauf Vergärung - Heute	Wert	Einheit	Quelle
Transport LKW	0.1	tkm	Annahme
Altholzverbrennung	1	kg	Berechnung



Gutschrift - Strom	-0.64	kWh/kg	Berechnung
Gutschrift - Wärme	-10.82	MJ/kg	Berechnung

<b>Siebüberlauf Kompostierung - Heute</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle</b>
Transport LKW	0.1	tkm	Annahme
Altholzverbrennung	1	kg	Berechnung
Gutschrift - Strom	-0.43	kWh/kg	Berechnung
Gutschrift - Wärme	-7.22	MJ/kg	Berechnung

<b>Holzkorkbriketts - VV</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle</b>
Transport LKW	0	tkm	Annahme
Brikettierung	8.73E-3	kWh/kg	Berechnung
Emissionen CO2, biogen	1.875	kg	Versuchsdaten
Emissionen CO, biogen	1.781E-4	kg	Versuchsdaten
Emissionen NO2	1.98E-3	kg	Versuchsdaten
Emissionen SO2	2.41E-4	kg	Versuchsdaten
Emissionen PAK	8.9E-9	kg	Versuchsdaten
Emissionen Dioxine	7E-13	kg	Versuchsdaten
Emissionen PM	7.3E-5	kg	Versuchsdaten
Ascheentsorgung	0.069	kg	Versuchsdaten
Gutschrift - Wärme	-13.8	MJ/kg	Berechnung

<b>Siebüberlauf Vergärung - VV</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle</b>
Transport LKW	0	tkm	Annahme
Brikettierung	8.73E-3	kWh/kg	Berechnung
Trocknung	8E-9	p	ecoinvent
Zerkleinerung	5.3E-8	p	ecoinvent
Emissionen CO2, biogen	1.83	kg	Versuchsdaten
Emissionen CO, biogen	3.04E-4	kg	Versuchsdaten
Emissionen NO2	2.52E-3	kg	Versuchsdaten
Emissionen SO2	1.36E-4	kg	Versuchsdaten
Emissionen PAK	4.41E-8	kg	Versuchsdaten
Emissionen Dioxine	2.47E-12	kg	Versuchsdaten



Emissionen PM	9.69E-5	kg	Versuchsdaten
Ascheentsorgung	0.2	kg	Versuchsdaten
Gutschrift - Wärme	-11.1	MJ/kg	Berechnung

<b>Siebüberlauf Kompostierung - VV</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle</b>
Transport LKW	0	tkm	Annahme
Brikettierung	8.73E-3	kWh/kg	Berechnung
Trocknung	8E-9	p	ecoinvent
Zerkleinerung	5.3E-8	p	ecoinvent
Emissionen CO2, biogen	1.91	kg	Versuchsdaten
Emissionen CO, biogen	3.41E-4	kg	Versuchsdaten
Emissionen NO2	1.11E-3	kg	Versuchsdaten
Emissionen SO2	4.29E-4	kg	Versuchsdaten
Emissionen PAK	1.15E-8	kg	Versuchsdaten
Emissionen Dioxine	4.89E-12	kg	Versuchsdaten
Emissionen PM	2.01E-4	kg	Versuchsdaten
Ascheentsorgung	0.477	kg	Versuchsdaten
Gutschrift - Wärme	-7.4	MJ/kg	Berechnung