

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades eines "Bachelor of Engineering"
im Studiengang Elektrotechnik

Thema: "Untersuchung zur Verbesserung des Betriebs der
Biogasanlage Stadtwerke Wanzleben (Notfackel,
Entschwefelung, Hydraulik)"

Eingereicht von: **Jonas Grothe**

Angefertigt für: Stadtwerke Wanzleben

Matrikel: E 2009

Ausgabetermin: 17. Februar 2014

Abgabetermin: 28. April 2014

1. Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr.-Ing. Jan Mugele

2. Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr.-Ing. Dieter Haentzsch

Betrieblicher Betreuer: Herr Dipl.-Ing. Hans-Walter Franke

Hochschule Magdeburg-Stendal (FH)
Fachbereich Elektrotechnik
Breitscheidstr. 2

J.-W. -v. Goethestraße 17
O.T. Wanzleben
39164 Stadt Wanzleben - Börde
Tel.: 039209/2686
Fax.: 039209/44354

39114 Magdeburg

Ihr Schreiben vom	Ihre Zeichen	Unsere Zeichen	Datum
			24.02.2014

Betreff: Bachelorarbeit für Herrn Jonas Grothe (Matrikel-Nr. 20093288)

Thema: Untersuchung zur Verbesserung des Betriebs der Biogasanlage Stadtwerke Wanzleben (Notfackel, Entschwefelung, Hydraulik)

Sehr geehrter Prof. Dr. Mugele,

im Auftrag der Stadtwerke Wanzleben GmbH wird Herr Grothe den Betrieb der Biogasanlage Stadtwerke Wanzleben untersuchen. Innerhalb dieser Aufgabenstellung sind folgende Schwerpunkte enthalten:

- die Darstellung des laufenden Betriebs
- Projektierung einer Notfackel
- Projektierung einer Entschwefelungseinrichtung
- Analyse der hydraulischen Einbindung der Blockheizkraftwerke
- Vorschläge notwendiger, bzw. möglicher Maßnahmen

Mit freundlichen Grüßen



Herr Franke
(Geschäftsführer)

Stadtwerke Wanzleben GmbH
Wanzleben
J.-W. v. Goethestraße 17
39164 Stadt Wanzleben - Börde
Tel.: 039209-2686 / Fax: 039209-44354

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGS- & FORMELZEICHENVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS.....	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
1 ZIELSTELLUNG.....	1
2 GRUNDLAGEN	2
2.1 Bildung von Schwefelwasserstoff	2
2.2 Beeinflussung der Umwelt durch Biogas	5
3 AKTUELLE SITUATION	10
3.1 Ex-Zonen	13
4 NOTFACKEL	17
4.1 Standort und Fundament	17
4.2 Technische Eigenschaften.....	20
4.3 Sicherheitstechnische Aspekte	22
5 AKTIVKOHLEFILTER	23
5.1 Standort und Fundament	23
5.2 Technische Eigenschaften und Funktionsprinzip.....	24

6	HYDRAULISCHE EINBINDUNG DER BHKWS IN DAS FERNWÄRMENETZ.....	30
6.1	Durchflussregelung mit Differenzdruckregler	31
6.2	Anbindung der Biogasanlagen vor die hydraulische Weiche.....	34
6.3	Regelung durch Pufferspeicher.....	37
6.3.1	Dimensionierung des Pufferspeichers	38
6.4	Fazit	45
7	QUELLENVERZEICHNIS.....	45
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	48
	SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	45

Abkürzungs- & Formelzeichenverzeichnis

A_M	Mantelfläche des Pufferspeichers
A_{Boden}	Bodenfläche des Pufferspeichers
A_{Deckel}	Deckelfläche des Pufferspeichers
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
c	spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgers
$d_{...}$	Durchmesser der Schichten
DN	Nennweite (innerer Durchmesser eines Rohres)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EN	Europäische Normen
Ex-Zone	Explosionsgefährdete Zone
FCKW	Flour-Chlor-Kohlen-Wasserstoffe
FM	Frischmasse
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
H_2S	Schwefelwasserstoff
H_2SO_3	Schwefelsäure
HS^-	Hydrosulfidionen
$\Delta H_2S(g)$	aus dem Biogas entfernter Schwefelwasserstoff
HK	Heizkesseld
IP	International Protection (Schutzart bei elektrischen Geräten)
$K_{Aktivkohle}$	Beladungskapazität von Aktivkohle
m	Masse des Pufferspeichers
$\dot{m}_{Aktivkohle}$	Aktivkohleverbrauch
M_{H_2S}	Molmasse von Schwefelwasserstoff
M_S	Molmasse von Schwefel
Nm^3	Normkubikmeter

$O_2(aq)$	Sauerstoff (Flüssigphase)
OH^-	Hydroxidionen
P_{thBHKW}	Thermische Leistung des BHKWs
ρ_0	Normaldruck
$\rho_{\ddot{u}}$	Überdruck im Fermenter
ρ_{H_2S}	Dichte von Schwefelwasserstoff
PN	Nennndruck
ppm	parts per million (relative Maßangabe)
\dot{Q}_{ges}	Gesamtwärmeverlust
Q_h	stündlicher Gasstrom
Q_P	Durchfluss des Wärmeträgermediums auf Verbraucherseite
Q_S	Durchfluss des Wärmeträgermediums auf Erzeugerseite
\dot{Q}_V	Wärmeverlust an der Boden-/Deckelfläche
$\dot{Q}_{V,M}$	Wärmeverlust an der Mantelfläche
R	allgemeine Gaskonstante
S_2^-	Sulfid
$s_{m,...}$	mittlere Dämmschichtdicke
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SO_2	Schwefeldioxid
SO_4^-	Sulfat-Ion
s_{Stahl}	Schichtdicke des Stahls
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf
ΔT_{Mantel}	Temperaturdifferenz an der Mantelfläche
t	Überbrückungszeit
T	Temperatur im Gasraum des Fermenters
T_1	Vorlauftemperatur auf Erzeugerseite
T_2	Rücklauftemperatur auf Erzeugerseite
T_3	Vorlauftemperatur auf Verbraucherseite
T_4	Rücklauftemperatur auf Verbraucherseite

t_a	jährliche Betriebsstunden BHKW
$T_{Au\beta en}$	Außentemperatur
$T_{Speicher}$	Speichertemperatur
V_a	jährlicher Biogasverbrauch BHKW
\dot{V}_{Biogas}	Volumenstrom Biogas
V_m	Dämmmaterialvolumen
V_P	Volumenstrom auf Wärmeerzeugerseite
V_S	Volumenstrom auf Wärmeverbraucherseite
λ	Wärmeleitfähigkeit
λ_{Stahl}	Wärmeleitfähigkeit von Stahl
ϑ_1	Innentemperatur des Speichers
ϑ_2	Außentemperatur

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schwefelgehalt verschiedener Substratstoffe	3
Tabelle 2: Zusammensetzung von Biogas	5
Tabelle 3: Treibhauspotentiale der einzelnen Treibhausgase	6
Tabelle 4: Beispiel einer Fruchtfolge mit der Energiepflanze Zuckerrübe im Landbau mit Viehhaltung	7
Tabelle 5: Durchschnittlicher Nährstoffgehalt flüssiger Gärrückstände.....	8
Tabelle 6: Betriebsstunden und Biogasverbrauch der BHKWs	10
Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Lösungsvorschläge	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachter hydraulischer Plan des Betriebsgeländes Stadtwerke Wanzleben	12
Abbildung 2: Deklaration der Ex-Zonen	15
Abbildung 3: Ex-Zone bei Folienabdeckung des Gärbehälters ¹¹	16
Abbildung 4: Schematische Darstellung der BGA Stadtwerke Wanzleben.....	17
Abbildung 5: Möglicher Standort der Notfackel	18
Abbildung 6: Anordnung der Teilfundamente der Notfackel	19
Abbildung 7: Möglicher Standort des Aktivkohlefilters	23
Abbildung 8: Schematische Darstellung eines 3-Kammer-Aktivkohlefilter-Systems.....	26
Abbildung 9: Regelung durch Differenzdruckregler.....	31
Abbildung 10: Abbildung 11: Volumenstrom- und Differenzdruckregler Typ 42-37	32
Abbildung 12: Anbindung vor hydraulischer Weiche	34
Abbildung 13: Hydraulische Weiche Betriebszustand 1	35
Abbildung 14: Hydraulische Weiche Betriebszustand 2	35
Abbildung 15: Hydraulische Weiche Betriebszustand 3	36
Abbildung 16: Einbindung mit zusätzlichem Pufferspeicher	37

1 Zielstellung

Im Sommer 2011 hat der Deutsche Bundestag die Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) beschlossen. Diese gilt nun seit dem 01.01.2012. Eine hierin beschlossene Änderung der unter §6 aufgeführten technischen Vorgaben sieht vor, dass Anlagenbetreiber von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Biogas sicherstellen müssen, dass bei der Erzeugung des Biogases zusätzliche Gasverbrauchseinrichtungen zur Vermeidung einer Freisetzung von Biogas verwendet werden¹.

Diese Regelung betrifft ab 01.01.2014 auch Bestandsanlagen. Somit ist auch die Stadtwerke Wanzleben GmbH als Betreiber einer Biogasanlage in der Pflicht eine solche Gasverbrauchseinrichtung nachzurüsten. Die einfachste Lösung bietet hier die Installation einer stationären Gasfackel, die geeignet sein muss, im Notfall die gesamte Menge des produzierten Gases umweltfreundlich zu verbrennen.

Sämtliche gasführende Teile der Anlage und allen voran die Blockheizkraftwerke sind anfällig gegenüber den korrosiven Bestandteilen des Biogases. Dabei fällt vor allem der, bei der Biogasproduktion entstehende Schwefelwasserstoff ins Gewicht. Zusammen mit Sauerstoff reagiert er zu hoch korrosiver Schwefelsäure. Um dies zu unterbinden, soll hier nun, neben der schon bestehenden Grobentschwefelung durch Zugabe von Eisen-II-Sulfat in den Fermenter, eine Feinentschwefelung mittels Aktivkohlefilter erfolgen, um bauteilfreundliche Schwefelwasserstoffkonzentrationen zu erzielen. Dies wirkt sich insbesondere auf die Lebensdauer der BHKWs aus. Je geringer die Belastung der Anlage durch Schwefelsäure, desto länger fallen die Ölwechselintervalle und der Wartungsaufwand aus.

Desweiteren soll die hydraulische Einbindung der Blockheizkraftwerke in das Fernwärmenetz der Stadt Wanzleben dahingehend optimiert werden, die Rücklauftemperaturen abzusenken, um einen höheren Gesamtwirkungsgrad der Anlage zu erreichen.

¹ vgl. §6 Absatz 4 Nummer 2 EEG 2012

2 Grundlagen

2.1 Bildung von Schwefelwasserstoff

Schwefel kommt hauptsächlich in pflanzlichen Stoffen vor, der dann über die Nahrung von Tieren aufgenommen werden kann. Die Pflanzentrockenmasse besteht zu 90 % aus Kohlenstoff und Sauerstoff sowie zu 6 % aus Wasserstoff. Neben vielen anderen Nährstoffen nehmen Pflanzen auch Schwefel auf. Dies geschieht vorwiegend aus der Bodenlösung in Form von Sulfat-Ionen (SO_4^-) oder aber auch über die Luft in Form von Schwefeldioxid (SO_2). Als Bestandteil von Aminosäuren, Vitaminen und Enzymen ist Schwefel vor allem für die Eiweißbildung und den Chlorophyll-Haushalt bedeutungsvoll.²

Die Bildung von Schwefelwasserstoff im Fermenter kann grundsätzlich nicht unterbunden werden, da keine Kohlenstoffquelle ohne Schwefel vorkommt. Der Grund hierfür ist, dass die Bedingungen für methanbildende Bakterien, die aus einer Kohlenstoffquelle Methan produzieren, denen der schwefelwasserstoffbildenden Bakterien, oder auch Desulfurikanten gleichen. Die Menge des entstehenden Schwefelwasserstoffs ist abhängig von der Zusammensetzung des Substrates. Tabelle 1 zeigt die Schwefelanteile einiger organischer Stoffe, unter anderem der für die Biogasproduktion relevanten Substratstoffe Silomais und Gülle, bzw. Stallmist.

² Kaltschmitt, Martin, Hartmann, Hans., Hofbauer, Hermann. (2009): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer, S. 40ff

Substratstoff	Schwefelgehalt
Klee / Gras	100 mg S/kg
Bier	160 mg S/kg
Weizen / Getreide / Mais	200 mg S/kg
Molke	250 mg S/kg
Kartoffeln	340 mg S/kg
Gülle	300 – 600 mg S/kg
Stallmist	300 – 800 mg S/kg
Zwiebeln	510 mg S/kg
Kaffee, instant	600 mg S/kg
Silomais	800 mg S/kg
Reis	1000 mg S/kg
Fisch	2300 mg S/kg
Hefe	3000 mg S/kg

Tabelle 1: Schwefelgehalt verschiedener Substratstoffe³

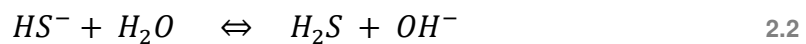
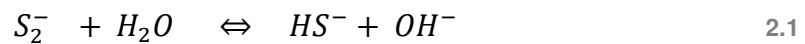
Während der anaeroben Flüssigphase kommt es im Fermenter zu, von schwefelbildenden Bakterien verursachten Abbauprozessen, die für die Entstehung von Schwefelwasserstoff verantwortlich sind. Hierbei wird zwischen zwei Hauptbildungsarten unterschieden: die assimilatorische Sulfatreduktion und die mikrobiologische Desulfurikation. Bei der assimilatorischen Sulfatreduktion - oder auch Desulfuration - binden autotrophe Bakterien das aufgenommene Sulfat in Form von organischen Schwefelverbindungen, wie zum Beispiel Aminosäuren. Diese werden wiederum durch fermentative Bakterien abgebaut, wobei Sulfide entstehen.

Der mikrobiologischen Desulfurikation liegt die Fähigkeit obligat anaerober Bakterien, sog. Desulfurikanten, Sulfat zu Sulfid zu reduzieren zugrunde. Als Reduktionsmittel nutzen sie hauptsächlich Stoffe, die während des fermentativen Abbaus von organischen Stoffen als Endprodukte anfallen, wie zum Beispiel Alkohole, organische Säuren und elementarer Wasserstoff. Auch hier ist das Hauptprodukt Sulfid.⁴

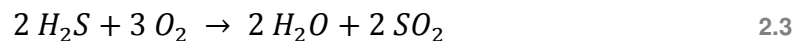
³ Wassermann, Carl. (2011). *Schwefelwasserstoff im Biogas - Erneuerbare Energie im Griff*. Online www.h-2-s.de [Stand 11.07.2013]

⁴ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt LfU (2007), *Biogashandbuch Bayern – Materialienband Kap 1.1.-1.5*, S. 66f

Sulfide, die eine Vorstufe für die Bildung von Schwefelwasserstoff darstellen, reagieren mit Wasser in einem Zwischenschritt erst zu Hydrogensulfidionen und Hydroxidionen (vgl. Gleichung 2.1) um anschließend zu Schwefelwasserstoff zu reagieren (vgl. Gleichung 2.2).



Wird das im Biogas produzierte und mit Schwefelwasserstoff angereicherte Methan nun in den BHKWs verbrannt, entsteht dabei Wasser und Schwefeldioxid (vgl. Gleichung 2.3). SO_2 ist gut wasserlöslich und somit geneigt schwefelige Säuren zu bilden (vgl. Gleichung 2.4). Diese sind hoch korrosiv und versäuern das Motoröl, wodurch die Wirksamkeit des Motors maßgeblich beeinflusst wird und diesen bei zu hohen Konzentrationen zerstören kann.



2.2 Beeinflussung der Umwelt durch Biogas

Die Produktion von Biogas zielt darauf ab, eine möglichst große Menge Methan zu produzieren, das in BHKWs verbrannt wird um Strom und Wärme zu erzeugen. Dabei setzt sich das Biogas wie in Tabelle 2 gezeigt zusammen.

Gasbestandteile	Anteil am Biogas
Methan	55-75 %
Kohlendioxid	25-55 %
Wasserdampf	0-10 %
Stickstoff	0-5 %
Sauerstoff	0-2 %
Wasserstoff	0-1 %
Ammoniak	0-1 %
Schwefelwasserstoff	0-1 %

Tabelle 2: Zusammensetzung von Biogas⁵

Der Hauptbestandteil des Biogases ist mit 55-75 % des Volumens Methan, welches neben Kohlendioxid das zweitwichtigste anthropogene Treibhausgas ist. Sein Treibhauspotential (**Global Warming Potential, GWP**) ist 21 mal höher als das von Kohlendioxid und verweilt auf lange Sicht 9 mal länger in der Atmosphäre (SieheTabelle 3).

⁵ Melde, Lars (2007): Dezentrale regenerative Energiequelle – Die Biogasanlage, Braunschweig: GRIN, S. 4

Treibhausgas	GWP im Verhältnis zu CO ₂				
	Pro Volumen	Pro Masse	Bezogen auf Emission und Masse		
			20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre
CO₂	1	1	1	1	1
Methan	21	58	63	21	9
Lachgas	206	206	270	290	190
Ozon	2000	1800	k.A.	k.A.	k.A.
FCKW 11	12400	3970	4500	3500	1500
FCKW 12	15800	5750	7100	7300	4500

Tabelle 3: Treibhauspotentiale der einzelnen Treibhausgase⁶

Doch nicht nur freigesetztes Methan schadet der Umwelt. Jede Biogasanlage stellt eine potenzielle Gefahrenquelle für umliegende Gewässer und das Grundwasser dar. Kommt es beispielsweise zu einer Explosion oder zu einem Leck am Fermenter oder Gärrestbehälter infolgedessen die eingesetzten Gärsubstrate und Gülle in großer Menge austreten, ist das Risiko einer Kontamination des Grundwassers besonders hoch. Schlicht gesagt findet eine „Überdüngung“ des Bodens statt, bei der unter anderem viel mehr Stickstoff in den Boden gelangt, als dieser aufnehmen kann. Durch den Niederschlag wird das Nitrat in tiefere Erdschichten gespült und gelangt sodann in das Grundwasser. Der Nitratreintrag kann so hoch sein, dass die Grenzwerte für Trinkwasser überschritten werden und das Grundwasser somit nicht mehr ohne Weiteres zur Wasserversorgung genutzt werden kann. Dies ist besonders bedenklich, da eine orale Aufnahme zu hoher Konzentrationen im schlimmsten Fall zu Krebs führen kann. Hinzu kommt, dass ein Großteil der oberflächennahen Gewässer aus dem Grundwasser gespeist und somit ebenfalls stark belastet wird.

Hinsichtlich der Fruchtfolge ergeben sich durchaus positive Gesichtspunkte. Der Anbau von Energiepflanzen zur Gewinnung von Biogas lässt sich meist problemlos in die Fruchtfolge integrieren, ohne dabei die Anbauflächen für Nahrungs- und Futtermittel zu verkleinern.

⁶ Bauer, Antonie (1993): Der Treibhauseffekt: eine ökonomische Analyse, Tübingen: Mohr Siebeck, S.27

	Landbau Referenzsystem	Landbau Energiepflanze
1. Jahr	Winterweizen	Winterweizen
2. Jahr	Triticale	Triticale
3. Jahr	<i>Brache</i>	<i>Zuckerrübe</i>
4. Jahr	Welsches Weidelgras	Welsches Weidelgras
5. Jahr	Silomais	Silomais

Tabelle 4: Beispiel einer Fruchtfolge mit der Energiepflanze Zuckerrübe im Landbau mit Viehhaltung⁷

Tabelle 4 zeigt eine Fruchtfolge in einem landwirtschaftlichen Betrieb mit Viehhaltung. Als Referenzsystem wird ein System betrachtet, in dem ausschließlich Nahrungs- und Futtermittelkulturen angebaut werden. Das Hauptfuttermittel für den Viehbestand bildet hierbei Welsches Weidelgras. Nach zwei Jahren Getreideanbau liegt das Feld im dritten Jahr im Referenzsystem brach, um dem Boden Zeit zu geben, sich zu erholen und Nährstoffe zu regenerieren. Um noch mehr Regenerationszeit zu schaffen, wird im darauffolgenden Jahr eine Zwischenkultur – meist Gräser – angebaut, um im fünften Jahr Silomais anzubauen. Dieser dient vorrangig als Tierfutter, kann aber auch zur Energiegewinnung herangezogen werden.

Während der Zeit, in der das Feld brach liegt, können aufgrund der fehlenden Nährstoffe keine Nutzpflanzen zur Nahrungs- oder Futtermittelgewinnung angebaut werden, was Raum für Energiepflanzen macht, deren Nährstoffbedarf sich von dem der vorangegangenen Kulturen erheblich unterscheidet. Die Auswahl der jeweiligen Pflanze ist abhängig von der bestehenden Fruchtfolge.

Nach der Vergärung der Biomasse in der Biogasanlage können die Gärreste weiter verwendet werden. Häufig wird das Gärprodukt als Dünger eingesetzt, was abhängig von der eingesetzten Kulturpflanze, eine Einsparung, oder gar Ersetzung von Stickstoff-Mineraldünger, der meist zugekauft werden muss, bedeutet.

⁷ Vgl. Kaltschmitt, Martin & Reinhardt, A. Guido (Hrsg.) (1997): *Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*, Braunschweig/Wiesbaden, vieweg Umweltwissenschaften

Inhaltsstoffe in flüssigen Gärrückständen				
Parameter	NaWaRo-Anlagen Mittelwert (Spanne)	Bioabfall-Anlagen Mittelwert (Spanne)	Rinderjauche	Rindergülle (mittel)
Trockenmasse (% FM)	7,0 (5,0-8,5)	6,1 (4,1-7,7)	2	8
pH-Wert	8,3 (7,9-8,6)	8,3 (7,9-8,7)	-	-
Org. Substanz (kg/t FM)	51 (36-66)	42 (30-57)	-	-
C/N-Verhältnis	6,4 (5,9-7,6)	5,2 (4,2-6,8)	-	-
Bas. Wirk. Stoffe (kg/t FM)	3,7 (2,7-4,6)	3,5 (2,1-4,6)	-	-
Stickstoff (kg N/t FM)	4,7 (3,9-5,5)	4,8 (3,4-5,9)	2,5	3,5
Ammonium (kg NH₄-N/t FM)	2,7 (2,1-3,3)	2,9 (2,3-3,8)	1,9	1,8
Phosphor (kg P₂O₅/t FM)	1,8 (1,2-2,1)	1,8 (1,2-2,4)	0,23	1,49
Kalium (kg K₂O/t FM)	5,0 (3,8-6,0)	3,9 (2,2-4,8)	7,8	5,98
Magnesium (kg MgO/t FM)	0,84 (0,47-1,04)	0,70 (0,43-1,0)	-	-
Schwefel (kg S/t FM)	0,33 (0,26-0,41)	0,32 (0,22-0,39)	-	-

Tabelle 5: Durchschnittlicher Nährstoffgehalt flüssiger Gärrückstände⁸⁹

Der Nährstoffgehalt in den Gärresten fluktuiert aufgrund der unterschiedlichen Gärsubstratzusammensetzung sehr stark. Als Orientierung kann die vorangegangene Tabelle herangezogen werden. Diese zeigt den durchschnittlichen Nährstoffgehalt in flüssigen Gärrückständen aus Biogasanlagen, die hauptsächlich mit nachwachsenden Rohstoffen und Bioabfall betrieben werden im Vergleich zu Rinderjauche und Rindergülle mittlerer Viskosität. Dabei wird eine mittlere Dichte von 1000 kg/m³ der Rindergülle/-jauche angenommen, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen.

⁸ Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, (2008) *Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung*. Online Projektbericht, Dezember 2008

http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Duenger_uhn_Substrate/Duengewirkung_4_09_1u2.pdf [Stand 24.09.2013]

⁹ Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, (2003) *Düngewirkung von Gülle*, Online <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14036/documents/16496> [Stand 24.09.13]

Aufgrund der pflanzlichen Anteile in den Gärresten ist der Gehalt an Stickstoff, Ammonium und Phosphor zum Teil bedeutend höher als in „unbehandelter“ Gülle. Der Kaliumgehalt in den Gärresten ist zwar etwas geringer als in den tierischen Exkrementen, erreicht in manchen Fällen aber die gleichen Werte. Die Düngung mit Gärrückständen ist also in gleichem Maße sinnvoll, wie die mit Jauche oder Gülle. Als positiver Nebeneffekt ist anzumerken, dass die Geruchsbelastung durch Gärreste zudem erheblich schwächer ausfällt.

3 Aktuelle Situation

Im Moment verfügt die Biogasanlage auf dem Gelände der Stadtwerke Wanzleben weder über eine Entschwefelungsanlage, noch über eine zusätzliche Gasverbrauchseinrichtung. Es findet eine Grobentschwefelung durch die Zugabe von Eisen-II-Sulfat statt. Dadurch werden H₂S-Konzentrationen von etwa 60-140 ppm erreicht. Diese sind laut Hersteller zwar grundsätzlich für den Betrieb der Gasmotoren geeignet, sorgen aber dennoch für eine Versäuerung des Motoröls und verkürzen so die Ölwechsel- und Wartungsintervalle (Siehe 2.1 Bildung von Schwefelwasserstoff).

Das Biogas wird über eine erdverlegte Gasleitung DN160 mit 110 mbar zu den ca. 200 m entfernten Betriebsgebäuden der Stadtwerke abgeführt. Dort befinden sich auch die BHKWs, die das Gas zur Strom- und Wärmeerzeugung nutzen. Beide Module haben eine Leistung von jeweils 255 kW elektrisch sowie 290 kW thermisch.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Leistungsdaten der BHKWs über den Zeitraum von 2005 bis 2012.

Zeitraum	Betriebsstunden Std./Jahr	Elektrische Leistung kWh/Jahr	Thermische Leistung kWh/Jahr	Biogasverbrauch m ³ /Jahr
2005	7973	3222052	2139800	1484498
2006	7140	3468586	2607800	1821253
2007	6959	3324032	2720200	1912873
2008	7118	3390978	3535000	2007120
2009	8065	4009826	4757130	2337651
2010	6950	3168680	3755610	1802325
2011	6880	3116754	3654400	1784498
2012	5777	2664929	3035000	1538308

Tabelle 6: Betriebsstunden und Biogasverbrauch der BHKWs

Die beiden Blockheizkraftwerke speisen die von ihnen erzeugte Energie in das Strom-, bzw. Wärmenetz ein und versorgen somit die Einwohner der Stadt Wanzleben. Abbildung 1 zeigt den hydraulischen Plan des Geländes der Stadtwerke, dessen stark vereinfachte Darstellung der Übersicht geschuldet ist.

Zusammen mit der Solarthermieanlage, bestehend aus zwei Kollektorfeldern mit einer theoretischen Leistung von 544 kW und 327 kW, und dem BHKW der zweiten Biogasanlage, die nicht von den Stadtwerken betrieben wird, kann die Grundlast gedeckt werden. Die zweite Anlage weist eine Gesamtleistung, wie die der Stadtwerke, von etwa 510 kW elektrisch und 580 kW thermisch auf.

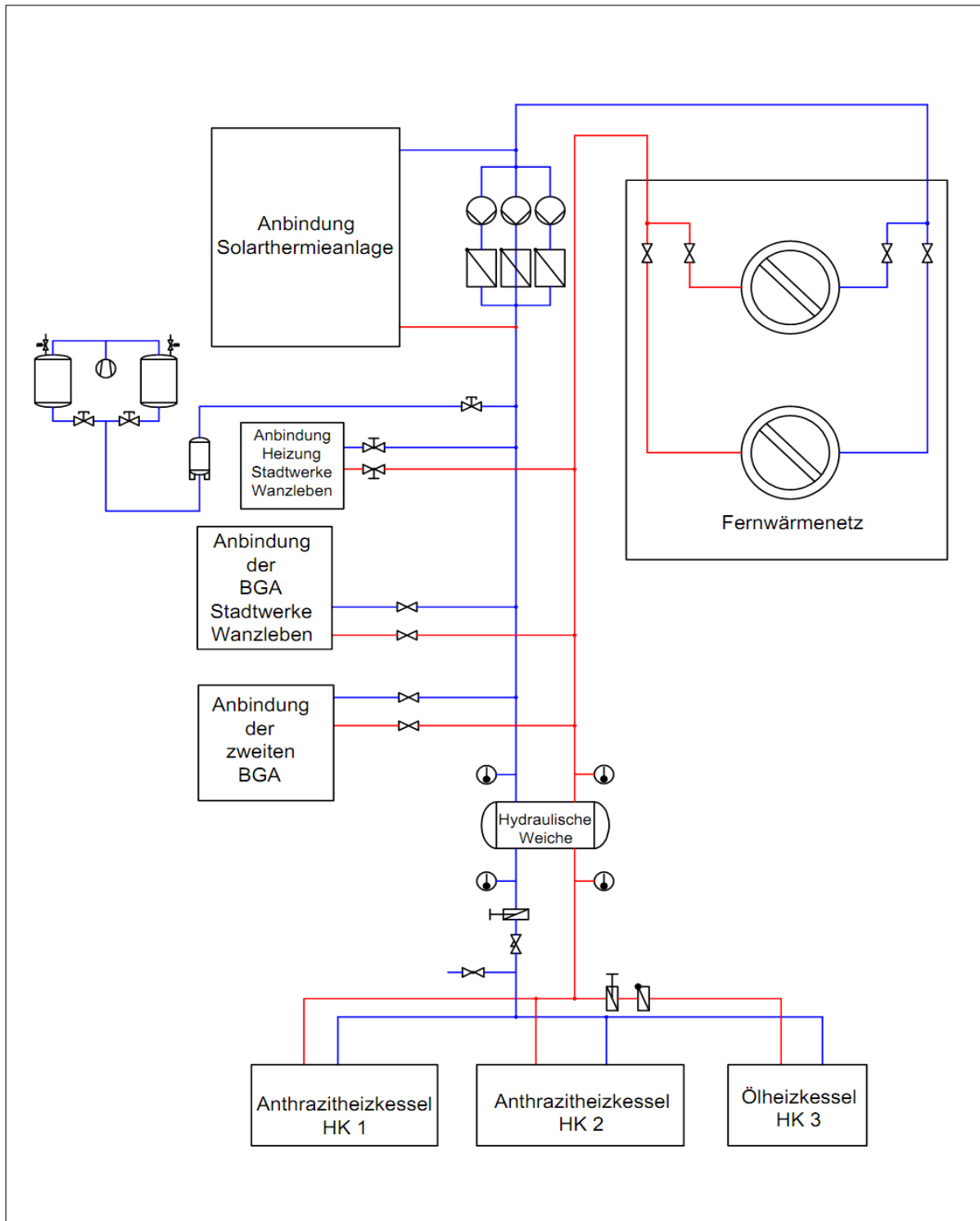


Abbildung 1: Vereinfachter hydraulischer Plan des Betriebsgeländes Stadtwerke Wanzleben

Jedes der drei Wärmeerzeugersysteme führt die Wärme über eine Rohrleitung des Querschnitts DN 250 dem Fernwärmenetz zu, wo sie von den Verbrauchern abgenommen wird. Um den Bedarf bei Stoßzeiten zu decken, wurden drei Spitzenlastkessel in Form von zwei Anthrazitkesseln und einem Ölheizkessel installiert, deren thermische Leistung sich auf jeweils 2100 kW, bzw. 3150 kW beläuft.

Über eine hydraulische Weiche sind sie von der Verbraucherseite entkoppelt und somit unabhängig von den vorherrschenden Lastverhältnissen im Fernwärmenetz.

3.1 Ex-Zonen

Da im Nachfolgenden bauliche Veränderungen der Anlage betrachtet werden, besteht die Notwendigkeit explosionsgefährdete Bereiche, sog. Ex-Zonen, zu deklarieren. Nach EN-Normen wird nach Häufigkeit und Dauer von explosionsfähigen Atmosphären zwischen drei Zonen unterschieden¹⁰:

Zone 0: Umfasst Bereiche, in denen bei Normalbetrieb eine gefährlich explosionsfähige Atmosphäre, die aus einem Gemisch von Luft und Gasen, Dämpfen oder Nebeln besteht, ständig, langfristig oder häufig vorhanden ist.

Erläuterungen

Die Zone 0 kommt bei Biogasanlagen im Normalbetrieb praktisch nicht vor. Auch im Gärbehälter liegen keine explosionsfähigen Gemische vor. Allenfalls das Ansaugrohr des Verbrennungsmotors oder der Verbrennungsraum der Gasfackel enthält bestimmungsgemäß ständig ein zündfähiges Gemisch. Durch eine flammendurchschlagsichere Einrichtung ist dieser Bereich von dem übrigen Gassystem abgeschottet.

¹⁰ Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften e.V., (2002) *Sicherheitstechnische Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb von Biogasanlagen* http://www.umwelt-online.de/recht/luft/laender/nds/biogasbetr_ges.htm [Stand 14.09.2013]

Zone 1: Umfasst Bereiche, in denen bei Normalbetrieb damit zu rechnen ist, dass eine gefährlich explosionsfähige Atmosphäre, die aus einem Gemisch von Luft und Gasen, Dämpfen oder Nebeln besteht gelegentlich, auftritt.

Erläuterungen

Gelegentliches Auftreten von zündfähigen Gemischen bei Biogasanlagen findet sich z.B. um die Mündung von Abblaseleitungen von Gasüberdrucksicherungen und Gasfackeln. Bei Gasüberschuss wird hier Gas in die Luft abgeblasen.

Zone 2: Umfasst Bereiche, in denen bei Normalbetrieb nicht damit zu rechnen ist, dass eine gefährlich explosionsfähige Atmosphäre, die aus einem Gemisch von Luft und Gasen, Dämpfen oder Nebeln besteht auftritt, wenn sie aber dennoch auftritt, dann aller Wahrscheinlichkeit nach nur selten und während eines kurzen Zeitraumes.

Erläuterungen

Seltenes Auftreten von zündfähigen Gasgemischen kann generell im Störfall und bei Servicearbeiten auftreten.

Im Bereich des Gärbehälters betrifft dies Wartungs- und Reinigungsöffnungen und das Innere eines kontinuierlich betriebenen Fermenters. Bei Gasspeicherung betrifft dies das Gaslager und die Umgebung der Be- und Entlüftungsöffnungen.

In

Abbildung 2: Deklaration der Ex-Zonen wird das Gelände der Biogasanlage schematisch dargestellt. Alle relevanten Teile wurden entsprechend der Anforderungen für die Einteilung von explosionsgefährdeten Bereichen gekennzeichnet.

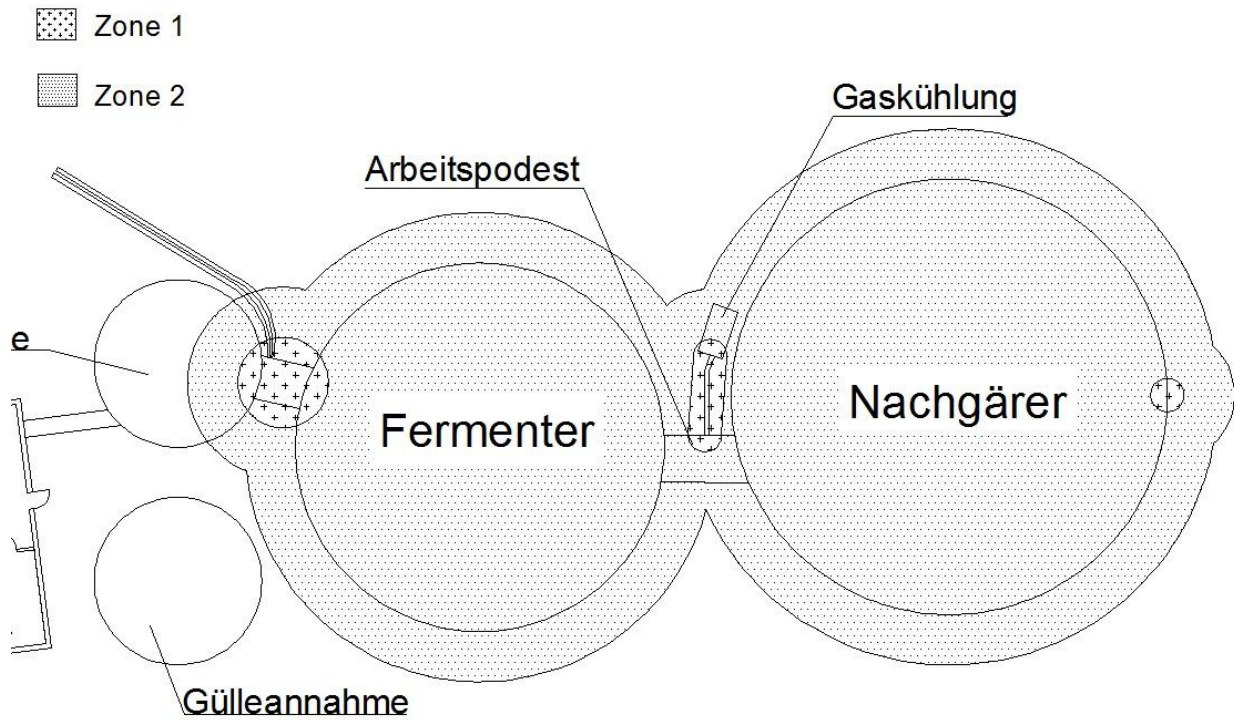


Abbildung 2: Deklaration der Ex-Zonen

Die Bemessung der einzelnen Zonen unterliegt bestimmten Regeln.

Zone 1 beinhaltet einen Umkreis von einem Meter um „Anlagenteile, Ausrüstungsteile, Verbindungen, Schaugläser, Durchführungen, Serviceöffnungen am Gasspeicher und am gasbeaufschlagten Teil des Gärbehälters, sofern mit einem betriebsbedingten Austritt von Biogas zu rechnen ist, sowie um die Mündung von Abblaseleitungen“.¹¹

Zone 2 beschreibt einen „Umkreis von 3 m um als technisch dicht eingestufte Anlagenteile, Ausrüstungsteile, Verbindungen, Durchführungen, Serviceöffnungen sowie um Berstscheiben“.¹¹ Der Umkreis von 3 m gilt allerdings nur bei Anlagen mit freier Belüftung.

¹¹ a.a.O. Fn.9

Für den Fermenter sowie das Gaslager kommt es hier noch zu Besonderheiten. Da die Gärbehälter in diesem Fall eine Folienabdeckung aufweisen und im Freien stehen, gilt der Umkreis von 3 Metern nach oben und zur Seite. Zusätzlich wird die Zone, wie in Abbildung 3 dargestellt, auch 2 Meter nach unten und mit einem ansteigenden Winkel von 45° ausgedehnt.

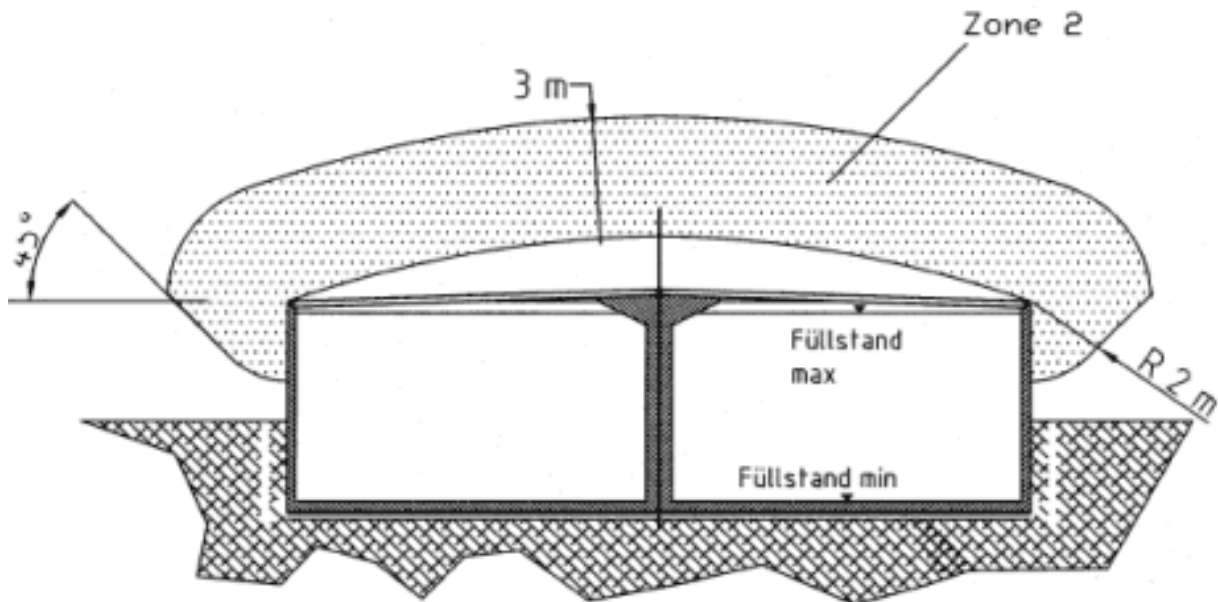


Abbildung 3: Ex-Zone bei Folienabdeckung des Gärbehälters¹¹

Für jede Zone gelten entsprechende Regeln für den Einsatz von (elektrischen) Betriebsmitteln. Jedes Gerät, das genutzt wird, muss für die Verwendung in der jeweiligen Zone zugelassen oder entsprechend gekennzeichnet sein. Dies ist insbesondere bei Wartungsarbeiten zu beachten.

4 Notfackel

4.1 Standort und Fundament

Die Aufstellung einer Notfackel erfordert einen geeigneten Standort. Nicht überall kann und darf sie ohne weiteres installiert werden. Der Gesetzgeber schreibt vor, dass ein Mindestabstand von 5 m zu Verkehrswegen, Gebäuden und gelagerten brennbaren Stoffen eingehalten werden muss. Dabei ist auch darauf zu achten, dass ein Standort außerhalb definierter Ex-Zonen gewählt wird. Da die Verbrennung oftmals mit einer offenen Flamme erfolgt, muss eine Bauhöhe von mindestens 4 m realisiert werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Grundriss der Biogasanlage auf dem Gelände der Stadtwerke Wanzleben.

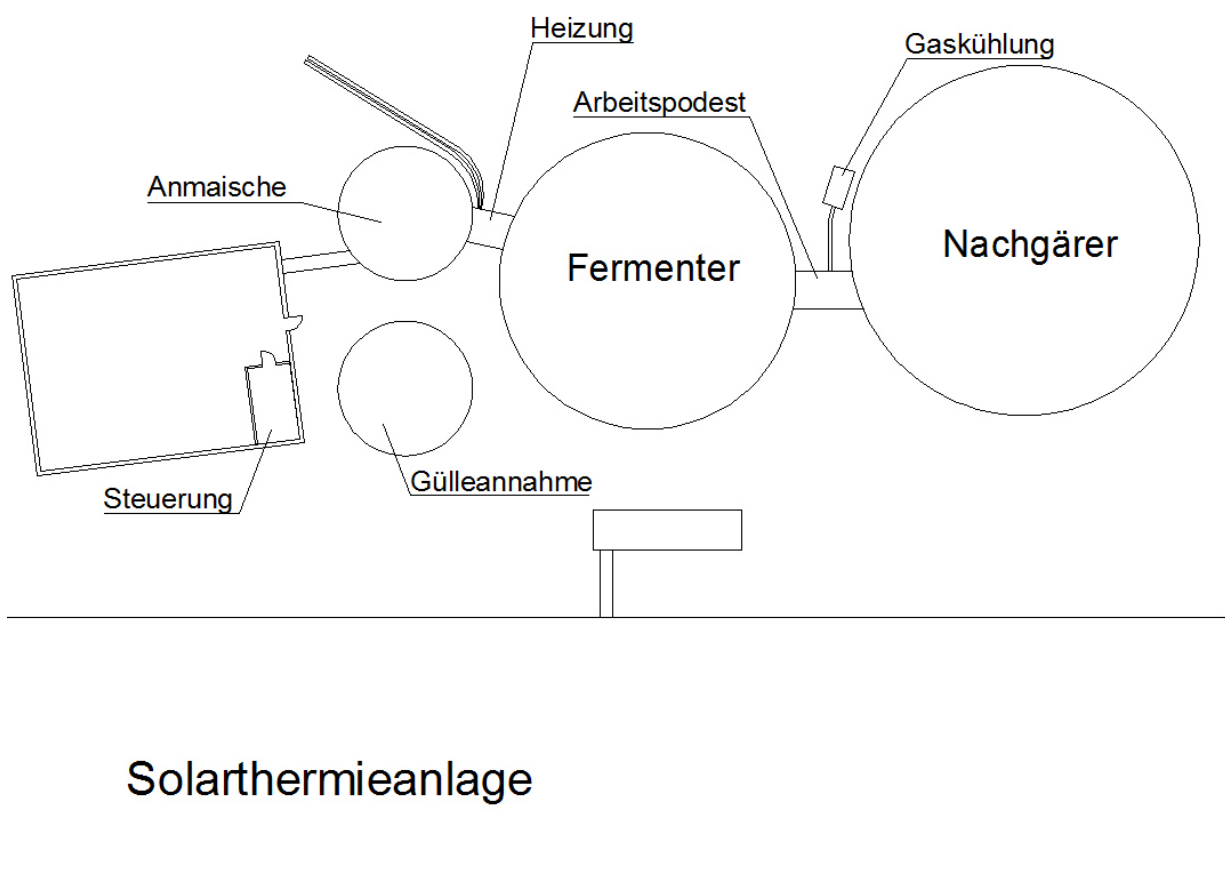


Abbildung 4: Schematische Darstellung der BGA Stadtwerke Wanzleben

Das Gelände nördlich der Biogasanlage ist als Standort ungeeignet, da es relativ dicht bewachsen und abschüssig ist. Im Osten sind es nur wenige Meter bis zur Grundstücksgrenze. Somit kommt aufgrund der natürlichen Gegebenheiten für die Aufstellung der Notfackel nur der in Abbildung 5 dargestellte Standort zwischen Nachgärer und Solarthermieanlage in Frage.

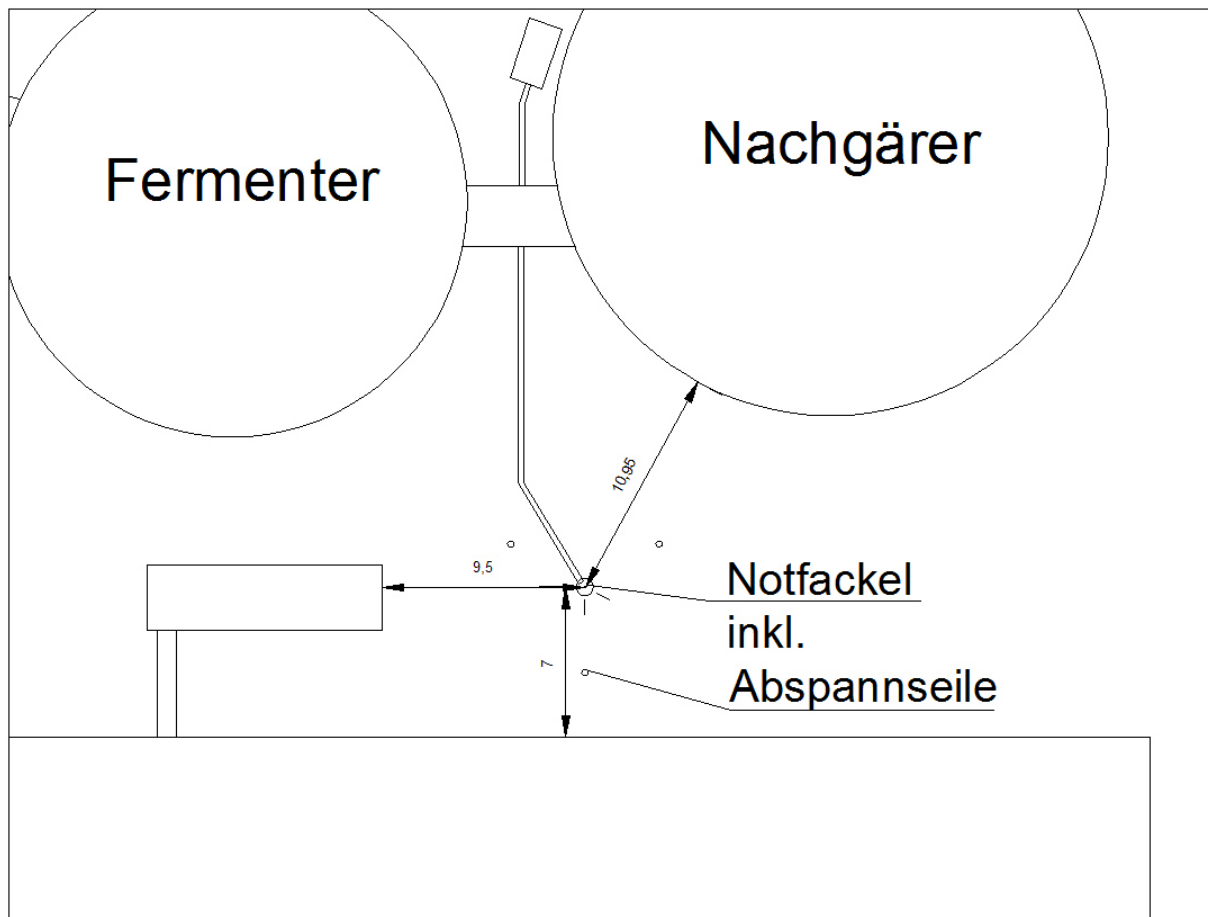


Abbildung 5: Möglicher Standort der Notfackel

Das Gelände an diesem Standort ist ebenerdig und erfüllt alle nötigen Anforderungen an die Mindestabstände sowohl zu den Verkehrswegen als auch zu den Gebäuden. Die angegebenen Abstände sind in Meter gemessen und entsprechen nicht exakt den realen Werten, sind aber hinreichend genau. Auch die Abstände zu den unter 3.1 definierten Ex-Zonen werden eingehalten.

Der Boden hier fällt unter die Bodenklasse 4, ist also vorwiegend bindig, bzw. lehmig, was den Einsatz von schwerem Gerät zum Erdaushub für das Fundament obsolet macht.

Das Fundament besteht aus vier Teilfundamenten, die wie in Abbildung 6 dargestellt, angeordnet sind. Das große zentrale Fundament (1) stützt die Fackelsäule, während die drei „Satelliten“ (2), die in einem Abstand von ca. 4 m eingebracht werden, als Befestigung für die stabilisierenden Abspannseile dienen. Als Beton wird aufgrund der relativ geringen Anforderungen und Fundamentgröße Beton der Klasse B25 verwendet. Dieser wird in einer Tiefe von 70 – 80 cm auf einem Kiesbett eingebracht.

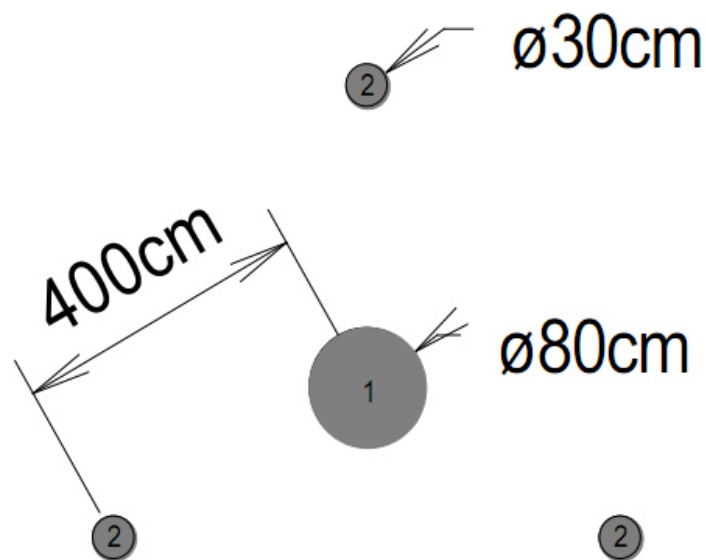


Abbildung 6: Anordnung der Teilfundamente der Notfackel¹²

¹² Green Energy Max Zintl GmbH, Datenblatt Green Energy Gasfackel

4.2 Technische Eigenschaften

Tabelle 3 macht deutlich, warum der Einsatz einer Notfackel notwendig und sinnvoll ist. Durch die Verbrennung wird sichergestellt, dass kein Methan in die Atmosphäre gelangt, da es unter Abgabe von Kohlendioxid verbrennt. Die Gewinnung des Gases erfolgt ausschließlich aus Biomasse, die CO_2 aus der Atmosphäre bindet. Dessen Verbrennung findet folglich CO_2 -neutral statt.

Für die Installation einer solchen Notfackel gibt es gesetzliche Regelungen und Vorschriften, die im EEG verankert sind. Das wichtigste Kriterium ist, dass diese zusätzliche Gasverbrauchseinrichtung geeignet sein muss, im Notfall die gesamte Menge an produziertem Gas zu verbrennen. Aus den Werten in Tabelle 6 lässt sich der stündliche Gasstrom Q_h berechnen, der für die Dimensionierung der Notfackel maßgebend ist. Hierbei werden die Werte von 2009 herangezogen, da in diesem Jahr die größte Menge V_a an Biogas produziert, bzw. verbraucht wurde und die Blockheizkraftwerke die längste jährliche Laufzeit t_a hatten.

$$Q_h = \frac{V_a}{t_a} \quad 4.1$$

$$Q_h = \frac{2337651 \text{ m}^3}{8065 \text{ h}} = 289,851 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Es muss also gewährleistet werden, dass pro Stunde $289,851 \text{ m}^3$ Gas klimafreundlich verbrannt werden können. Aus Gründen der technischen Realisierbarkeit und sicherheitstechnischen Aspekten wird eine Fackel mit einem Gasstrom von $300 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$ gewählt.

Der Anschluss der Fackel erfolgt mittels einer Abzweigung aus Edelstahl des Durchmessers DN80 am Arbeitspodest zwischen Fermenter und Nachgärer. Durch den Einbau eines Absperrventils kann die Gaszufuhr unterbrochen, bzw. hergestellt werden. Die Leitung wird in der Erde verlegt, da eine Überfahrbarkeit und somit der Zugang zum Aktivkohlefilter gewährleistet werden muss (Siehe 5. Aktivkohlefilter).

Der Gasdruck in der Leitung beträgt hier ca. 50 mbar. Der für den sicheren Betrieb der Notfackel erforderliche Druck liegt im Bereich von 15 - 80 mbar. In diesem Druckbereich wird die vollständige Verbrennung des Gases gewährleistet und die Flammenstabilität auch bei Wind sichergestellt. Somit kommt der Anschluss hinter dem Verdichter nicht in Frage (Siehe Abbildung 5).

Desweiteren soll die zu installierende Notfackel über eine automatische Zündeinrichtung verfügen. Diese wird von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) angesteuert, die sich an der Fackel befindet und die Zündung auslöst, sobald der Ausfall beider Blockheizkraftwerke registriert wird und der Gasdruck im Nachgärer ein definiertes Limit erreicht. Die Stromversorgung und Signalgebung für die SPS wird durch eine erdverlegte Kabelleitung vom Typ NJJ-Y 3 x 2,5 mm² zur Anlagensteuerung hergestellt.

Zusätzlich soll im Falle einer Störung ein Alarmsignal auf das Handy des Anlagenbetreibers und/oder des Technikers gegeben werden. Technisch wird das durch den Einbau einer weiteren Baugruppe in die SPS realisiert, beispielsweise mit einem SIPLUS Mobilfunkmodem vom Typ SIPLUS MD720-3. Für den Betrieb der Baugruppe ist der Empfang eines Mobilfunksignals erforderlich, welcher durch den Anschluss eines Antennenkabels hergestellt wird.

4.3 Sicherheitstechnische Aspekte

Um einen sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten, müssen diverse Sicherheitsvorrichtungen integriert werden. Dazu gehören unter anderem eine Delfagrationsicherung, um einen Flammenrückschlag zu verhindern, sowie eine UV-Sonde zur Flammenüberwachung. Dabei muss auch bei Wind die Flammenstabilität gewährleistet werden. Dies wird erreicht, indem der Gasdruck während des Betriebs nicht weniger 5 mbar beträgt.

Für die Wintermonate muss ein konstruktiver Frostschutz der Gasarmaturen gegeben sein. Für den Schutz der Steuereinheit genügt ein staubgeschützter Schaltschrank, der Schutz vor Spritzwasser bietet (IP54). Laut Hersteller liegt die Betriebstemperatur einer Simatic S7 im Bereich von -25°C bis 45°C (senkrechter Einbau), bzw. 70°C (waagrechter Einbau)¹³. Seit Beginn der Messreihe 1947 wurde am 24. Februar 1956 im Raum Magdeburg eine Tiefsttemperatur von $-25,4^{\circ}\text{C}$ gemessen.¹⁴ Der Trend geht in Richtung mildere Winter, sodass nicht davon auszugehen ist, dass die Temperaturen in den Wintermonaten derart absinken, dass der Betrieb der Anlage gefährdet wäre. Weitere Maßnahmen zum Frostschutz sind daher nicht erforderlich.

Weiterhin muss ein Anschluss für eine Notstromversorgung vorhanden sein, um eine permanente Betriebsbereitschaft sicherzustellen. Wie alle anderen Anlagenteile, muss auch die Fackel in das bestehende Blitzschutzsystem integriert werden, was hier durch den Anschluss, bzw. durch eine Erweiterung des Fundamenterders erfolgt.

¹³ Siemens AG, Datenblatt Siemens SIPLUS S7-200 CPU 221 DCDCDC (*23)

¹⁴ Deutscher Wetterdienst DWD, (2012), *Absolute Tiefsttemperaturen in Deutschland*
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KUPK/Wetterrekorde/absolute__tiefsttemperaturen__brd,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/absolute_tiefsttemperaturen_brd.pdf [Stand 21.09.2013]

5 Aktivkohlefilter

5.1 Standort und Fundament

Die Aufstellung des Aktivkohlefilters unterliegt keinen besonderen Sicherheitsvorschriften, was die Suche nach einem Standort relativ leicht macht. Allerdings sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ein Standort möglichst nah an der Gasleitung gewählt werden, um den materiellen Aufwand der Installation möglichst gering zu halten und einen zu hohen Druckverlust zu vermeiden. Wie in Abbildung 7 dargestellt, ist eine Aufstellung zwischen Anmaische und Fermenter sinnvoll, da hier ebenfalls die Gasleitung für die Versorgung der BHKWs entlangläuft. Demnach sind, neben den ohnehin benötigten Verbindungsstücken, wie Flansche, Muffen und dergleichen, also nur wenige Meter Rohrleitung erforderlich. Desweiteren befindet sich hier auch die Heizungsverteilung der Biogasanlage, an die die Entschwefelungsanlage angeschlossen werden muss. Mehr dazu unter 5.2.

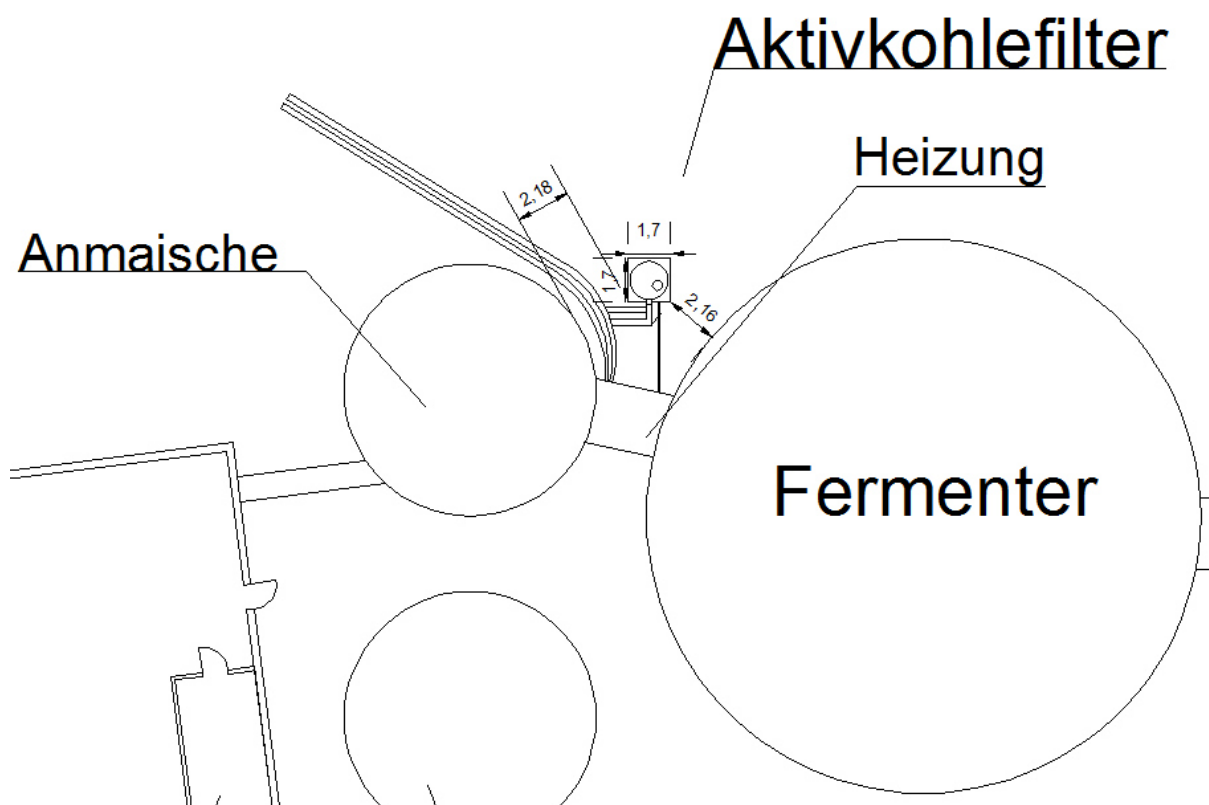


Abbildung 7: Möglicher Standort des Aktivkohlefilters

Da sich die im Filter verwendete Aktivkohle während des Betriebs mit Schwefelwasserstoff anreichert, muss sie, abhängig von der H_2S -Konzentration im Biogas, nach einer gewissen Zeit ausgetauscht werden. Da mehrere hundert Kilogramm Aktivkohle ausgetauscht werden müssen, muss sichergestellt werden, dass der Filter für Hebezeuge zugänglich ist. Im Regelfall erfolgt der Austausch durch den Lieferanten, der auch für die Entsorgung der gebrauchten Aktivkohle Sorge trägt.

Das Fundament für den Filter wird quadratisch mit einer Seitenlänge von ca. 1,7 m angelegt und ebenfalls aus Beton B25 gefertigt. Wie auch bei der Notfackel ist eine Integration in die bestehende Blitzschutzanlage vorgeschrieben.

5.2 Technische Eigenschaften und Funktionsprinzip

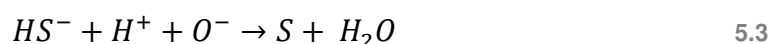
Bei der Entschwefelung mit Aktivkohle adsorbieren Schwefelwasserstoff und Sauerstoff an deren Oberfläche. Durch die katalytischen Eigenschaften der Aktivkohle werden die einzelnen Moleküle aufgespalten:



und



Kommt der dissoziierte Schwefelwasserstoff nun mit einem Sauerstoff-Ion in Kontakt, entsteht Wasser und elementarer Schwefel:



Der Schwefel wird dabei in die Aktivkohle eingelagert. Die Beladungskapazität K von Aktivkohle liegt im Bereich von $0,35 - 0,4 \frac{\text{kg Schwefel}}{\text{kg Aktivkohle}}$.¹⁵

Für die Entschwefelung des Biogases soll hier ein 3-Kammer-Filtersystem verwendet werden, da diese die Absorptionsfähigkeit der Kohle am besten ausnutzen. Die erste Kammer nimmt den größten Anteil des Schwefelwasserstoffs auf. Durch die zwei nachfolgenden Kammern kann die Aktivkohle hier bis zur maximalen Beladungskapazität beladen werden.

Die zweite Kammer nimmt sodann die restlichen Schadstoffe auf, während die dritte Kammer im Wesentlichen eine Sicherheit darstellt, falls die ersten beiden Kammern nicht mehr die ausreichende Beladungskapazität aufweisen. Jede Kammer ist mit ca. 500 kg Aktivkohle gefüllt.

Das Gas strömt über eine Rohrleitung DN160 unten in den Filter hinein, wo es durch ein bereits integriertes Wärmemodul im unteren Bereich des Filters, welches an das Heizungssystem angeschlossen werden muss, auf mindestens 25°C, höchstens aber 50°C erwärmt wird. Dies wirkt sich auf die Dichte des Gases und somit auf die Absorptionsfähigkeit, bzw. Standzeit der Aktivkohle aus (vgl. Gleichung 5.4). Der Heizungsanschluss erfolgt im Heizungsraum zwischen Anmaische und Fermenter. Hierfür muss eine entsprechende Verrohrung geschaffen werden, da der Rohrdurchmesser von DN200 auf DN32 verringert werden muss. Der Wärmebedarf des Wärmemoduls liegt laut Hersteller bei etwa 6 – 8 kW.

Anschließend steigt das Gas nach oben und durchströmt dabei jede, der mit Aktivkohle gefüllten Kammern, wobei ihm der Schwefelwasserstoff entzogen wird. Das gereinigte Gas tritt oben aus dem Filter wieder aus und wird den Blockheizkraftwerken zugeführt (Siehe Abbildung 8).

¹⁵ Vgl. **Polster, Andreas, Brummack, Joachim** (2005), *Verbesserung von Entschwefelungsverfahren in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*, TU Dresden Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Online http://web-redaktion.tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifvu/tvu/forschungsprojekte/forschung_alt/entschwefelungsverfahren [Stand 21.09.13]

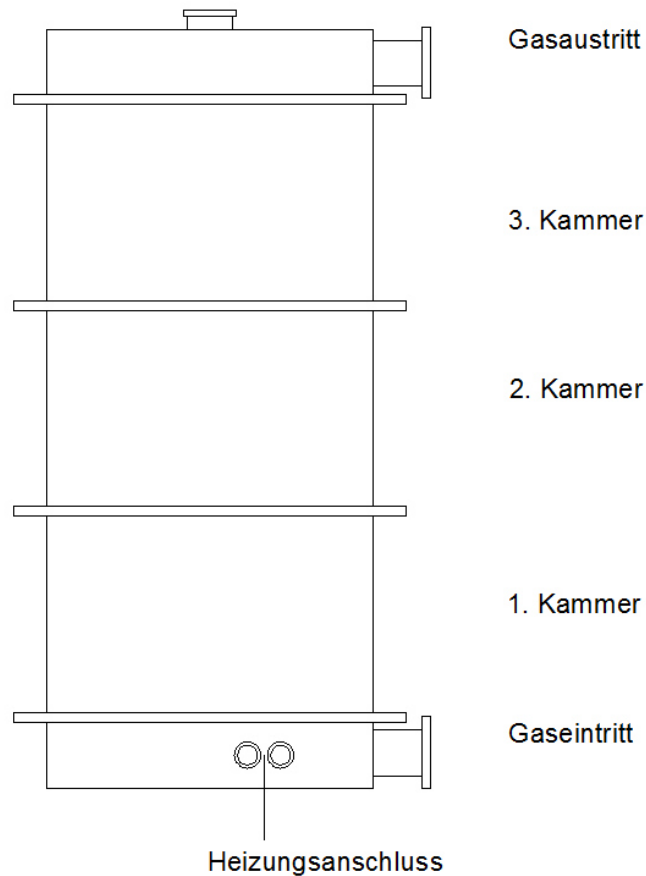


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines 3-Kammer-Aktivkohlefilter-Systems

Um das volle Potenzial der Kohle ausnutzen zu können, sollte vor dem Gaseintritt eine Frischluftpumpe installiert werden, um eventuelle niedrige Sauerstoffgehalte im Rohgas zu kompensieren. Die Notwendigkeit hierfür erschließt sich aus Gleichung 5.3. Dies wirkt sich auch positiv auf die Standzeiten der Aktivkohle aus.

Damit Wartungsarbeiten gefahrlos durchgeführt werden können und der normale Betrieb nicht gestört wird, wird der Aktivkohlefilter als Bypass in die aktuelle Gasleitung eingesetzt. Durch Ventile kann der Filter „zu- oder abgeschaltet“ und somit zugänglich gemacht werden. Hierbei kann die Frischluftpumpe dazu genutzt werden, eventuell verbliebenes Gas vollständig aus dem Filter zu entfernen. Die Wartung sollte in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden, spätestens aber zum Wechsel der Aktivkohle.

Dies ist erforderlich, da sich die Kohle mit dem gefilterten Schwefelwasserstoff anreichert und nach einer gewissen Zeit einen Sättigungszustand erreicht, ab dem kein weiteres H_2S mehr aufgenommen werden kann.

Für die Berechnung der Standzeit wird die mittlere Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas berücksichtigt. Bei einer Schwankungsbreite von 60-140 ppm liegt diese bei 100 ppm. Ziel ist es, eine H₂S-Konzentration von höchstens 10 ppm zu erreichen.

Die Standzeit der Aktivkohle lässt sich wie folgt berechnen.¹⁶

$$\rho_{H_2S} = \frac{(\rho_0 + \rho_{\dot{u}}) * M_{H_2S}}{R * T} \left[\frac{g}{l} \right] \quad 5.4$$

$$\rho_{H_2S} = \frac{(101325 \text{ Pa} + 11000 \text{ Pa}) * 34 \frac{g}{mol}}{8314,5 \frac{J}{kmol * K} * 310 \text{ K}} = 1,482 \frac{g}{l}$$

$$\dot{m}_{Aktivkohle} = \frac{24}{K_{Aktivkohle}} * \frac{M_S}{M_{H_2S}} (\Delta H_2S(g) * \rho_{H_2S} * \dot{V}_{Biogas} * 10^{-6}) \left[\frac{kg}{d} \right] \quad 5.5$$

$$\dot{m}_{Aktivkohle} = \frac{24}{0,35} * \frac{32 \left[\frac{g}{mol} \right]}{34 \left[\frac{g}{mol} \right]} * \left((100 \text{ ppm} - 0 \text{ ppm}) * 1,482 \frac{m^3}{kg} * 300 \frac{m^3}{h} * 10^{-6} \right) = 2,582 \frac{kg}{d}$$

$$t_{Standzeit} = \frac{m_{Vorlage}}{\dot{m}_{Aktivkohle}} [\text{Tage}] \quad 5.6$$

$$t_{Standzeit} = \frac{1500 \text{ kg}}{2,582 \frac{kg}{d}} = 580,95 \text{ d}$$

¹⁶ a.a.O. Fn.14

$\dot{m}_{\text{Aktivkohle}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{Tag}} \right]$	Aktivkohleverbrauch
$K_{\text{Aktivkohle}} \left[\frac{\text{kg Schwefel}}{\text{kg Aktivkohle}} \right]$	Beladungskapazität Aktivkohle (=0,35 -0,4)
$M_S \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$	Molmasse Schwefel (=32)
$M_{\text{H}_2\text{S}} \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$	Molmasse Schwefelwasserstoff (=34)
$\rho_{\text{H}_2\text{S}} \left[\frac{\text{mg}}{\text{ml}} \right]$	Dichte Schwefelwasserstoff
$\Delta\text{H}_2\text{S}(g) [\text{ppm}]$	entfernter Schwefelwasserstoff aus dem Biogas
$\dot{V}_{\text{Biogas}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$	Volumenstrom Biogas
$\rho_0 [\text{Pa}]$	Normaldruck: 101325 Pa
$\rho_{\dot{u}} [\text{Pa}]$	Überdruck im Fermenter
$R \left[\frac{\text{J}}{(\text{kmol} \cdot \text{K})} \right]$	allgemeine Gaskonstante: $8314,5 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$
$T [\text{K}]$	Temperatur im Gasraum des Fermenters

Bei der aktuellen Menge an Schwefelwasserstoff im Biogas lassen sich bei der Füllmenge von 1500 kg Aktivkohle Standzeiten von 580 Tagen erzielen. Die tatsächlichen Standzeiten weichen aufgrund der schwankenden Konzentration von Schwefelwasserstoff und dem Druck und somit auch der Dichte des Biogases. Tendenziell sind aber geringfügig kürzere Standzeiten zu erwarten.

Als Indikator für den Aktivkohlewechsel dient eine Messeinrichtung in der zweiten Kammer. Zeigt diese eine dauerhafte Schwefelwasserstoffkonzentration im Gas von mehr als 10 ppm an, ist ein Austausch der untersten Filterstufe notwendig. Dieser sollte innerhalb von 4 Wochen erfolgen.

Bei der Entschwefelung durch Aktivkohle fällt, wie in Gleichung 5.3 beschrieben, Kondensationswasser an. Da dieses Kondensat auch Schwefel enthält, ist eine spezielle Entsorgung nötig. Zunächst wird eine Kondensatfalle benötigt, die das anfallende Kondensat auffängt. Diese wird üblicherweise unterirdisch eingesetzt, da sie innerhalb des Rohrsystems den tiefsten Punkt darstellen sollte. Bei stetiger Kondensatabführung kann die Kondensatfalle relativ klein ausfallen, sodass wenige Liter Fassungsvermögen ausreichen. Das aufgefangene Kondenswasser kann mit-

tels einer zusätzlich installierten Pumpe über einen PVC-Schlauch zurück in das Gärproduktlager, bzw. den Fermenter gepumpt werden. Aufgrund der hier gegebenen Nähe zum Fermenter, bietet sich dieser im Hinblick auf materiellen und finanziellen Aufwand an.

Die im Kondensat enthaltenen Stoffe werden größtenteils wieder in der Trockensubstanz des Fermenters gebunden und zusammen mit den Gärresten entsorgt, bzw. als Dünger auf die Felder ausgebracht. Ein kleiner Teil gelangt wieder in das neu gebildete Biogas und durchläuft erneut die Entschwefelung. Dies geschieht allerdings in so geringem Ausmaß, dass es keine nennenswerten negativen Auswirkungen auf das Absorptionsverhalten des Filters zur Folge hat.

6 Hydraulische Einbindung der BHKWs in das Fernwärmenetz

Da die aktuelle hydraulische Situation im Fernwärmenetz in Wanzleben (Siehe 3. Aktuelle Situation) einen reibungslosen Betrieb nicht garantiert, soll eine Optimierung erfolgen. Das Kernproblem stellt hierbei die Anbindung der Blockheizkraftwerke der beiden Biogasanlagen dar. Das Ziel besteht hauptsächlich darin, die Temperatur im Rücklauf abzusenken, um den Gesamtwirkungsgrad der Blockheizkraftwerke zu verbessern. Aktuell beläuft sich die Rücklauftemperatur auf 75,8°C. Aus aggregatetechnischen Gründen liegt der optimale Temperaturbereich unter 60°C.¹⁷ Zudem soll sichergestellt werden, dass beide Anlagen über einen konstanten, ausreichenden Volumenstrom und Druck des Kühlwassers verfügen. Über konkrete Zahlen der zweiten Biogasanlage können keine Aussagen getroffen werden, da diese nicht von den Stadtwerken Wanzleben betrieben wird. Im Nachfolgenden sollen mehrere Möglichkeiten der Optimierung betrachtet werden, wobei ausschließlich eine hydraulische Lösung gefunden werden soll. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Zeichnungen des hydraulischen Netzes stark vereinfacht. Jede Variante zeigt nur einen zur Veranschaulichung relevanten Ausschnitt des gesamten Netzes

¹⁷ Vgl. Schmitz, K.W. & Schauman, G. (2005): Kraft-Wärme-Kopplung, Springer Berlin/Heidelberg

6.1 Durchflussregelung mit Differenzdruckregler

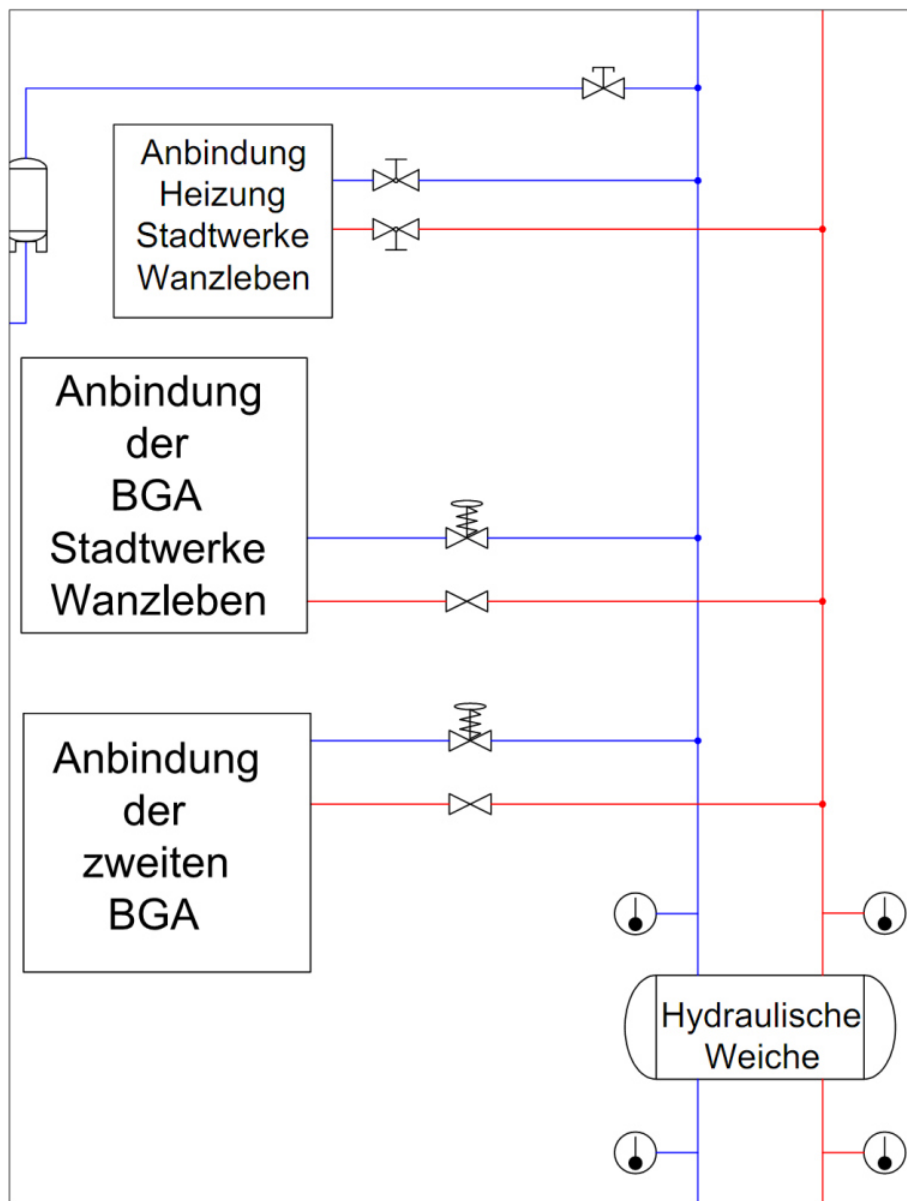


Abbildung 9: Regelung durch Differenzdruckregler

Eine mögliche Variante, die Druckverhältnisse anzugleichen, wäre der Einbau von Differenzdruckreglern ohne Hilfsenergie. Diese werden, wie in dem, in Abbildung 9: Regelung durch Differenzdruckregler gezeigten Ausschnitt des Betriebsgeländes, in die Rohrleitung eingesetzt. Differenzdruckregler vergleichen die Druckverhältnisse im Vor- und Rücklauf. Weichen diese außerhalb gesetzter Toleranzgrenzen von einander ab, wird über eine Stellfeder automatisch ein Absperrventil gesteuert, um

die Drücke wieder anzugleichen. Durch die Verminderung des Durchflussvolumens von Heizwasser hat dieses mehr Zeit sich abzukühlen, wodurch die Blockheizkraftwerke wiederum mehr Wärme abgeben können und somit einen höheren Gesamtwirkungsgrad erzielen.

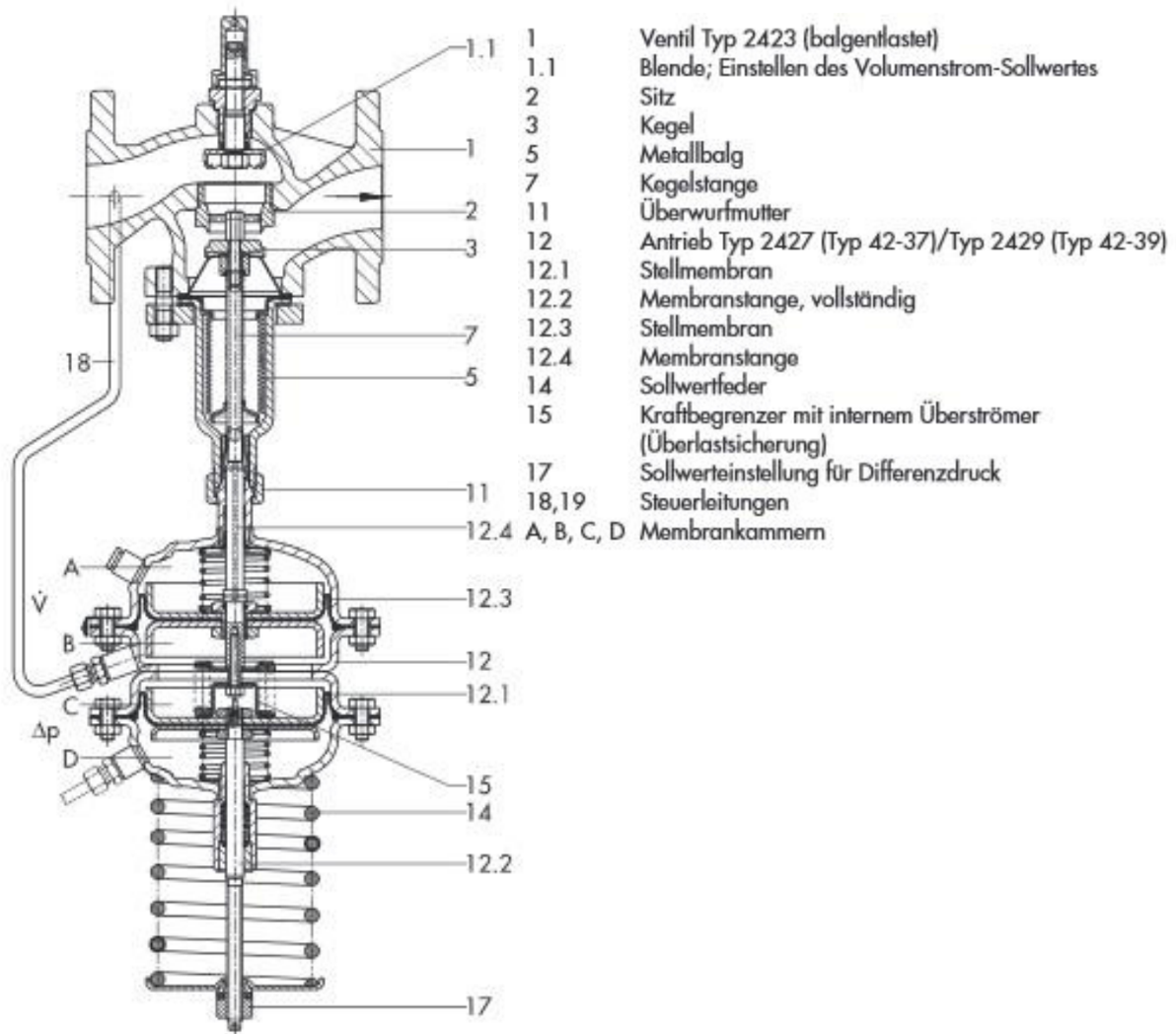


Abbildung 10: Volumenstrom- und Differenzdruckregler Typ 42-37¹⁸

Denkbar wäre der Einsatz eines Volumenstrom- und Differenzdruckreglers des Typs 42-37 von Samson. Dieser wird für Normdurchmesser bis DN 250 hergestellt. Die hier notwendigen Ventile von DN 150 sind also verfügbar. Dieses Modell ist geeignet für flüssige Medien in einem Temperaturbereich von 5°C bis 150°C mit Nenndruck PN 16 bis PN 40. Einstellbare Differenzdrücke sind von 0,1 bis 5 bar möglich.

¹⁸ Samson AG Mess- und Regeltechnik, Datenblatt Differenzdruckregler Typ 42-37

Abbildung 10: Volumenstrom- und Differenzdruckregler Typ 42-37 zeigt den Querschnitt eines Volumenstrom- und Differenzdruckreglers vom Typ 42-37 von Samson zum Einbau in die Rücklaufleitung in Fernwärmeversorgungsanlagen.

Das Ventil (1) wird dabei, wie dargestellt, in Pfeilrichtung vom Wärmeträgermedium durchströmt. Die von der Blende (1.1) und dem Kegel (3) freigegebenen Flächen beeinflussen den Volumenstrom und den Differenzdruck Δp .

Durch den Druck hinter der Blende wird die Außenseite des Metallbalges (5) belastet, durch Minderdruck dessen Innenseite. Für die Differenzdruckregelung wird der Plusdruck über eine Steuerleitung (18) in die Membrankammer D und der, dem Volumenstrom-Plusdruck entsprechenden Minusdruck von Δp in die Membrankammer C geführt. Dort wird der Differenzdruck Δp von der unteren Stellmembran (12.1) aufgenommen und in eine Stellkraft umgeformt. Die obere Stellmembran (12.3) verarbeitet den vom Volumenstrom abhängigen Wirkdruck. Dabei ist das jeweils größere Signal wirksam. Einer Änderung des Differenzdrucks folgt eine Änderung der Stellkraft, die die Membranstangen (12.2 und 12.4) und somit auch den Kegel in die entsprechende Schließ- oder Öffnungsrichtung bewegt, bis der zuvor eingestellte Volumenstrom-Sollwert erreicht ist.

Für die Volumenstromregelung wird der hinter der Blende anstehende Druck über Bohrungen in der Kegel- (7) und Membranstange (12.4) in die Membrankammer A übertragen. Der Volumenstrom-Plusdruck wird über die Steuerleitung in die Membrankammer B geführt. Die Regelung erfolgt hier ebenfalls durch die Umformung des Drucks in eine Stellkraft.

Vorteilhaft ist hierbei der geringe materielle und zeitliche Aufwand, der zur Realisierung betrieben werden muss. Lediglich der Austausch der aktuell verbauten Absperrventile mit Differenzdruckreglern ist nötig, um diesen Lösungsvorschlag umzusetzen. Durch die hilfsenergiefreie Ausführung wird kein elektrischer Anschluss benötigt, was die Investitionskosten sehr gering hält. Weiterhin sind Durchflussregler relativ günstig. Die Kosten hierfür belaufen sich auf wenige Hundert Euro, in etwa 100 – 300 € pro Einheit.

Nachteilig an dieser Variante ist allerdings, dass durch die Begrenzung des Durchflusses zwar die Volumenströme konstant gehalten werden können, bei geringer

Wärmeabnahme durch die Verbraucher jedoch eine etwas höhere Rücklauftemperatur erreicht wird. In dem Fall könnte möglicherweise nicht die gesamte Leistung der BHKWs ausgenutzt werden, da nicht die gesamte Menge an produzierter Wärme abgeführt werden kann. Es ist denkbar, dass bei dieser Anordnung unter Umständen die Blockheizkraftwerke beider Biogasanlagen nicht durchgehend Volllast fahren können.

6.2 Anbindung der Biogasanlagen vor die hydraulische Weiche

Denkbar wäre auch, den Anschluss der Biogasanlagen zu verlegen. Aktuell befindet sich die Anschlussstelle aus Erzeugersicht hinter der hydraulischen Weiche. Durch die Verlegung des Anschlusses vor die hydraulische Weiche (vgl. Abbildung 11) wird die Erzeugerseite, abgesehen von der Solarthermieanlage, hydraulisch vollständig von der Verbraucherseite getrennt. Zusätzlich kann die Weiche, wenn auch nur für einen kurzen Zeitraum, als Lastausgleichsspeicher dienen.

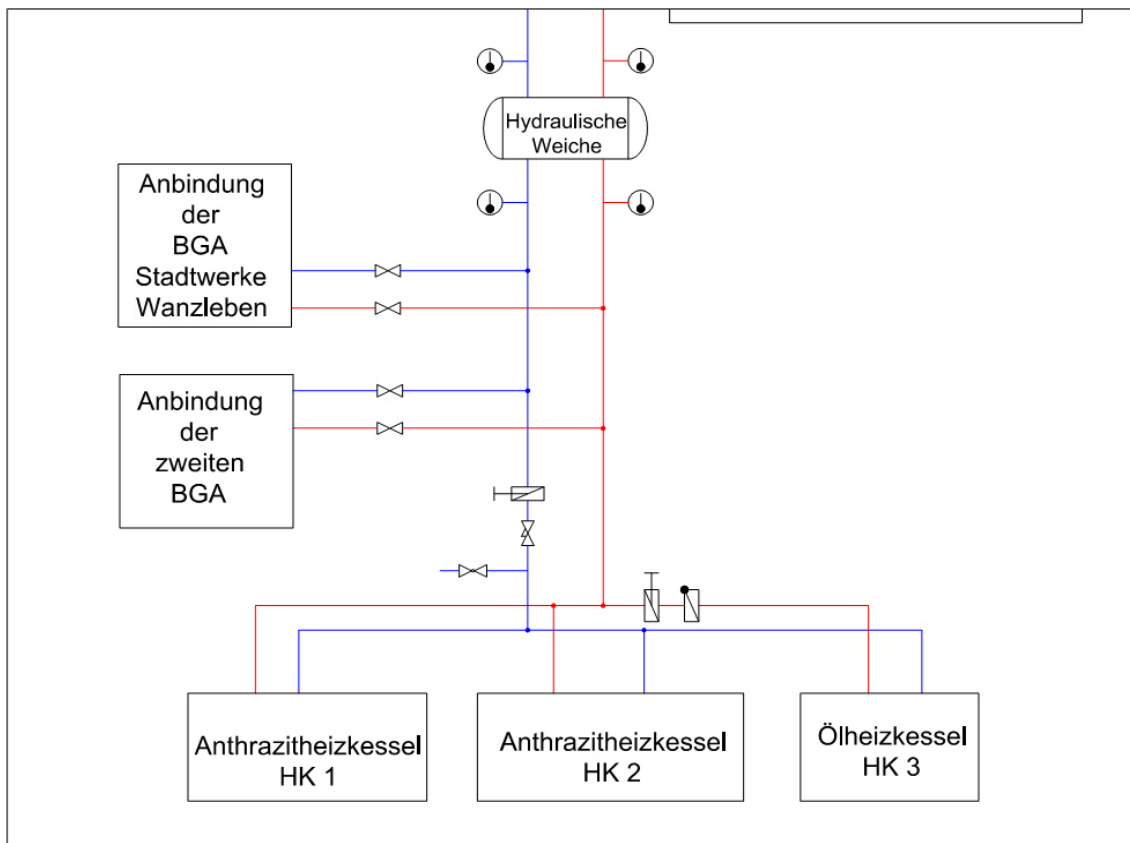


Abbildung 11: Anbindung vor hydraulischer Weiche

Für diese Anordnung sind prinzipiell drei Betriebszustände möglich.¹⁹

Betriebszustand 1

Der Volumenstrom auf der Wärmeerzeugerseite V_P und Wärmeverbraucherseite V_S sind gleich groß. Die Weiche befindet sich in einem neutralen, bzw. stationären Zustand. Temperatur und Wärmemenge im Primärkreis entsprechen der des Sekundärkreises. Dieser Betriebszustand stellt aus anlagentechnischer Sicht das Optimum dar, da die erzeugte Wärme sofort abgenommen wird und keine Speichernotwendigkeit gegeben ist.

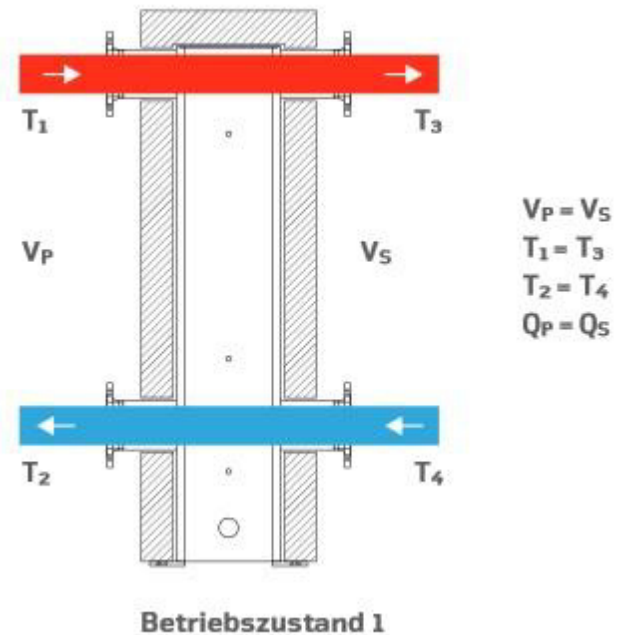


Abbildung 12: Hydraulische Weiche Betriebszustand 1

Betriebszustand 2

Bei diesem Zustand wird mehr Wärme erzeugt, als benötigt. Die Kesselkreispumpen fördern somit auch mehr Wasser durch den Wärmeerzeugerkreis, als die Verbraucherseite benötigt. Der Volumenstrom, der für die Kühlung der Wärmeerzeuger notwendig ist, wird aus dem Vorlauf des Primärkreises dem Rücklaufwasser des Sekundärkreises beigemischt. Die Rücklauftemperatur des Primärkreises wird somit angehoben.

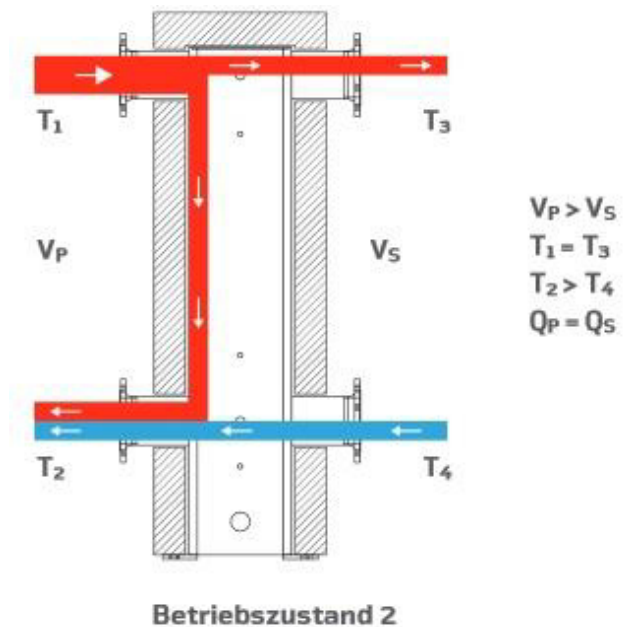


Abbildung 13: Hydraulische Weiche Betriebszustand 2

¹⁹ Sinusverteiler, *Ausgleich von Last und Leistung – Funktion und Wirkungsweise hydraulischer Weichen in Heizungsanlagen*, Online http://www.sinusverteiler.com/files/ausgleich_von_last_und_leistung_01.pdf [Stand 02.10.2013]

Betriebszustand 3

In diesem Fall wird sekundärseitig mehr Wasser benötigt, als primärseitig bereitgestellt werden kann. Die Volumenströme in den Kreisläufen werden durch die hydraulische Weiche ausgeglichen, indem, ähnlich wie im Betriebszustand 2, Wasser aus dem Rücklauf der Verbraucherseite dem Vorlauf beigemischt wird. Dadurch erfolgt hier eine Absenkung der Vorlauftemperatur im Verbraucherkreis. Tendenziell ist dieser Zustand allerdings nicht zu erwarten, da im Falle einer „Unterversorgung“ die Spitzenlastkessel bedarfsgerecht zugeschaltet werden können.

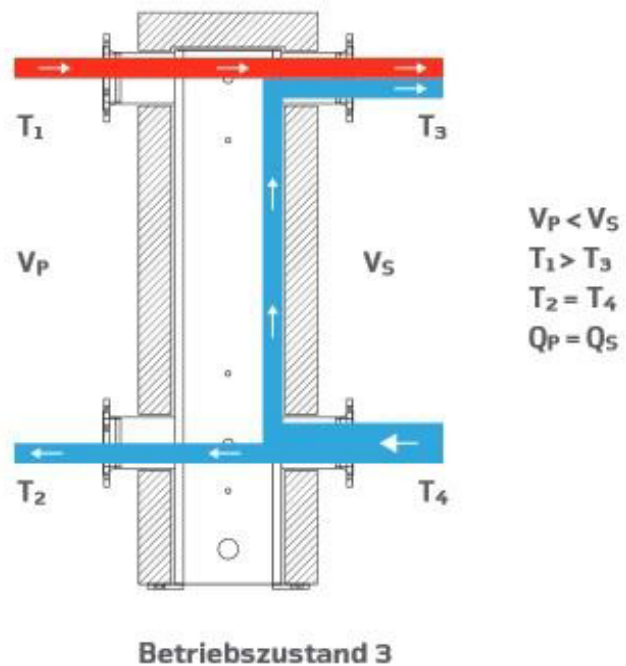


Abbildung 14: Hydraulische Weiche Betriebszustand 3

Zu möglichen Komplikationen kann es kommen, wenn der Zustand 2 zu lange anhält. Eine längere Anhebung der Rücklauftemperatur kann den Wirkungsgrad der Blockheizkraftwerke schmälern, da die Motoren nicht mehr hinreichend gekühlt werden. Dies ist insbesondere in den Sommermonaten zu erwarten, wenn kaum Wärme benötigt wird.

Hinsichtlich des materiellen und finanziellen Aufwands bewegt sich die Realisierung dieses Lösungsvorschlages in einem vergleichsweise moderaten Rahmen. Es muss lediglich die hydraulische Anbindung der Blockheizkraftwerke vor die Weiche verlegt werden. Dazu werden mehrere hundert Meter Rohrleitung benötigt, die unterirdisch verlegt werden müssen. Schätzungsweise würden sich die Kosten für Material und Montage im Bereich von 10.000,00 € - 20.000,00 € bewegen. Die Umsetzung sollte innerhalb weniger Wochen erfolgen können.

6.3 Regelung durch Pufferspeicher

Aus technischer Sicht ist der Einbau eines Pufferspeichers die sinnvollste Variante. Der Einbau könnte folgendermaßen Aussehen:

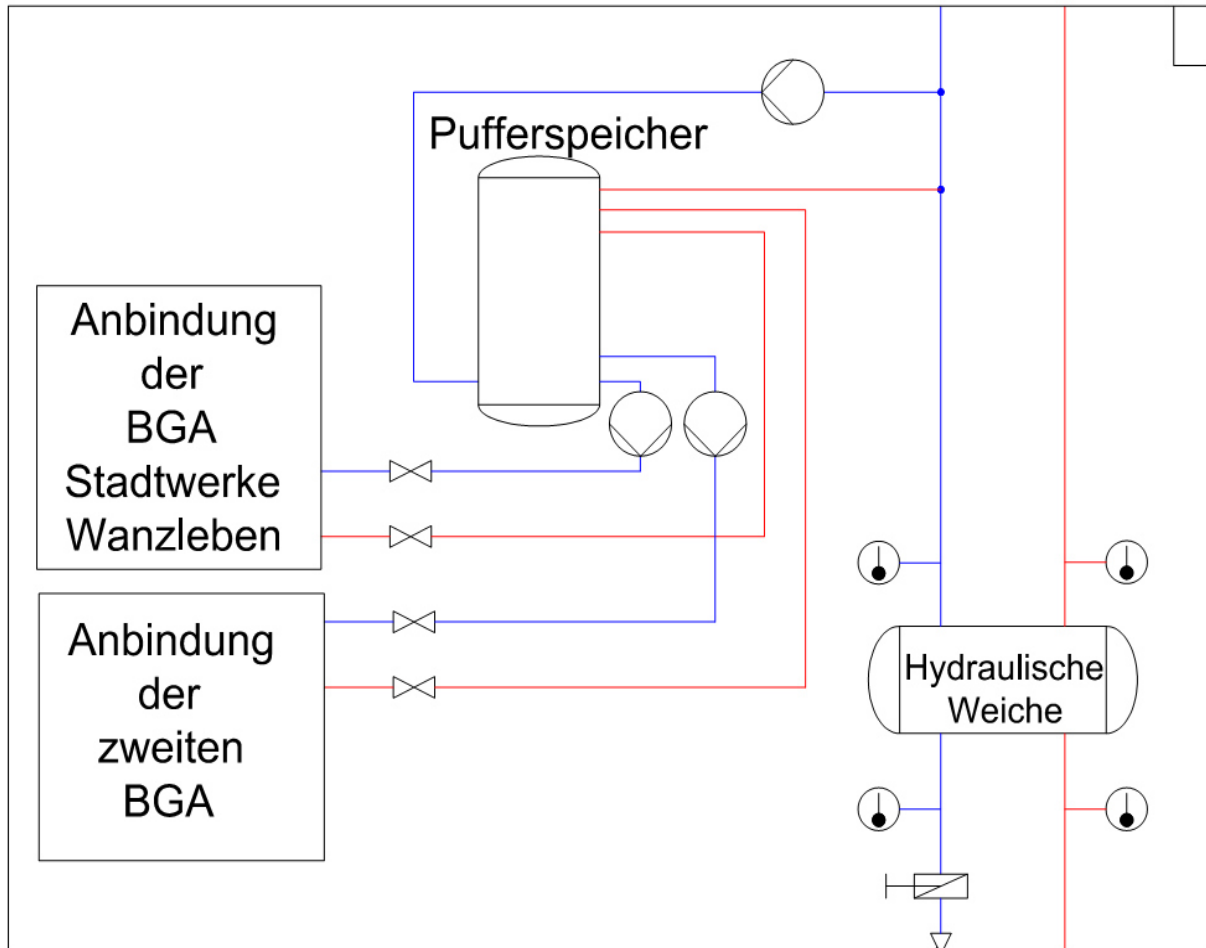


Abbildung 15: Einbindung mit zusätzlichem Pufferspeicher

Zur Befüllung des Pufferspeichers wird Wasser aus dem Rücklauf in eben jenen hineingepumpt. Aus diesem wird dann, abhängig vom momentanen Bedarf, Kühlwasser zu den Blockheizkraftwerken gepumpt und anschließend zurück in den Speicher geleitet. Da nur kaltes Wasser gespeichert werden soll, um die Kühlwasserversorgung der BHKWs sicherzustellen, wird das heiße Wasser umgehend wieder entnommen und dem Netz zugeführt. Sollte mehr Wärme erzeugt werden, als abgenommen werden kann, kann die hydraulische Weiche zusätzlich als Warmwasserspeicher fungieren.

6.3.1 Dimensionierung des Pufferspeichers

Bei der Auslegung des Pufferspeichers wird eine Speicherdauer von 8 Stunden angestrebt. So kann der Betrieb der Blockheizkraftwerke im Störfall aufrecht erhalten werden und die Möglichkeit gegeben sein, auch größere Störungen ohne erheblichen Zeitdruck zu beheben. Die Gesamtleistung aller drei Blockheizkraftwerke beträgt 1160 kW^{20} . Die Temperaturen des Vor- und Rücklaufs belaufen sich auf $80,9^\circ\text{C}$, bzw. $75,8^\circ\text{C}$. Somit ergibt sich eine Temperaturdifferenz ΔT von $5,1 \text{ K}$. Die benötigte Größe des Speichers errechnet sich wie folgt²¹:

$$m = \frac{P_{thBHKW} * t}{c * \Delta T} \quad 6.1$$

$$m = \frac{1160000 \text{ W} * 8 \text{ h}}{4,182 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} * 5,1 \text{ K}} = 435104,6971 \text{ kg}$$

$$V = 435104,6971 * 10^{-3} \text{ m}^3 = 435,1046971 \text{ m}^3 \quad 6.2$$

$M [\text{kg}]$	<i>Masse des Pufferspeichers</i>
$P_{thBHKW} [\text{W}]$:	<i>Thermische Leistung des BHKWs</i>
$T [\text{h}]$	<i>Überbrückungszeit</i>
$c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$	<i>spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgers (hier Wasser mit $4,182 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right]$)</i>
$\Delta T [\text{K}]$	<i>Temperaturdifferenz Vor-/Rücklauf</i>

Der zu installierende Speicher sollte also ein Volumen von etwa 435 m^3 aufweisen.

²⁰ $290 \text{ kW} + 290 \text{ kW} + 580 \text{ kW} = 1160 \text{ kW}$

²¹ Weiss, Martin (2006): *Technische Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Block-Heizkraftwerk-Anlagen (BHKW)*, GRIN

Gängige Speichergrößen in diesen Dimensionen liegen laut Hersteller bei 475 m³. Ein Pufferspeicher dieser Größe kann auch hier gewählt werden. Bei Vor- und Rücklauftemperaturen von 60°C, bzw. 100°C können 17 MWh Wärmeenergie gespeichert werden.

Die Investitionskosten liegen hier in etwa bei 1052 €/m³ Wasseräquivalent (exkl. MwSt.), was einer Summe von 500.000,00 € entspricht. Hinzu kommen die Kosten für Fundament sowie die Verkabelung und Elektromontage. Grob geschätzt belaufen sich die Gesamt-Investitionskosten auf etwa 600.000,00 €. Der Neubau eines Wärmespeichers für Kraft-Wärme-Kopplung wird seit dem 19.07.2012 nach dem Kraft-Wärme-Kopplung-Gesetz mit 250 €/m³, bzw. maximal 30% der Investitionskosten gefördert. In diesem konkreten Fall belaufen sich die Fördermittel auf maximal ca. 250 €/m³ * 475 m³ = 118.750,00 €. Voraussetzung für die Förderung ist auch eine ausreichende Wärmedämmung, welche Wärmeverluste von 15 W/m² an der Behälteroberfläche nicht erreichen darf. Der Antrag für die Förderung muss beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle gestellt werden.²²

Obwohl der Speicher hier für eine Absenkung der Rücklauftemperatur vorgesehen ist, sollte für eine Wärmedämmung gesorgt werden, um die Fördermittel zu erhalten. Unisolierter rostfreier Edelstahl weist eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{Stahl} = 50 \frac{W}{m \cdot K}$ auf und ist, in wirtschaftlich sinnvollen Wandstärken, demnach laut Gesetzgeber nicht förderberechtigt.

Der Speicher soll außen in stehender Ausführung aufgestellt werden. Dies führt im Vergleich zur liegenden Variante zu einer besseren und gleichmäßigeren Temperaturschichtung innerhalb des Speicherbehälters.

²² Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2012): Merkblatt Wärme- und Kältespeicher zur Darlegung der Zulassungsvoraussetzungen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) – gültig für Speicher mit einem Baubeginn ab dem 19.07.2012

Laut Hersteller haben derart große Speichereinheiten eine Höhe von ca. 20 m, einen Durchmesser von 5,5 m bei einer Blechstärke von ca. 19 mm und ein Leergewicht von etwa 25 t. Mit Vernachlässigung der eventuell abgerundeten Bauform ergeben sich folgende, für weitere Berechnungen relevante Flächen:

Mantelfläche A_M

$$A_M = \pi * d * h \quad 6.3$$

$$A_M = \pi * 5,5 \text{ m} * 20 \text{ m} = 345,58 \text{ m}^2$$

Deckel-, bzw. Bodenfläche $A_{\text{Deckel}}, A_{\text{Boden}}$

$$A_{\text{Boden}} = A_{\text{Deckel}} = \pi * r^2 \quad 6.4$$

$$A_{\text{Boden}} = A_{\text{Deckel}} = \pi * \left(\frac{5,5 \text{ m}}{2}\right)^2 = 23,76 \text{ m}^2$$

Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt im vieljährigen Mittel $8,7^\circ\text{C}$ ²³, was bei einer Speichertemperatur von $75,8^\circ\text{C}$ zu einer Temperaturdifferenz ΔT_{Mantel} zwischen dem Puffer und der Außenluft führt. Dieser Wert gilt sowohl für die Mantel-, als auch für die Deckelfläche des Speichers.

$$\Delta T_{\text{Mantel}} = T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Außen}} \quad 6.5$$

$$\Delta T_{\text{Mantel}} = (273 \text{ K} + 75,8 \text{ K}) - (273 \text{ K} + 8,7 \text{ K}) = 67,1 \text{ K}$$

²³ Deutscher Wetterdienst DWD (2012), *Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2012*, online http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&gsbSearchDocId=1291922 [Stand am 21.09.2013]

Die Temperaturdifferenz zwischen dem Inneren des Pufferspeichers und dem Erdboden errechnet sich gemäß des Leitfadens zum Nachweis der Speichereffizienz im Rahmen der Zulassung von Wärme- und Kältespeichern nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2012 des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle wie folgt. Dabei wird eine mittlere Erdoberflächtemperatur T_{Erde} von 10°C angenommen.²⁴

$$\Delta T_{\text{Boden}} = T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Erde}} \quad 6.6$$

$$\Delta T_{\text{Boden}} = 273 \text{ K} + 75,8 \text{ K} - 273 \text{ K} + 10 \text{ K} = 65,8 \text{ K}$$

Anhand dieser Werte lassen sich nun die erforderlichen mittleren Dämmschichtdicken s_m für die jeweiligen Partien des Speichers errechnen. Als Dämmmaterial wird PUR-Schaum mit einem Wärmeleitkoeffizienten $\lambda = 0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ verwendet. Hierbei ist zu beachten, dass der Grenzwert für den Wärmeverlust $\dot{q} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ nicht überschritten wird. Die Schichtdicken für die Mantelfläche und den Deckel betragen²⁵:

$$s_{m,\text{Mantel}} = \frac{\lambda_{\text{Mantel}}}{\dot{q}} * \Delta T_{\text{Mantel}} \quad 6.7$$

$$s_{m,\text{Mantel}} = \frac{0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} * 67,1 \text{ K} = 0,179 \text{ m}$$

²⁴ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2013), *Leitfadens zum Nachweis der Speichereffizienz im Rahmen der Zulassung von Wärme- und Kältespeichern nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2012*, online http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/publikationen/berechnungsleitfaden.pdf [Stand 20.02.2014]

²⁵ VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik Und Chemieingenieurwesen (2006), *VDI-Wärmeatlas*, Berlin Heidelberg, Springer, S. Ea 1f

$$s_{m,Deckel} = \frac{\lambda_{Deckel}}{\dot{q}} * \Delta T_{Deckel} \quad 6.8$$

$$s_{m,Deckel} = \frac{0,04 \frac{W}{mK}}{15 \frac{W}{m^2}} * 67,1 K = 0,179 m$$

Für den Boden des Speichers errechnet sich eine Schichtdicke von:

$$s_{m,Boden} = \frac{\lambda_{Boden}}{\dot{q}} * \Delta T_{Boden} \quad 6.9$$

$$s_{m,Boden} = \frac{0,04 \frac{W}{mK}}{15 \frac{W}{m^2}} * 65,8 K = 0,175 m$$

Für eine ausreichende Dämmung sind also Dämmschichtdicken von 0,179 m, bzw. 0,175 m nötig. Daraus resultiert die mittlere Schichtdicke s_m .

$$s_m = \frac{\sum V_m}{\sum A} \quad 6.10$$

$$s_m = \frac{345,58 m^2 * 0,179 m + 23,76 m^2 * 0,179 m + 23,76 m^2 * 0,175 m}{345,58 m^2 + 23,76 m^2 + 23,76 m^2} = 0,1789 m$$

Dabei ist eine gleichmäßige Dämmung des Speicherbehälters nicht zwingend notwendig. Sinnvoll wäre eine dickere Dämmschicht am oberen Teil des Speichers, da das Temperaturniveau des Brauchwassers dort höher ist. Wichtig hierfür ist das Dämmmaterialvolumen V_m , das sich aus den zuvor errechneten Schichtdicken ermitteln lässt.

$$\begin{aligned} V_m &= V_{m,Mantel} + V_{m,Deckel} + V_{m,Boden} \\ &= s_{m,Mantel} * A_M + s_{m,Deckel} * A_{Deckel} + s_{m,Boden} * A_{Boden} \end{aligned} \quad 6.11$$

$$V_m = 345,58 \text{ m}^2 * 0,179 \text{ m} + 23,76 \text{ m}^2 * 0,179 \text{ m} + 23,76 \text{ m}^2 * 0,175 \text{ m} = 70,27 \text{ m}^3$$

Bei einer unregelmäßigen Verteilung des Dämmmaterials ist darauf zu achten, dass die mittlere Dämmschichtdicke s_m nicht um mehr als die Hälfte unterschritten wird und das Dämmmaterialvolumen V_m eingehalten wird.

Die Berechnung der Wärmeverluste erfolgt unter der Annahme, dass die Dämmschicht am Speicher gleichmäßig verteilt ist. Die Gesamtwärmeverluste \dot{Q}_{ges} setzen sich aus den an der Mantelfläche $\dot{Q}_{V,M}$, dem Boden und dem Deckel \dot{Q}_V auftretenden Verlusten zusammen.²⁶

$$\dot{Q}_{V,M} = \frac{2 * \pi * l * (\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\frac{1}{\lambda_{Stahl}} * \ln\left(\frac{d_i}{d_l}\right) + \frac{1}{\lambda_{iso}} * \ln\left(\frac{d_a}{d_l}\right)} \quad 6.12$$

$$\dot{Q}_{V,M} = \frac{2 * \pi * 20 \text{ m} * (75,8 \text{ K} - 8,7 \text{ K})}{\frac{1}{50 \frac{W}{mK}} * \ln\left(\frac{5538 \text{ mm}}{5500 \text{ mm}}\right) + \frac{1}{0,04 \frac{W}{mK}} * \ln\left(\frac{5896 \text{ mm}}{5538 \text{ mm}}\right)} = 5383,9 \text{ W}$$

²⁶ Müller, Markus (2008), *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zu Möglichkeiten der Energieeffizienzsteigerung der versorgungstechnischen Anlage der Mittelschule in Eibenstock*, BA Glauchau, S. 42ff

$$\dot{Q}_V = \frac{A * (\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\frac{S_{Stahl}}{\lambda_{Stahl}} + \frac{S_m}{\lambda_{iso}}} \quad 6.13$$

$$\dot{Q}_V = \frac{2 * 23,76 \text{ m}^2 * (75,8 \text{ K} - 8,7 \text{ K})}{\frac{0,019 \text{ m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,1789 \text{ m}}{0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}} = 712,87 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_{V,M} + \dot{Q}_V \quad 6.14$$

$$\dot{Q}_{ges} = 5383,9 \text{ W} + 712,87 \text{ W} = 6096,77 \text{ W} \approx 6,1 \text{ kW}$$

Die Gesamtwärmeverluste belaufen sich bei der mindestens geforderten Dämmschichtdicke auf knapp 6,1 kW und fallen recht moderat aus.

Zusätzlich zum Speicher muss ein geeignetes Fundament gebaut, sowie eine hydraulische Verbindung zum Fernwärmenetz, bzw. den Blockheizkraftwerken hergestellt werden. Konkret bedeutet dies, dass, je nach Standort mindestens 100 m Edelstahl-Rohrleitungen, drei Umwälzpumpen sowie die erforderlichen Muffen, Flansche, etc. benötigt werden.

Die Realisierung des Vorhabens würde schätzungsweise 6-8 Monate in Anspruch nehmen.

6.4 Fazit

Tabelle 7 stellt abschließend noch einmal die Vor- und Nachteile, der zuvor betrachteten Lösungsvorschläge gegenüber. Dabei fällt auf, dass die Schaffung optimaler Temperaturverhältnisse für den Betrieb der Blockheizkraftwerke mit Investitionen verbunden ist. Je niedriger die Investitionsbereitschaft ist, desto mehr Abstriche muss man in Kauf nehmen.

Variante	Vorteile	Nachteile	Aufwand/Kosten
Differenzdruckregler	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr günstig - Volumenströme regelbar - Geringer Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - Kaum Kontrolle über Rücklauf-temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenige Tage - Ca. 1.000,00 €
Hydraulische Weiche	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ günstig - Mäßiger Aufwand - Hydraulische Entkoppelung - Weiche kann als (sehr kleiner) Pufferspeicher genutzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei geringem Wärmebedarf möglicherweise hohe Rücklauf-temperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenige Wochen - Ca. 10.000,00 € - 20.000,00 €
Pufferspeicher	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige Rücklauf-temperatur garantiert - Zusätzliche Speichermöglichkeit - Nachhaltig - Subventioniert 	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr hohe Kosten - Sehr großer zeitlicher Aufwand - Platzbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> - Mehrere Monate - Ca. 600.000,00 € (exkl. Subventionen)

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Lösungsvorschläge

Biogasanlagen sollten ihrem Anspruch gerecht werden, bzw. bleiben und für eine nachhaltige Energieversorgung genutzt werden. Um dies zu erreichen, sollte auch die „Peripherie“ entsprechend gewählt und ausgelegt werden. Die Installation eines Pufferspeichers ist daher auf lange Sicht sinnvoll. Auch wenn die Investitionskosten sehr hoch sind, rentiert sich der Betrieb der BHKW langfristig dafür umso mehr. Die nicht benötigte Wärme kann gespeichert und der erzeugte Strom ins Netz eingespeist werden. Durch das EEG wird dieser zudem zu einem garantierten Festpreis vergütet.

7 Quellenverzeichnis

- /1/ **Erneuerbare Energien Gesetz** (EEG 2012) §6 Absatz 4 Nummer 2
- /2/ **Kaltschmitt, Martin, Hartmann, Hans., Hofbauer, Hermann.** (2009): *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren.* Springer
- /3/ **Wassermann, Carl.** (2011). *Schwefelwasserstoff im Biogas - Erneuerbare Energie im Griff.* Online www.h-2-s.de [Stand 11.07.2013]
- /4/ **Bayerisches Landesamt für Umwelt LfU** (2007), *Biogashandbuch Bayern – Materialienband Kap 1.1.-1.5*, S. 66f
- /5/ **Melde, Lars** (2007): *Dezentrale regenerative Energiequelle – Die Biogasanlage*, Braunschweig: GRIN, S. 4
- /6/ **Bauer, Antonie** (1993): *Der Treibhauseffekt: eine ökonomische Analyse*, Tübingen: Mohr Siebeck
- /7/ **Kaltschmitt, Martin & Reinhardt, A. Guido (Hrsg.)** (1997): *Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*, Braunschweig/Wiesbaden, vieweg Umweltwissenschaften
- /8/ **Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg**, (2008) *Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung.* Online Projektbericht, Dezember 2008 http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Duenger_udn_Substrate/Duengewirkung_4_09_1u2.pdf [Stand 24.09.2013]
- /9/ **Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden**,(2003) *Düngewirkung von Gülle*, Online <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14036/documents/16496> [Stand 24.09.13]
- /10,11/ **Bundesverband der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften e.V.**, (2002) *Sicherheitstechnische Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb von Biogasanlagen* http://www.umwelt-online.de/recht/luft/laender/nds/biogasbetr_ges.htm [Stand 14.09.2013]
- /12/ **Green Energy Max Zintl GmbH**, Datenblatt Green Energy Gasfackel

- /13/ **Siemens AG**, Datenblatt Siemens SIPLUS S7-200 CPU 221 DCDCDC (*23)
- /14/ **Deutscher Wetterdienst DWD**, (2012), *Absolute Tiefsttemperaturen in Deutschland*, Online
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KUPK/Wetterrekorde/absolute__tiefsttemperaturen__brd,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/absolute_tiefsttemperaturen_brd.pdf
[Stand 21.09.2013]
- /15,16/ **Polster, Andreas, Brummack, Joachim** (2005), *Verbesserung von Entschwefelungsverfahren in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*, TU Dresden Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Online http://web-redaktion.tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifvu/tvu/forschungsprojekte/forschung_alt/entschwefelungsverfahren [Stand 21.09.13]
- /17/ **Schmitz, K.W., Schauman, G.** (2005): *Kraft-Wärme-Kopplung*, Springer Berlin/Heidelberg
- /18/ **Samson AG Mess- und Regeltechnik**, Datenblatt Differenzdruckregler Typ 42-37
- /19/ **Sinusverteiler**, *Ausgleich von Last und Leistung – Funktion und Wirkungsweise hydraulischer Weichen in Heizungsanlagen*, Online http://www.sinusverteiler.com/files/ausgleich_von_last_und_leistung_01.pdf [Stand 02.10.2013]
- /21/ **Weiss, Martin** (2006): *Technische Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Block-Heizkraftwerk-Anlagen (BHKW)*, GRIN
- /22/ **Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle** (2012), *Merkblatt Wärme- und Kältespeicher zur Darlegung der Zulassungsvoraussetzungen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) – gültig für Speicher mit einem Baubeginn ab dem 19.07.2012*
- /23/ **Deutscher Wetterdienst DWD** (2012), *Jahresrückblick: Deutschlandwetter im Jahr 2012*, online
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&gsbSearchDocId=1291922
[Stand am 21.09.2013]

- /24/ **Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle** (2013), *Leitfaden zum Nachweis der Speichereffizienz im Rahmen der Zulassung von Wärme- und Kältespeichern nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2012*, online
http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/publikationen/berechnungsleitfaden.pdf [Stand 20.02.2014]
- /25/ **VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik Und Chemieingenieurwesen** (2006), *VDI-Wärmeatlas*, Berlin Heidelberg, Springer, S. Ea 1f
- /26/ **Müller, Markus** (2008), *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zu Möglichkeiten der Energieeffizienzsteigerung der versorgungstechnischen Anlage der Mittelschule in Eibenstock*, BA Glauchau, S. 42ff

8 Literaturverzeichnis

Antranikian, Garabed (2007), *Angewandte Mikrobiologie*, London, Springer

Bauer, Antonie (1993): *Der Treibhauseffekt: eine ökonomische Analyse*, Tübingen, Mohr Siebeck

Eide, Björn (2009), *Regelung und Optimierung eines Brennstoffzellensystems für die Hausenergieversorgung*, Kassel, kassel university press GmbH

Kaltschmitt, Martin & Reinhardt, A. Guido (Hrsg.) (1997): *Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*, Braunschweig/Wiesbaden, vieweg Umweltwissenschaften

Kaltschmitt, Martin, Hartmann, Hans, Hofbauer, Hermann. (2009): *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer

Melde, Lars (2007): *Dezentrale regenerative Energiequelle – Die Biogasanlage*, Braunschweig, GRIN, S. 4

Müller, Markus (2008), *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zu Möglichkeiten der Energieeffizienzsteigerung der versorgungstechnischen Anlage der Mittelschule in Eibenstock*, BA Glauchau

Schulz, Christian (2007), *Systembetrachtung zur Integration von Mini-Blockheizkraftwerken in das elektrische Versorgungsnetz*, Göttingen, Cuvillier

VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik Und Chemieingenieurwesen (2006), *VDI-Wärmeatlas*, Berlin Heidelberg, Springer

Weiss, Martin (2006): *Technische Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Block-Heizkraftwerk-Anlagen (BHKW)*, GRIN

Wesselak, Viktor & Schabbach, Thomas (2009), *Regenerative Energietechnik*, Berlin, Springer

Witt, Andreas & Rumpff, Klaus (2005), *Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung*, Berlin ,Walter de Gruyter

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Ort, Datum

.....
Unterschrift des Verfassers