



**HOCHSCHULE LANDSHUT**  
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN



# Konstruktion und Aufbau einer Feststofffermentations-Laborbiogasanlage

## Bachelorarbeit

zum Erlangen des akademischen Grades  
Bachelor of Engineering

Aufgabensteller:

Hochschule Landshut

Betreuer:

Prof. Dr. rer. nat. Josef Hofmann

Zweitkorrektor:

Prof. Dr.-Ing. Jan Köll

Vorgelegt von: Christian Drexler

Ort, Abgabetermin: Landshut, 30.04.2014

## Erklärung zur Bachelorarbeit

---

Name, Vorname des Studierenden: Drexler, Christian  
Matrikel-Nr.: 409259  
Fakultät: Maschinenbau  
Studiengang: Maschinenbau

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit mit dem Thema:

*„Konstruktion und Aufbau einer Feststofffermentations-Laborbiogasanlage“*

selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

### **Die Bachelorarbeit darf:**

- über die Hochschulbibliothek zugänglich gemacht werden
- Nach einer Sperrfrist von ..... Jahren über die Hochschulbibliothek zugänglich gemacht werden

Landshut, den .....

.....  
Unterschrift der/s Studierenden

## Danksagung

---

An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. Josef Hofmann für die ausgezeichnete Betreuung sowie seine stete Unterstützung meiner Arbeit danken. Herrn M. Eng. Korbinian Nachtmann gilt mein Dank für sein Interesse an meiner Arbeit bereits in einer sehr frühen Phase und für seine Unterstützung bei technischen Details.

Des Weiteren möchte ich dem Institut für Umwelt- und Kläranlagentechnologie BIUKAT für seine finanzielle Unterstützung danken. Herrn Wolfgang Schmid danke ich für die freundliche Unterstützung beim Bau der Einzelteile, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Für das kostenlose Bereitstellen von Bauteilen möchte ich mich bei der HTI Gienger KG, Markt Schwaben, bedanken.

Meiner Familie, meiner Freundin Theresa und meinen Freunden, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, gilt ebenfalls mein Dank.

## Aufgabenstellung

---

Mit dem Feststofffermentationsverfahren können, im Gegensatz zur Nassfermentation, auch Substrate mit einem hohen Trockenanteil vergoren werden. Als Produkt dieser anaeroben Methangärung entsteht Biogas. Das Biogas besteht dabei aus ca. 65 Vol.-% Methan ( $\text{CH}_4$ ) und 35 Vol.-% Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Feststofffermentations-Biogasanlage für den Laborbetrieb zu konstruieren. Die Ausmaße der Anlage sollen die Größe einer Europalette nicht übersteigen. Des Weiteren gilt es, die Vergärung im sogenannten „Batch-Verfahren“ zu betreiben. Alle Bauteile der Laboranlage sollen im freien Handel zu kaufen sein.

Besonderes Augenmerk ist darauf zu legen, die Anlage so zu konstruieren, dass sie mit einfachen Mitteln nachzubauen ist. Als Einsatzort kommen Privathaushalte und kleine land- und forstwirtschaftliche Betriebe infrage. Auch in Entwicklungsländern, wo der Zugang zu Energieträgern eingeschränkt ist, kann die Biogasanlage eingesetzt werden.

Im zweiten Teil dieser Bachelorarbeit wird der Betrieb der Anlage beschrieben. Zudem werden verschiedene Substrate hinsichtlich ihres Biogaspotenzials bewertet und Erfahrungen und auftretende Probleme analysiert.

# Inhaltsverzeichnis

---

Erklärung zur Bachelorarbeit.....	ii
Danksagung .....	iii
Aufgabenstellung.....	iv
Abbildungsverzeichnis .....	vii
Tabellenverzeichnis .....	ix
Abkürzungsverzeichnis .....	x
Literaturverzeichnis .....	xii
1 Einleitung .....	1
2 Grundlagen der Feststofffermentation.....	2
2.1 Entstehung von Biogas .....	2
2.1.1 Hydrolyse .....	3
2.1.2 Acidogenese/Versäuerung.....	3
2.1.3 Acetogenese.....	4
2.1.4 Methanogenese .....	5
2.2 Milieubedingungen.....	6
2.2.1 Temperatur.....	6
2.2.2 Feuchtes Milieu .....	8
2.2.3 Luftabschluss .....	8
2.2.4 Lichtabschluss .....	9
2.2.5 pH-Wert.....	9
2.2.6 Pufferkapazität.....	9
2.2.7 Nährstoffversorgung.....	10
2.2.8 Hemmstoffe .....	12
2.3 Gasproduktion bei diskontinuierlichen Verfahren .....	14
2.4 Vergütung im EEG 2012 .....	15

3 Fermenter-Bauarten .....	16
3.1 Diskontinuierliche Verfahren .....	16
3.1.1 Perkolationsverfahren .....	16
3.1.2 Aufstauverfahren .....	17
3.1.3 Haufwerkverfahren .....	17
3.2 Kontinuierliche Verfahren .....	17
4 Konzeption .....	19
4.1 Anforderungen .....	20
4.2 Sicherheit .....	22
5 Konstruktiver Aufbau .....	24
5.1 Schematischer Aufbau und Verfahrensfließbild .....	24
5.2 Bauteilbeschreibung .....	26
5.2.1 Perkolattank .....	26
5.2.2 Fermenter .....	28
5.2.3 Laborheizung .....	30
5.2.4 Perkolatpumpe .....	31
5.3 Zusammenbau .....	32
6 Dichtheitsprüfung .....	33
7 Zusammenfassung .....	36
8 Ausblick .....	37
9 Anhang .....	38
Anhang A: Montageanleitung .....	39
Anhang B: Konstruktionszeichnungen .....	56
Anhang C: Stückliste .....	70

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Stufen der Biogasentstehung [1] .....	5
Abbildung 2: Einfluss der Faultemperatur und der Verweilzeit auf Menge und Zusammensetzung des erzeugten Gases [2] .....	7
Abbildung 3: Einfluss der Temperatur auf die Bakterienaktivität [3].....	8
Abbildung 4: Entwicklung der Anlagenleistung, der Propionsäuregehalte und der Methanausbeute während der bedarfsgerechten Ergänzung von Spurenelementen [2] .....	11
Abbildung 5: Zeitliche Gasproduktion beim Parallelbetrieb mehrerer Batch-Fermenter [3] ..	14
Abbildung 6: Biogasspeicher [4] .....	15
Abbildung 7: Verfahrensvarianten der Feststofffermentation.....	16
Abbildung 8: Pfropfenstromreaktor der Firma Axpo Kompogas AG® [5] .....	18
Abbildung 9: Festbettfermenter [6] .....	19
Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Laboranlage .....	24
Abbildung 11: Verfahrensfließbild.....	25
Abbildung 12: CAD-Modell Perkolattankdeckel .....	26
Abbildung 13: PE-Auffangwanne 250/2, 2 Kufen der Firma Chemo® [13] .....	26
Abbildung 14: Awaschacht PP DN 600 [7] .....	28
Abbildung 15: CAD-Modell Fermenterdeckel.....	29
Abbildung 16: CAD-Modell Substratsieb .....	29
Abbildung 17: Laborheizung Lauda NB/D8/17 .....	30
Abbildung 18: Perkolatpumpe [8] .....	31
Abbildung 19: Bauteile in Explosionsdarstellung.....	32
Abbildung 20: Zusammenbau Laborbiogasanlage .....	32
Abbildung 21: Adapter für Druckmessung .....	33
Abbildung 22: kurzgeschlossene Tankdurchführungen .....	34
Abbildung 23: Phywe Messsystem mit Adapter im Messbetrieb .....	34
Abbildung 24: Explosionszeichnung der Laborbiogasanlage .....	41
Abbildung 25: Perkolattank (1) mit Befestigungssockel (26).....	43
Abbildung 26: Verkleben des Perkolattanks (1) mit dem Perkolattankdeckel (2) .....	44
Abbildung 27: Abdeckung (3) von oben .....	45
Abbildung 28: Abdeckung (3) von unten .....	45
Abbildung 29: Saugfilter (19) mit Schlauch (20).....	46
Abbildung 30: Abdeckung (3) mit Tankfurchführungen .....	47

Abbildung 31: Abdeckung (3) montiert .....	47
Abbildung 32: Muffenstopfen (14) links und rechts am Sumpf (4) .....	48
Abbildung 33: Muffenstopfen (14) mit Fermenterheizung verbinden .....	49
Abbildung 34: Verkleben des Fermenterrohr (5) .....	50
Abbildung 35: Teleskopadapter montiert .....	51
Abbildung 36: Fermenterdeckel (8) oben und unten.....	52
Abbildung 37: Fermenter auf Perkolattank stellen.....	53
Abbildung 38: Fermenterauslauf in Perkolattank.....	54
Abbildung 39: Verfahrensfließbild.....	55

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Stoffumsetzung in der hydrolytischen Phase [1].....	3
Tabelle 2: Stoffumsetzung in der Acidogenese [1] .....	4
Tabelle 3: Stoffumsetzung in der acetogenen Phase [1].....	4
Tabelle 4: Günstige Spurenelementkonzentrationen [2] .....	12
Tabelle 5: Liste der benötigten Hilfsstoffe .....	42
Tabelle 6: Stückliste Fermenter .....	63
Tabelle 7: Stückliste Perkolattank .....	64
Tabelle 8: Hilfsstoffliste .....	65

## Abkürzungsverzeichnis

---

CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
d	Tag(e)
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
et al.	et alii (lat.), und andere
etc.	et cetera (lat.), und so weiter
g	Gramm
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Kohlensäure
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
H <sub>ac</sub> -Eq	Essigsäureäquivalent
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hydrogencarbonat-Ion
K	Kelvin
l	Liter
m	Milli (lat.), ein Tausendstel
min	Minute
N	Newton
NaWaRo	nachwachsender Rohstoff
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
Ni	Nickel
O	Sauerstoff

P	Phosphor
Pa	Pascal
Pb	Blei
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
S	Schwefel
s	Sekunde
spp.	species pluralis (lat.), in der Biologie für mehrere, nicht im Einzelnen zu nennende Spezies einer Gattung als Zusatz hinter deren wissenschaftlichem Namen
U	Umdrehungen
Vol.-%	Volumenprozent
Zn	Zink
	tau (altgriech.), Zeichen für das Verhältnis Perkolattankvolumen zu Fermentervolumen

## Literaturverzeichnis

---

- [1] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Biogashandbuch Bayern - Materialband, Augsburg; <http://www.lfu.bayern.de/abfall/biogashandbuch/index.htm>, 2007.
  
- [2] B. Eder, Biogas - Praxis, Bernried: ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2012.
  
- [3] Universität Rostock; Lehrstuhl für Verfahrenstechnik/Biotechnologie,, „Grundlagen der Trockenfermentation und Darstellung des Standes der Technik, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben,“ Rostock, 2007.
  
- [4] AGROTEL GmbH, 2014. [Online]. Available: <http://www.agrotel.eu/produktauswahl/biogas/gasspeicher.html>. [Zugriff am 17 Januar 2014].
  
- [5] bioin-gmbh, „BioIn Abfallverwertung,“ [Online]. Available: <http://www.bioin-gmbh.de/verg%C3%A4rung.html>. [Zugriff am 10 Januar 2014].
  
- [6] Gülzower Fachgespräche, „Trockenfermentation - Stand der Entwicklung und weiterer F+E-Bedarf (Band 24),“ Gülzow, 2006.
  
- [7] Rehau AG + CO, „Rehau.com,“ 2014. [Online]. Available: [http://www.rehau.com/DE\\_de/bau/Abwasser-\\_und\\_Wasserwirtschaft/Abwasserentsorgung/Kanalschaechte/AWASCHACHT\\_PP\\_DN\\_600\\_Kanalschacht/](http://www.rehau.com/DE_de/bau/Abwasser-_und_Wasserwirtschaft/Abwasserentsorgung/Kanalschaechte/AWASCHACHT_PP_DN_600_Kanalschacht/). [Zugriff am 18 Januar 2014].
  
- [8] Wolfcraft GmbH, „Wolfcraft,“ 2014. [Online]. Available: [http://www.wolfcraft.de/de/produkte/p/pumpen/1\\_pumpe-4/s/p/index.html](http://www.wolfcraft.de/de/produkte/p/pumpen/1_pumpe-4/s/p/index.html). [Zugriff am 20 Januar 2014].

- [9] Wikipedia, „wikipedia.org,“ [Online]. Available:  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Explosionsgrenze>. [Zugriff am 19 Januar 2014].
- [10] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2013.
- [11] Fachverband Biogas, e.V., „Fachverband Biogas e.V,“ 1 November 2013. [Online]. Available: [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE\\_Branchenzahlen/\\$file/13-11-11\\_Biogas%20Branchenzahlen\\_2013-2014.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/13-11-11_Biogas%20Branchenzahlen_2013-2014.pdf). [Zugriff am 1 November 2013].
- [12] Gülzower Fachgespräche, „Trockenfermentation - Evaluierung des Forschungs und Entwicklungsbedarf (Band 23),“ Gülzow, 2004.
- [13] Office Star, „ZIB,“ [Online]. Available:  
<http://www.google.de/imgres?sa=X&biw=1600&bih=778&tbm=isch&tbnid=-aZw0Hwu700bFM%3A&imgrefurl=http%3A%2F%2Fzib-service.officestar.de%2Fartikel/details%2Fstandard%2FEIS-813157%2Fpolyethylen-auffangwanne-mit-4-sockelfueenmit-pe--lochblech.html&docid=TyI1PBExv>. [Zugriff am 25 Januar 2014].

## 1 Einleitung

Biomasse ist der wichtigste und vielseitigste erneuerbare Energieträger in Deutschland. Sie wird in fester, flüssiger oder gasförmiger Form zur Strom- und Wärmeerzeugung und zur Herstellung von Biokraftstoffen genutzt. Die häufigste Verwendung, bei der Stromerzeugung aus Biomasse, findet Biomasse in Biogasanlagen. Durch anaerobe Methangärung entsteht Gas, das zu 65 Vol.-% aus Methan  $\text{CH}_4$ , zu 35 Vol.-% aus  $\text{CO}_2$  besteht und auch Spurengase enthält.

Biogas wurde im Jahr 2013 deutschlandweit in 7720 Biogasanlagen erzeugt [1]. Für 2014 wird ein Ausbau auf ca. 7900 Biogasanlagen erwartet. Die weitaus größte Anzahl der Biogasanlagen arbeitet nach dem Prinzip der Nassfermentation. Hier macht der hohe Wasseranteil das Substrat rühr- und fließfähig. In zyklischen Zeitabständen wird Biogasrohstoff zugeführt und vergorenes Substrat abgeführt. Durch die ständige Durchmischung können die an der Fermentation beteiligten Bakterien den Biogasrohstoff leichter zersetzen.

Bei der Trockenfermentation im Batch-Verfahren ist das Durchmischen und Zerkleinern der Biomasse nicht nötig, da das Substrat wie in einem Haufwerk aufgeschüttet wird. Folglich entfallen einige der mechanischen Komponenten, die bei einer Nassvergärung notwendig sind. Die gesamte Anlagentechnik einer Trockenfermentations-Biogasanlage ist daher einfach und somit zuverlässig, außerdem kostengünstiger als bei der Nassfermentation. Durch den diskontinuierlichen Betrieb der Anlage werden auch keine Komponenten für das Ein- und Ausbringen von Substrat bzw. von Gärresten benötigt. Der Fermenter wird einmal befüllt und für die Dauer des Gärprozesses nicht wieder geöffnet. Nach einer bestimmten Verweilzeit wird der Fermenter manuell entleert und der Vorgang beginnt von Neuem.

## 2 Grundlagen der Feststofffermentation

Biologisch betrachtet ist eine Klassifizierung der Verfahren in Nass- und Feststofffermentation nicht möglich, denn bei beiden Verfahren leben die an den Abbauvorgängen beteiligten Bakterien in einem flüssigen Medium [2].

Aus verfahrenstechnischer Sicht lässt sich eine Klassifizierung jedoch vornehmen. Bei der Nassfermentation werden nur Biogasrohstoffe eingesetzt, die im Fermenter pumpbar sind oder mittels mechanischer, hydraulischer oder pneumatischer Anlagen homogenisiert werden. Hierbei ist der Einsatz von festem, strukturreichem Substrat – beispielsweise von nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo) – nur eingeschränkt möglich [2]. Für die Feststofffermentation, auch Trockenfermentation genannt, können im Gegensatz zur Nassfermentation auch NaWaRo-Biogasrohstoffe eingesetzt werden. Im Ausgangszustand sind die Substrate nicht pump- oder fließfähig, weisen hingegen eine stichfeste Konsistenz auf.

### 2.1 Entstehung von Biogas

Biogas entsteht in einem biologischen Prozess unter Sauerstoffabschluss. Dieser Prozess ist in der Natur weit verbreitet. In Mooren, auf dem Grund von Seen, in Güllegruben oder im Pansen von Wiederkäuern findet dieser Prozess unter anaeroben Bedingungen, also ohne Sauerstoff statt. Eine Reihe von Mikroorganismen wandelt das organische Material in Biogas und Wärme um. Das Biogas besteht im Wesentlichen aus  $\text{CH}_4$  (50–75 Vol.-%) und  $\text{CO}_2$  (25–50 Vol.-%). Ferner entstehen noch geringe Mengen an Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ), Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und an Spurengasen. Die Zusammensetzung des Biogases wird vorrangig vom Einsatzstoff, vom Fermentationsverfahren und von verschiedenen technischen Ausführungen bestimmt.

Der Abbau von organischen Stoffen, zum Beispiel von NaWaRo, erfolgt in einer Verkettung von vier aufeinanderfolgenden Stufen. An den einzelnen Stufen der Fermentation sind jeweils verschiedene Gruppen von Mikroorganismen beteiligt. Jede Gruppe verwertet dabei die Produkte der zuvor geschalteten Stufen [3].

### 2.1.1 Hydrolyse

In einem ersten Schritt, der Hydrolyse, bauen Bakterien die komplexen Verbindungen des Ausgangsmaterials bzw. des Substrats – Fette, Proteine und Kohlenhydrate – durch hydrolytische und fermentative Prozesse ab. Es werden dabei Monosacharide, Aminosäuren, kurzkettige Peptide, langkettige Fettsäuren und Glycerin gebildet. Die folgende Tabelle gibt die wichtigsten Stoffumsetzungen wieder [3].

*Tabelle 1: Stoffumsetzung in der hydrolytischen Phase [1]*

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Kohlenhydrate	Clostridium spp.	Monosacharide
Proteine	Bacillus spp.	Aminosäuren
Fette	Pseudomonas spp.	kurzkettige Peptide
		langkettige Fettsäuren
		Glycerin

Die in Abbildung 1 beschriebene Prozesskette läuft zeitlich und räumlich parallel ab. Daher wird die Geschwindigkeit des Gesamtabbaus vom langsamsten Glied in der Kette bestimmt. Bei Biogasanlagen ist die Hydrolyse der langsamste Prozess.

### 2.1.2 Acidogenese/Versäuerung

Wie zuvor beschrieben, werden die gebildeten Zwischenprodukte der Hydrolyse in der nächsten Phase, der Acidogenese, weiterverarbeitet. Andere Begriffe für Acidogenese sind „Versäuerung“ und „Säurebildung“. Durch fermentative, also säurebildende Bakterien werden Monosacharide, Aminosäuren, kurzkettige Peptide, langkettige Fettsäuren und Glycerin zu niederen Fettsäuren sowie Kohlendioxid und Wasserstoff umgewandelt [4]. Aufgrund der Versäuerung sinkt der pH-Wert.

Tabelle 2: Stoffumsetzung in der Acidogenese [1]

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
Monosacharide Aminosäuren kurzkettige Peptide langkettige Fettsäuren Glyzerin	Clostridium spp. Bacteroides spp. Butyrivibrio spp.	flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat), Aldehyde, Alkohole, Ketone, Ammoniak, Kohlendioxid, Wasserstoff

Das Verhältnis der in dieser Phase entstehenden Produkte zueinander ist vom Wasserstoffpartialdruck, also von der Konzentration an elementarem Wasserstoff abhängig. Je niedriger dieser ist, desto höher ist der Anteil an entstehendem Acetat.

### 2.1.3 Acetogenese

In der darauf folgenden Acetogenese produzieren Essigsäurebakterien, also acetogene Bakterien, die benötigten Ausgangsprodukte für die Methanbildung. Es wird bei diesem Vorgang Acetat (Essigsäure), Kohlendioxid und Wasserstoff gebildet.

Tabelle 3: Stoffumsetzung in der acetogenen Phase [1]

Substrate	Beispiele Mikroorganismen	Produkte
flüchtige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat) Aldehyde Alkohole Ketone	Clostridium spp. Eubacterium spp.	Acetat (Essigsäure) Kohlendioxid Wasserstoff

## 2.1.4 Methanogenese

Im letzten Schritt der Biogasbildung erzeugen methanogene Bakterien das Methan. Die acetogenen Bakterien werden zwar von ihrem eigenen Stoffwechselprodukt, dem Wasserstoff, in ihrer Aktivität gehemmt, aber die methanogenen Bakterien benötigen den Wasserstoff, um daraus Biogas zu erzeugen. Somit können die acetogenen Bakterien ungehemmt arbeiten, denn Acetogene und methanogene Bakterien bilden eine enge Symbiose.

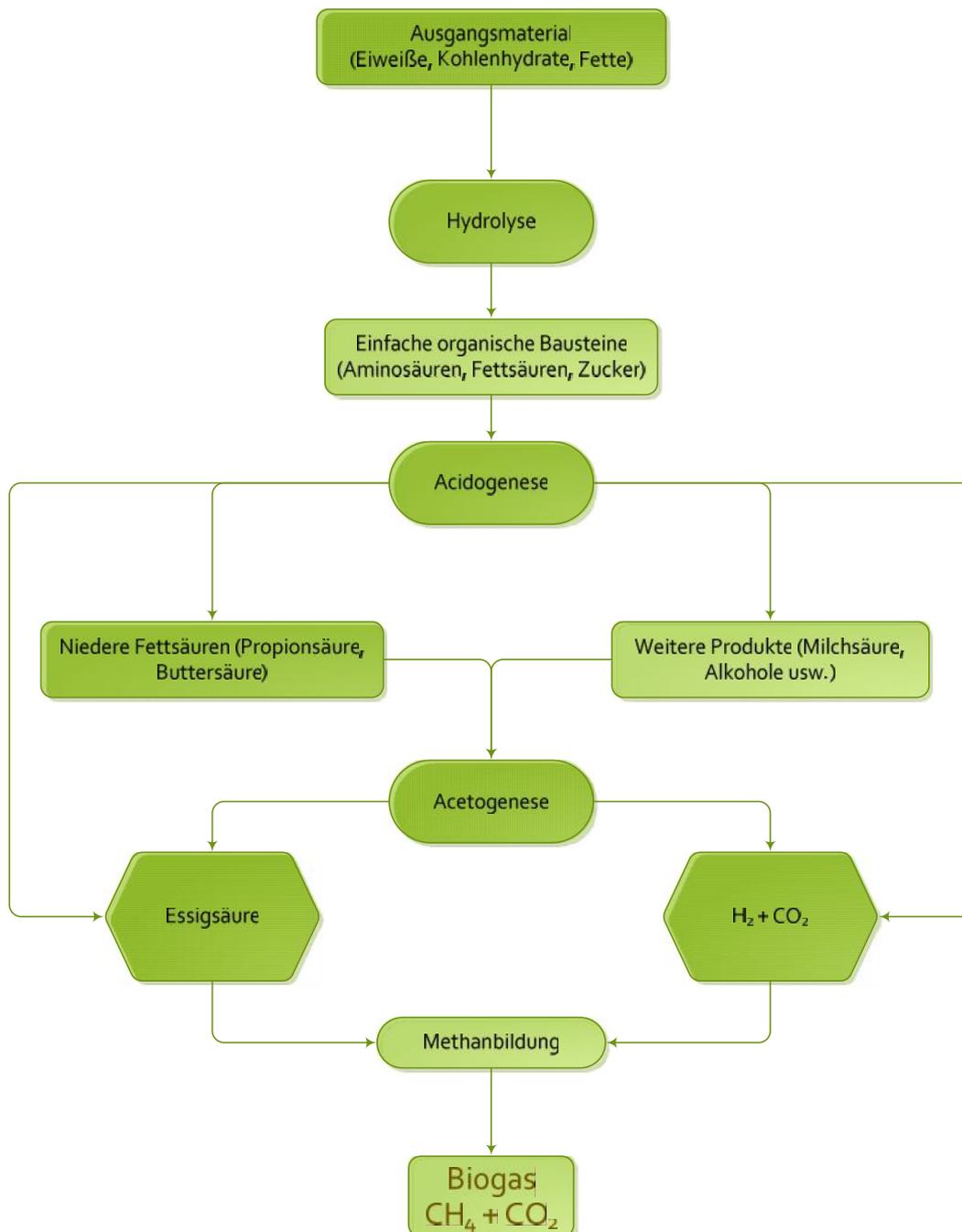


Abbildung 1: Stufen der Biogasentstehung [1]

## 2.2 Milieubedingungen

Damit die an der Biogasentstehung beteiligten Bakterien gut arbeiten, brauchen sie bestimmte Milieubedingungen bzw. Lebensbedingungen. Im Folgenden werden die wichtigsten Kriterien erläutert:

### 2.2.1 Temperatur

Methanbakterien sind in einem großen Temperaturbereich arbeitsfähig. Der Arbeitsbereich liegt zwischen 0 °C und 70 °C. Bei darüberliegenden Temperaturen sterben sie ab; bei Minusgraden hingegen stellen sie ihre Tätigkeit ein, überleben jedoch.

Im Allgemeinen laufen Stoffwechselforgänge umso schneller ab, je höher die Temperaturen sind (Abbildung 2). Deshalb verkürzen sich die Ausfallzeiten bei hohen Temperaturen. Allerdings sinkt der Methangehalt bei steigender Temperatur. Das hängt damit zusammen, dass bei hohen Temperaturen das im Substrat gelöste Kohlendioxid vermehrt austritt und sich mit dem Biogas vermischt. Dadurch nimmt der relative Anteil des Methans ab.

Des Weiteren sollten Temperaturschwankungen im laufenden Betrieb der Biogasanlage vermieden werden. Es ist davon auszugehen, dass Schwankungen  $>2$  K/d zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Biogasprozesses führen [5].

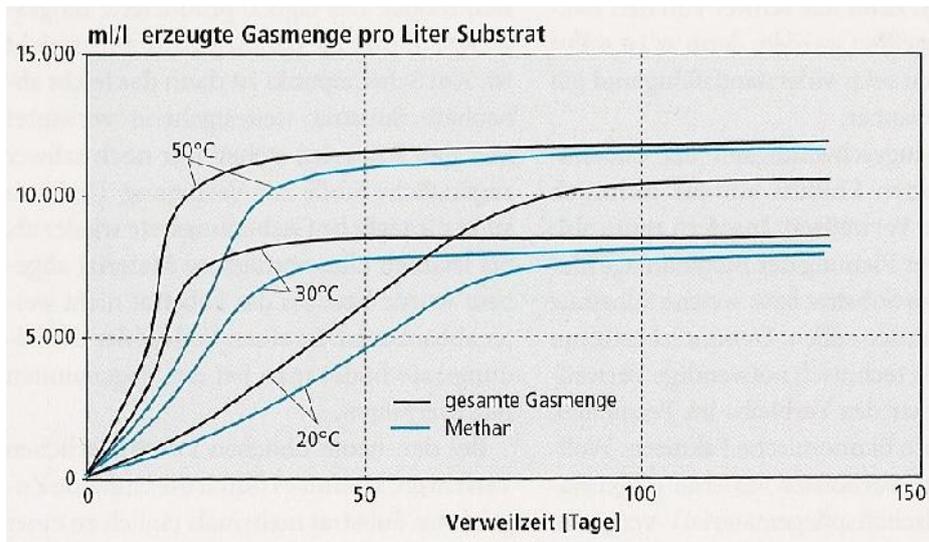


Abbildung 2: Einfluss der Faultemperatur und der Verweilzeit auf Menge und Zusammensetzung des erzeugten Gases [2]

Man unterscheidet drei typische Temperaturbereiche, in denen sich Bakterienstämme wohlfühlen. Dabei wird zwischen psychrophilen, mesophilen und thermophilen Mikroorganismen differenziert:

- Bei psychrophilen Mikroorganismen liegt das Temperaturoptimum unter 25 °C. Somit würde eine Anlage in diesem Temperaturbereich keine externe Wärmequelle benötigen. Da aber bei diesen Temperaturen die Abbauleistung und Gasproduktion sehr langsam verlaufen, ist ein wirtschaftlicher Betrieb in diesem Temperaturbereich nicht möglich.
- Mesophile Mikroorganismen machen den größten Teil der an der Biogasentstehung beteiligten Bakterien aus. Ihr Wachstumsoptimum liegt zwischen 25 °C und 45 °C. Anlagen, die im mesophilen Bereich arbeiten, erzeugen in der Praxis eine relativ hohe Gasausbeute bei guter Prozessstabilität. Daher werden die meisten Anlagen im mesophilen Bereich zwischen 38 °C und 42 °C betrieben.
- Thermophile Mikroorganismen arbeiten bei Temperaturen über 45 °C am besten. Aufgrund der hohen Wärmeverluste besteht für Anlagen, die im thermophilen Bereich arbeiten, nur geringe Nachfrage.

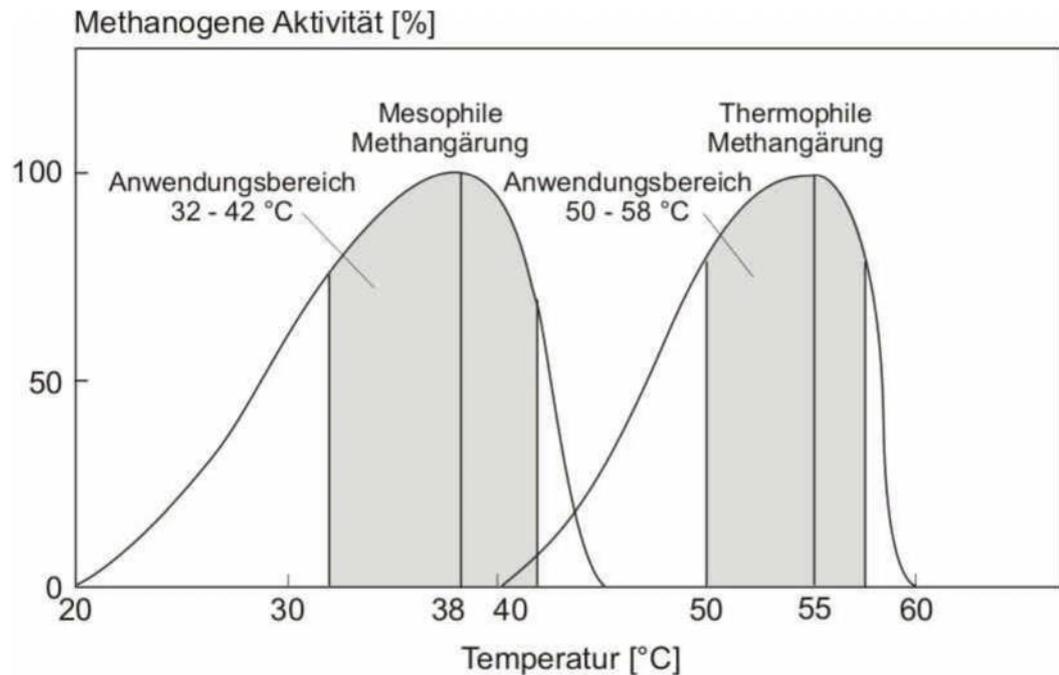


Abbildung 3: Einfluss der Temperatur auf die Bakterienaktivität [3]

### 2.2.2 Feuchtes Milieu

Am anaeroben Abbau von organischen Substanzen sind viele Mikroorganismen beteiligt, die nur im feuchten Milieu überleben und nur gelöste Stoffe abbauen. Bei der Feststoffvergärung wird daher für eine ausreichende Befeuchtung entweder Perkolat über das Substrat versprüht oder das Substrat wird durch Vermischen feucht gehalten [5].

### 2.2.3 Luftabschluss

Die Methanbakterien sind strikt anaerobe Bakterien. Das bedeutet, dass sie zwingend auf eine sauerstofffreie Lebensumgebung angewiesen sind, um dauerhaft überleben zu können. In der Praxis gelangt dennoch Sauerstoff in den Fermenter, zum Beispiel beim Wechsel des Substrats. Doch aerobe Bakterien verbrauchen den Sauerstoff, bevor eine schädigende Wirkung für die Methanbakterien eintritt.

#### 2.2.4 Lichtabschluss

Um die Bakterien vor Licht zu schützen, wird der Fermenter aus blickdichtem Material gefertigt. Licht ist zwar nicht in der Lage die Bakterien abzutöten, hemmt jedoch den Prozess der Gasgewinnung.

#### 2.2.5 pH-Wert

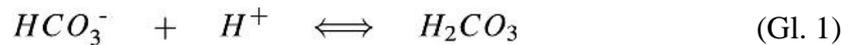
Ebenso wie die Temperatur beeinflusst auch der pH-Wert die Gasbildung. Die an den verschiedenen Prozessphasen beteiligten Mikroorganismen haben unterschiedliche pH-Wert-Optima. So liegt das Optimum für die Hydrolyse und Säurebildung bei pH-Werten von 4,5 bis 6,3 und für die Essigsäure- und Methanbildung bei pH-Werten von 6,5 bis 8 [5]. Wenn der Gärprozess in einem einstufigen Fermenter stattfindet, muss der letztgenannte pH-Wert eingehalten werden; bei mehrstufigen Verfahren hingegen wird mit den jeweils optimalen pH-Werten für Hydrolyse und Methanbildung gearbeitet.

Innerhalb des Systems stellt sich der pH-Wert automatisch durch die alkalischen und sauren Stoffwechselprodukte ein, die während des Stoffabbaus gebildet werden. Dieses sich selbst regulierende Gleichgewicht ist sehr empfindlich und kann beispielsweise durch zu hohe Substratzufuhr in nur kurzer Zeit so stark gestört werden, dass das zum „Umkippen“ des Fermenters führt.

Aufgrund seiner Trägheit ist der pH-Wert allerdings nur bedingt für die Anlagensteuerung verwendbar. Wichtiger für die Prozesssteuerung ist die Pufferkapazität, mit der die Fähigkeit des Substrats, den pH-Wert abzupuffern, beschrieben wird.

#### 2.2.6 Pufferkapazität

Die Pufferkapazität gibt Aufschluss darüber, in welchem Maß der pH-Wert abgepuffert werden kann. Für die Pufferwirkung sind vorwiegend das Hydrogencarbonat-Ion ( $\text{HCO}_3^-$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) verantwortlich:



*Hydrogencarbonat – Ion + Wasserstoff – Ion  $\rightleftharpoons$  Kohlensäure*



*Ammoniak + Wasserstoff – Ion  $\rightleftharpoons$  Ammonium*

Bei steigender  $\text{H}^+$ -Konzentration können die Substrate in begrenztem Umfang die  $\text{H}^+$ -Ionen an sich binden. Somit bleibt der pH-Wert in einem bestimmten Bereich konstant. Sind allerdings die Pufferkapazitäten ausgeschöpft, fällt oder steigt der pH-Wert. Folglich liefert die Pufferkapazität eine Prognosemöglichkeit, ob sich der pH-Wert verändern wird. Die reine Messung des pH-Werts kann dies nicht und hinkt den Geschehnissen hinterher. Ermittelt wird die Pufferkapazität durch eine Titration mit Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) auf  $\text{pH} = 4$  [5].

In der Regel neigt der anaerobe Faulprozess zur Versäuerung; infolgedessen sinkt der pH-Wert. Um dem entgegenzuwirken, gibt es verschiedene Möglichkeiten: Zunächst sollte die Substratzufuhr des Fermenters gestoppt bzw. gedrosselt werden. Als weitere Maßnahme kann dem Fermenter unbelastetes Material – zum Beispiel in Form von Gärresten – beigemischt werden; vorher muss jedoch eine Kontrolle des pH-Werts erfolgen. Als letzte Möglichkeit können puffernde Substanzen in dosierter Menge zugeführt werden. Am besten eignet sich hierfür Natriumhydrogencarbonat, da es keine störenden Ablagerungen bildet und ohne Hitzeentwicklung reagiert [2].

### 2.2.7 Nährstoffversorgung

Die Bakterien des anaeroben Abbaus benötigen für ihr eigenes Wachstum Makro- und Mikronährstoffe sowie Vitamine. Eine ausreichende Versorgung mit diesen Komponenten fördert die Wachstumsgeschwindigkeit und die Aktivität der Mikroorganismen. Wie durch eine optimale Versorgung der Bakterien die Anlagenleistung gesteigert werden kann, zeigt Abbildung 4.

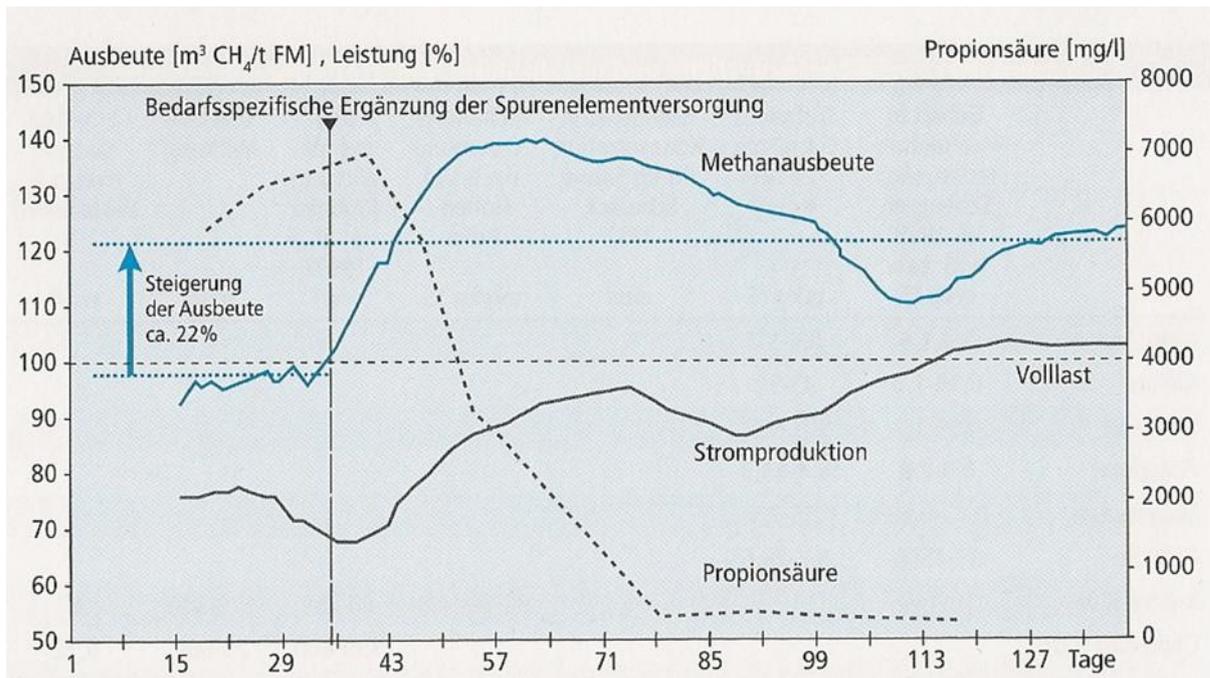


Abbildung 4: Entwicklung der Anlagenleistung, der Propionsäuregehalte und der Methanausbeute während der bedarfsgerechten Ergänzung von Spurenelementen [2]

Es existieren arttypische Minimal- und Maximalkonzentrationen, deren Festlegung aufgrund der verschiedenartigen Kulturen schwierig ist. Um die Anlage wirtschaftlich zu betreiben, ist eine hohe Methanausbeute mittels der eingesetzten Substrate sehr wichtig, denn die Menge des entstehenden Methans ergibt sich letztendlich aus dem eingesetzten Substrat und dessen Anteilen an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten. Diese Faktoren beeinflussen den spezifischen Nährstoffbedarf.

Das richtige Verhältnis von Makro- und Mikronährstoffen ist entscheidend für einen stabilen Prozessverlauf. Kohlenstoff und Stickstoff sind dabei die am meisten benötigten Nährstoffe. Entscheidend ist hierbei ein ausgewogenes C/N-Verhältnis des eingesetzten Substrats. Bei zu hohem Verhältnis – viel C und wenig N – kann der vorhandene Kohlenstoff nicht vollständig umgesetzt werden und mögliches Methanpotenzial wird somit nicht genutzt. Ist hingegen das Verhältnis zu niedrig, kommt es aufgrund des Stickstoffüberschusses zur Bildung von Ammoniak  $\text{NH}_3$ , das schon in kleinen Mengen zu erheblichen Prozessstörungen führt. Um einen ungestörten Prozessverlauf zu gewährleisten, muss das C/N-Verhältnis im Bereich 10–30 liegen ( $C : N = 10 - 30 : 1$ ) [2].

Zusätzlich zu Kohlenstoff und Stickstoff sind Phosphor und Schwefel essenzielle Nährstoffe. Idealerweise sollte das C:N:P:S-Verhältnis im Fermenter bei 600:15:5:3 liegen [4].

Ergänzend zu den Makronährstoffen müssen auch einzelne Spurenelemente für die Mikroorganismen verfügbar sein. Als unabdingbar für den Biogasprozess gelten Nickel, Kobalt, Zink, Molybdän, Wolfram, Selen und Eisen. In Tabelle 4 sind günstige Konzentrationen für Spurenelemente aufgelistet. Es zeigt sich jedoch, dass diesbezüglich die Schwankungsbreite der einzelnen Literaturquellen sehr groß ist.

Tabelle 4: Günstige Spurenelementkonzentrationen [2]

Spurenelemente	Konzentrationsbereich [mg/l]
Co	0,003-0,06
Ni	0,005-0,5
Se	0,08
Mo	0,005-0,05
Fe	1,0 - 10

### 2.2.8 Hemmstoffe

Der Prozessverlauf bzw. die Gasproduktion kann durch eine Reihe von Substanzen gehemmt oder völlig unterdrückt werden. Es wird zwischen Hemmstoffen, die über das Substrat in den Fermenter gelangen, und solchen, die als Zwischenprodukt bei den einzelnen Abbauschritten entstehen, unterschieden. Grundsätzlich kann jeder Inhaltsstoff eines Substrats in zu hoher Konzentration eine schädigende Wirkung auf die Bakterien erzeugen. Entscheidend ist die Konzentration, in der Hemmstoffe auftreten. Aufgrund der Vielzahl an Substanzen werden im Folgenden lediglich die wichtigsten aufgezählt [4]:

- Sauerstoff O:

Meist gelangt Sauerstoff durch unzureichend aufbereitetes Substrat in den Fermenter. In einigen Fällen ist eine Undichtigkeit des Fermenters für den Sauerstoffeintritt verantwortlich. Da methanogene Bakterien strenge Anaerobier sind, treten hier die größten Schädigungen auf (Hemmkonzentration  $> 0,1\text{mg/l}$ ) [4].

- Schwefelwasserstoff  $H_2S$ :  
Schwefelwasserstoff ist ein Produkt des Gärprozesses und entsteht dadurch praktisch immer. Tritt  $H_2S$  in nicht dissoziierter, gelöster Form auf, kommt es schon bei Konzentrationen von ca. 50 mg/l zu Zellschäden. Mit sinkendem pH-Wert steigt die Konzentration an freiem  $H_2S$ , dadurch steigt die Gefahr einer Hemmung. Um einer steigenden Schwefelwasserstoffkonzentration entgegenzuwirken, kann eine Fällung mittels Eisen-Ionen erfolgen [4].
- Desinfektionsmittel und Antibiotika:  
Insbesondere bei hohen Konzentrationen können Desinfektionsmittel und Antibiotika den Faulprozess hemmen oder gar zum Erliegen bringen. Meist stammen diese Substanzen aus der Viehhaltung, wenn beispielsweise flächendeckend Antibiotika bei Hühnern eingesetzt werden [4].
- Ammoniak/Ammonium:  
Unter ungünstigen Bedingungen bildet sich aus Ammonium ( $NH_4^+$ ) schädliches Ammoniak ( $NH_3$ ). Hohe Temperaturen und hohe pH-Werte begünstigen die Bildung dieses Gases. Ab einer Konzentration von 3500 mg/l wirkt Ammoniak auf den Faulprozess stark hemmend [4].
- Schwermetalle:  
Schwermetalle sind nur dann schädlich, wenn sie in gelöster Form vorliegen. Schwermetall-Ionen beeinflussen den Stoffwechsel der Bakterien und hemmen diese in ihrer Aktivität bei folgenden Konzentrationen: Kupfer (Cu) > 40mg/l; Zink (Zn) > 400mg/l; Chrom (Cr) > 130mg/l; Nickel (Ni) > 10mg/l; Blei (Pb) > 340mg/l [3]. Schwermetalle können durch Sulfide gefällt und neutralisiert werden [4].

- Organische Säuren:

Auch die beim anaeroben Abbau entstehenden Säuren können den Prozess hemmen. Die Summe der organischen Säuren sollte den Wert von 400 mg H<sub>ac</sub>-Eq/l (Essigsäureäquivalent) nicht übersteigen. Als Gegenmaßnahme ist es empfehlenswert, die Substratzufuhr zu drosseln oder sogar zu stoppen, denn dadurch wird die Bildung von zusätzlicher Säure unterbunden und die methanogenen Bakterien können den Säureüberschuss abbauen [4].

### 2.3 Gasproduktion bei diskontinuierlichen Verfahren

Da bei diskontinuierlichen Verfahren die Fermenter zu bestimmten Intervallen mit Substrat befüllt werden, ist auch die Gasproduktion diskontinuierlich. Für ein nachgeschaltetes Blockheizkraftwerk (BHKW) ist aber eine kontinuierliche Gaszufuhr nötig. Um diesem Problem entgegenzuwirken, können mehrere Fermenter zeitversetzt gestartet werden. Ist also bei einem Fermenter das Biogaspotenzial des Substrats erschöpft, wird parallel ein neuer Fermenter gestartet (Abbildung 5). Dadurch ergibt sich eine konstante Gasproduktion.

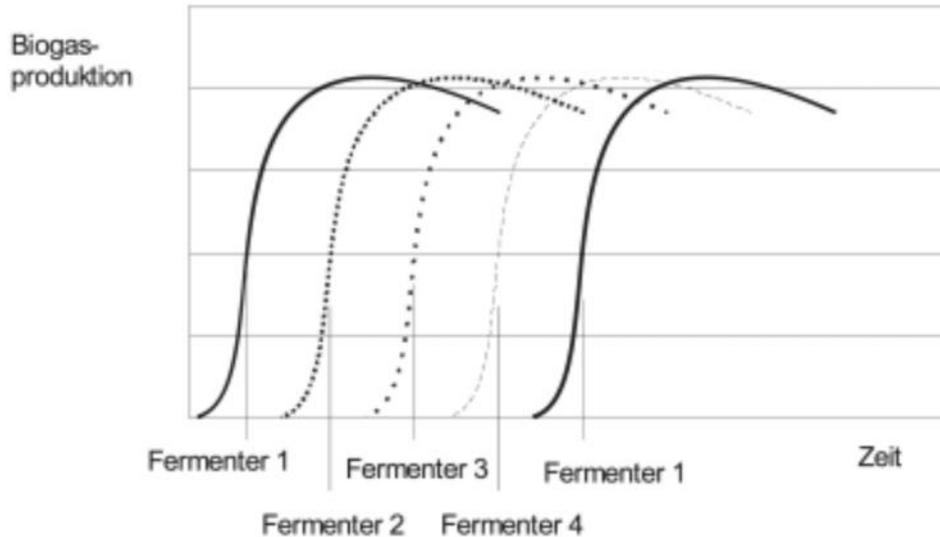


Abbildung 5: Zeitliche Gasproduktion beim Parallelbetrieb mehrerer Batch-Fermenter [3]

Alternativ kann das Biogas zwischengespeichert werden. Hierfür werden von einigen Herstellern spezielle Gasspeicherbehälter angeboten die in Gebäuden aufgestellt werden.



Abbildung 6: Biogasspeicher [4]

#### 2.4 Vergütung im EEG 2012

Im Hinblick auf die Einspeisevergütung von Strom ist die Feststofffermentation sehr interessant, denn bei Anlagen mit einer Leistung von weniger als 150 kW beträgt die Grundvergütung bei Inbetriebnahme 2013 14,01 Cent/kWh. Zusätzlich können je nach Rohstoffklasse 6–8 Cent/kWh mehr anfallen. Anlagen, die mehr als 90 Masse-% Bioabfälle gemäß der Bioabfallverordnung vergären, werden mit 16 Cent/kWh vergütet. Aufgrund der geringen Biogasproduktion und der fehlenden Verstromung kommt, für die Laborbiogasanlage, keine Förderung nach dem EEG in Frage.

## 3 Fermenter-Bauarten

Grundlegend gibt es zwei unterschiedliche Verfahren, wie ein Fermenter betrieben werden kann. Kontinuierliche Anlagen führen dem Fermenter in definierten Zeitabständen oder fortlaufend Substrat zu. Bei diskontinuierlichen Verfahren hingegen wird der Fermenter einmalig komplett mit Substrat gefüllt und verschlossen. Im Folgenden werden die einzelnen Varianten erläutert:

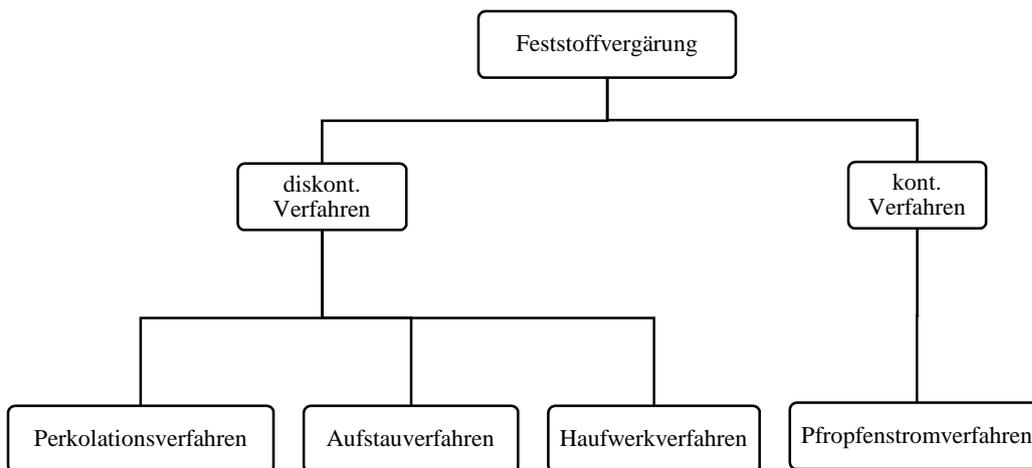


Abbildung 7: Verfahrensvarianten der Feststofffermentation

### 3.1 Diskontinuierliche Verfahren

#### 3.1.1 Perkolationsverfahren

Beim Perkolationsverfahren kommen in der Regel container- oder garagenförmige Fermenter zum Einsatz. Zum Befüllen und Entleeren sind stirnseitig Öffnungen angebracht, die luftdicht verschlossen werden können. Ist der Fermenter befüllt, wird Perkolat über das Substrat versprüht und durchrieselt das Gärgut. Neben anderen Herstellern bietet die Firma BIOFerm™ USA Inc.-Anlagen an, die nach diesem Verfahren arbeiten. Des Weiteren wird in diesem Zusammenhang auch auf das BEKON-Trockenfermentationsverfahren® verwiesen [3].

### 3.1.2 Aufstauverfahren

Aufstauverfahren benötigen im Gegensatz zu den Perkolationsverfahren keine Berieselung des Substrats. Das Substrat wird stattdessen periodisch mit Prozessflüssigkeit überstaut. Bei diesem Verfahren ist es von Vorteil, dass es zu einer gleichmäßigen Verteilung des Perkolats kommt, denn dadurch entsteht keine Inhomogenität bezüglich des Faulgrads im Fermenter. Es besteht jedoch die Gefahr, dass das Gärgut aufschwimmt, weshalb spezielle Gitter auf dem Substrathaufen befestigt werden müssen, um die Biomasse am Aufschwimmen zu hindern [3].

### 3.1.3 Haufwerkverfahren

Bei diesem Verfahren erfolgt die Vergärung ohne Prozesswasser. Daher wird das Gärgut vor dem Befüllen des Fermenters mit bereits ausgefaulten Gärrückständen oder mit gelagertem Festmist gründlich vermischt. Dadurch wird das Substrat angeimpft und es werden auf diese Weise die nötigen Mikroorganismen bereitgestellt. Das Animpfverhältnis muss bei dieser Methode mindestens 1:1 betragen, um eine Übersäuerung zu vermeiden [3].

## 3.2 Kontinuierliche Verfahren

Kontinuierlich betriebenen Anlagen arbeitet mit einem in Abbildung 8 dargestellten liegenden oder stehenden Pfropfenstromreaktor, der mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch durchmischt wird. Die Verweilzeit des Substrats im Fermenter kann exakt gesteuert werden. Aber aufgrund der aufwendigen Rührtechnik sind die Kosten dieser Fermenterbauart relativ hoch; somit ist dieses Verfahren in der Praxis nicht häufig anzutreffen. Dieses Verfahren wird von der Firma KOMPOGAS AG in Form eines liegenden Fermenters vertrieben [2].



Abbildung 8: Pfropfenstromreaktor der Firma Axpo Kompogas AG® [5]

## 4 Konzeption

Die Grundlage für die in dieser Arbeit konstruierte Laborbiogasanlage bildet der bei den Gülzower Fachgesprächen dokumentierte Festbettfermenter [8]. Bei diesem Festbettfermenter wird das Perkolationsverfahren angewandt. Dabei wird das Substrat als Feststoffschüttung in den Fermenter eingebracht und mit Prozessflüssigkeit (Perkolat) berieselt. Das Perkolat durchläuft das Substrat und sammelt sich am Fermenterboden, um anschließend wieder zurück in den Perkolatbehälter zu laufen. Somit ist der Perkolatkreislauf geschlossen.

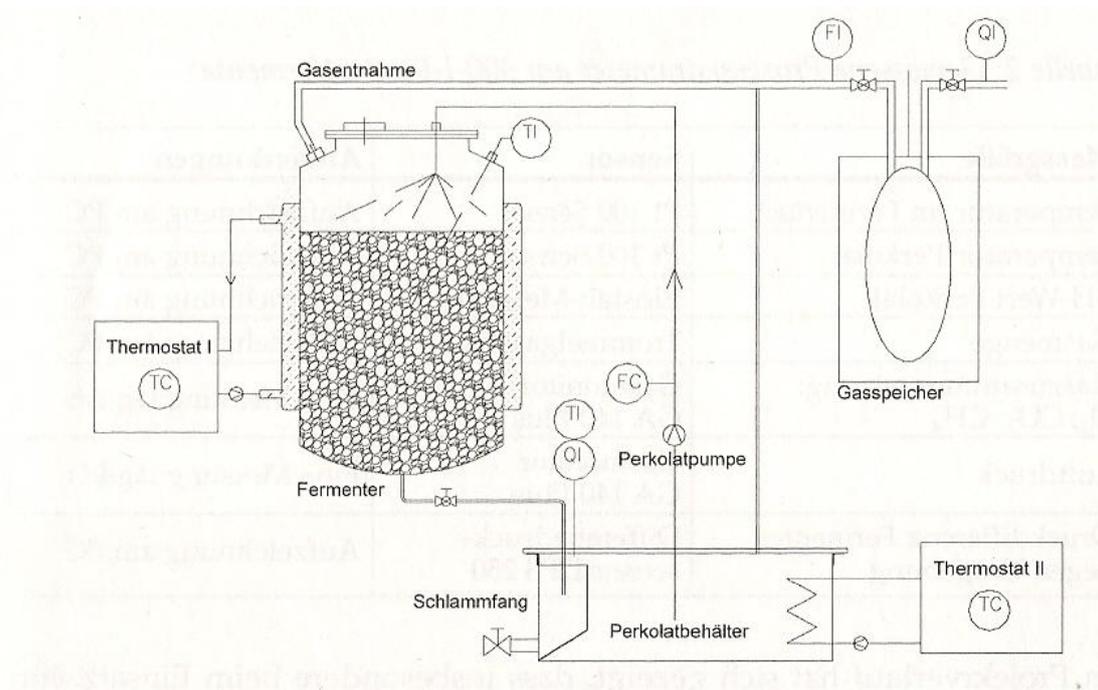


Abbildung 9: Festbettfermenter [6]

Sowohl der Perkolatbehälter als auch der Fermenter verfügen über eine externe Beheizung. Über Entgasungsleitungen wird das erzeugte Biogas abgeleitet und in einem Gasspeicher gelagert. Um den Prozess zu steuern, werden diverse Prozessparameter gemessen: Temperatur im Fermenter, Temperatur und pH-Wert des Perkolats, Gasmenge und Gaszusammensetzung, Luftdruck sowie Druckdifferenz zwischen Fermenter und Umgebung.

## 4.1 Anforderungen

Zu Beginn wurden die Anforderungen an die Biogasanlage festgelegt. Nachfolgend sind diese aufgelistet:

### Anlagenbetrieb

- diskontinuierlicher Batch-Betrieb
- Eignung für anaerobe Feststofffermentation von Gras- oder Maissilage und NaWaRo
- regelbare Betriebstemperatur im Fermenter bei 40 – 45 °C
- Möglichkeit zur Temperaturmessung

### Bauweise

- einfache, robuste Bauweise
- leichte Bauweise
- hohe Dichtigkeit
- Druckluftanschluss für aerobe Vor- und Nachbehandlung des Substrats
- Transportierbarkeit
- Ausmaße gemäß den Normen einer Europalette
- Einsetzbarkeit in wirtschaftlich unterentwickelten Ländern

### Material

- alleiniger Einsatz von Kunststoffen (bevorzugt PP und PE; kein PVC, da es nicht UV-Beständig ist und mit der Zeit versprödet)
- Verwendung vorhandener Teile und Module aus der Abwasser- und Kanaltechnik
- Resistenz gegen organische Säuren

### Fermenter

- 50–60 l Substratvolumen
- externe Heizung für den Fermenter
- gute Entwässerung des Substrats

### Perkolat

- externe Heizung für das Perkolat
- Substrat-Perkolat-Verhältnis  $> 1$ ,  $\tau = \frac{\text{Perkolattankvolumen [l.]}}{\text{Fermentervolumen [l.]}}$
- variable und zeitgesteuerte Perkolatpumpe
- Entnahmemöglichkeit von Perkolat während des Betriebs

### Biogas

- Gasspeicher
- Entgasungsschläuche für den Fermenter und den Perkolattank
- Kondensatfalle
- Druckmessung

## 4.2 Sicherheit

Unfälle mit Biogasanlagen gibt es immer wieder. Es kommt zu Verpuffungen, Bränden oder Vergiftungen durch austretendes Biogas. Teilweise sind schwere Mängel in der verbauten Sicherheitstechnik sowie eine unzureichende Umsetzung von sicherheitsrelevanten Anforderungen für solche Unfälle verantwortlich. Die Kommission für Anlagensicherheit hat hierzu 2009 das Merkblatt „Sicherheit in Biogasanlagen“ erstellt und mögliche Gefahrenquellen in einer Biogasanlage aufgezeigt. Im Folgenden werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, auszugsweise die relevanten Gefährdungen für die Laborbiogasanlage aufgelistet:

- Akute Gefahr besteht durch Ersticken oder Vergiften beim Einatmen von CO<sub>2</sub> oder H<sub>2</sub>S. Gefährlich hierbei ist, dass bei hohen H<sub>2</sub>S-Konzentrationen der faulige Geruch des Schwefelwasserstoffs nicht mehr wahrgenommen wird.
- Gefahr birgt auch die Verpuffung von explosivem Biogas-Luft-Gemisch. Die Explosionsgrenzen liegen zwischen 4,4 Vol.-% (untere Explosionsgrenze) und 16,5 Vol.-% (obere Explosionsgrenze) Methananteil in der Luft [9].
- Des Weiteren besteht Unfallgefahr durch elektrische und mechanische Einrichtungen, durch unter Druck stehende Leitungen und Behälter sowie durch Stürze von Leitern oder in Gruben.

Beim Betrieb einer Biogasanlage müssen daher diverse sicherheitsrelevante Gesetze und Vorschriften eingehalten werden. Maßgeblich regeln das Arbeitsschutzgesetz, die Betriebssicherheits-, die Biostoff- sowie die Gefahrstoffverordnung die Sicherheitsmaßnahmen einer Biogasanlage. Der Anlagenbetreiber ist zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung verpflichtet; er muss die nötigen Sicherheitsmaßnahmen einleiten und überwachen. Die folgende Auflistung gibt die wichtigsten Anforderungen an die Betreibung einer Laborbiogasanlage wieder:

### Technische Anforderungen [2]:

- Alle Anlagenkomponenten wie beispielsweise Dichtungen, Drucksicherungen, Materialqualität müssen gewissenhaft ausgelegt sein.
- Gasführende Leitungen und Armaturen müssen den Regeln der Technik entsprechen und ihre Dichtigkeit muss nachgewiesen sein. Des Weiteren müssen die eingesetzten

Materialien korrosions- und medienbeständig sein (nicht rostender Edelstahl 1.4571, Hochdruck-Polyethylen).

- Buntmetalle eignen sich nicht für den Einsatz in Biogasanlagen, da sie nicht biogasbeständig sind und korrodieren.
- Explosionsgeschützte elektrische und nicht elektrische Betriebsmittel in Außenbereichen müssen sachgemäß ausgeführt sein.
- Gaswarnanlagen in den gefährdeten Bereichen müssen korrekt installiert werden.
- Sicherheitsrelevante Anlagenparameter, zum Beispiel die Anzeige für den Fermenterfüllstand, müssen redundant überwacht werden.
- Das Not-Aus-System muss umfassend angelegt sein.
- Es muss ein vollständiger Potenzialausgleich der Anlage gegeben sein.
- Gasspeicher müssen den Anforderungen entsprechend gasdicht, druckfest, medien- und temperaturbeständig sein.
- Die Wärmedämmung des Fermenters muss zumindest normal entflammbar oder schwer entflammbar sein.
- Vor Gasverbrauchern müssen bauartzugelassene Flammendurchschlagsicherungen (Flammenfilter) montiert werden.

#### Organisatorische Anforderungen [2]:

- Vor Inbetriebnahme ist die Biogasanlage von einem Sachverständigen abzunehmen.
- Es muss eine Sicherheitsunterweisung der Beschäftigten erfolgen.
- Geeignete Warn- und Hinweisschilder auf Grundlage der Gefährdungsbeurteilung müssen installiert werden.
- Eine vollständige Dokumentation aller Bauteile nach Vorgabe der Maschinenrichtlinien muss vorliegen.

## 5 Konstruktiver Aufbau

Die in Kapitel 4 genannten Anforderungen an die Biogasanlagen müssen jetzt konstruktiv umgesetzt werden. Wenn möglich wurden Bauteile der HTI Gienger KG verbaut. Dank der Zusammenarbeit mit HTI Gienger wurden alle Bauteile aus dem HTI Programm kostenfrei zur Verfügung gestellt.

### 5.1 Schematischer Aufbau und Verfahrensfließbild

In Abbildung 10 ist der schematische Aufbau der Feststofffermentations-Laborbiogasanlage zu sehen. Der Fermenter ist stehend auf dem Perkolattank angeordnet; dadurch fließt das Perkolat, wenn es durch das Substrat gesickert ist, schwerkraftgetrieben zurück in den Perkolattank. Somit sind keine weiteren Pumpeinrichtungen nötig, um das Perkolat aus dem Fermenter zu leiten.

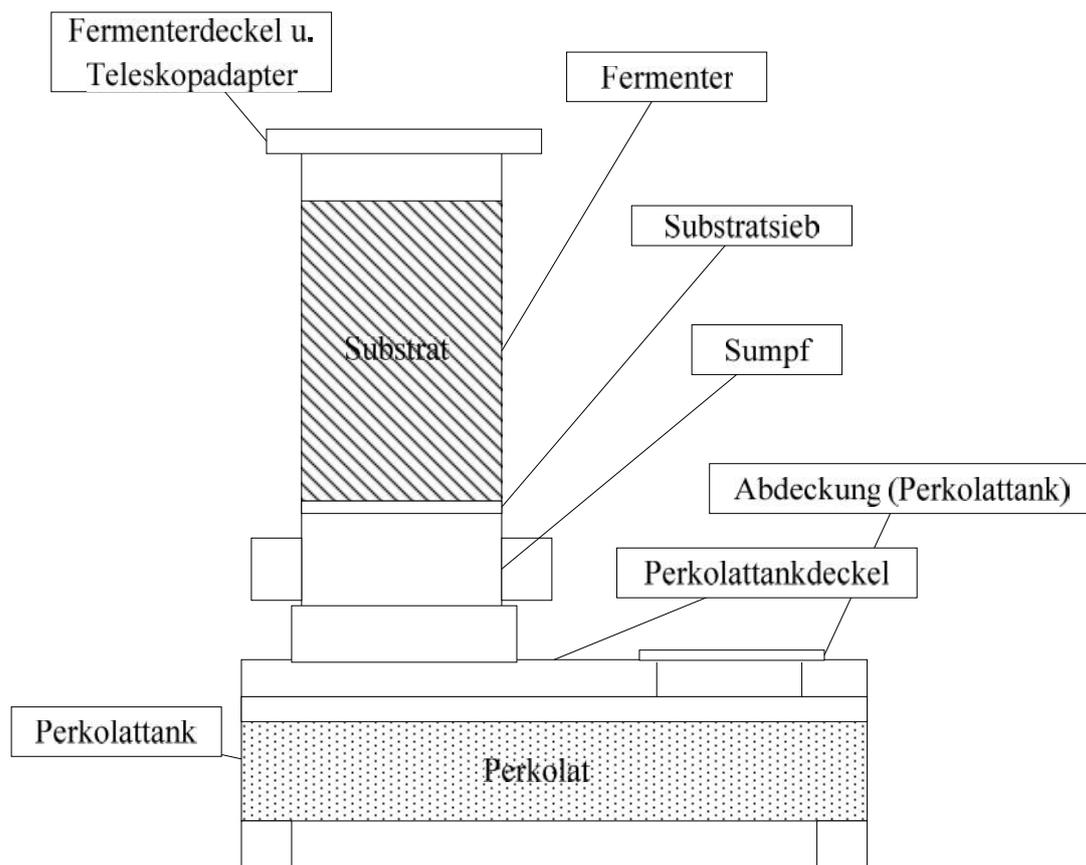


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der Laboranlage

Das Verfahrensfließbild in Abbildung 11 zeigt alle Stoffströme der konstruierten Laborbiogasanlage. Der Perkolatkreislauf ist grün eingezeichnet. Gespeist wird der Kreislauf von Pumpe 1 und das Perkolat wird von einer Vollkreis-Prall-Düse über dem Substrat verteilt. Nachdem es durch das Substrat gesickert ist, sammelt es sich am Boden des Sumpfes und läuft schwerkraftgetrieben zurück in den Perkolattank.

Für den Heizkreislauf wird eine Laborheizung mit eingebauter Pumpe 2 verwendet. An einem Thermostat kann die gewünschte Vorlauftemperatur eingestellt werden. Der Heizkreislauf speist zwei Wärmetauscher: zum einen die Heizwendel im Fermenter, zum anderen die Bodenheizung im Perkolattank.

Das Biogas wird oben am Fermenter und am Perkolattankdeckel abgeleitet und in einen Gasspeicher geführt. Um den Überdruck des Prozesses zu messen, ist ein Druckmessgerät vor dem Gasspeicher angebracht. Eine Temperaturaufzeichnung erfolgt an zwei Messstellen im Fermenter. Dabei sind die Messsonden so ausgelegt, dass die Kerntemperatur des Substrats gemessen werden kann.

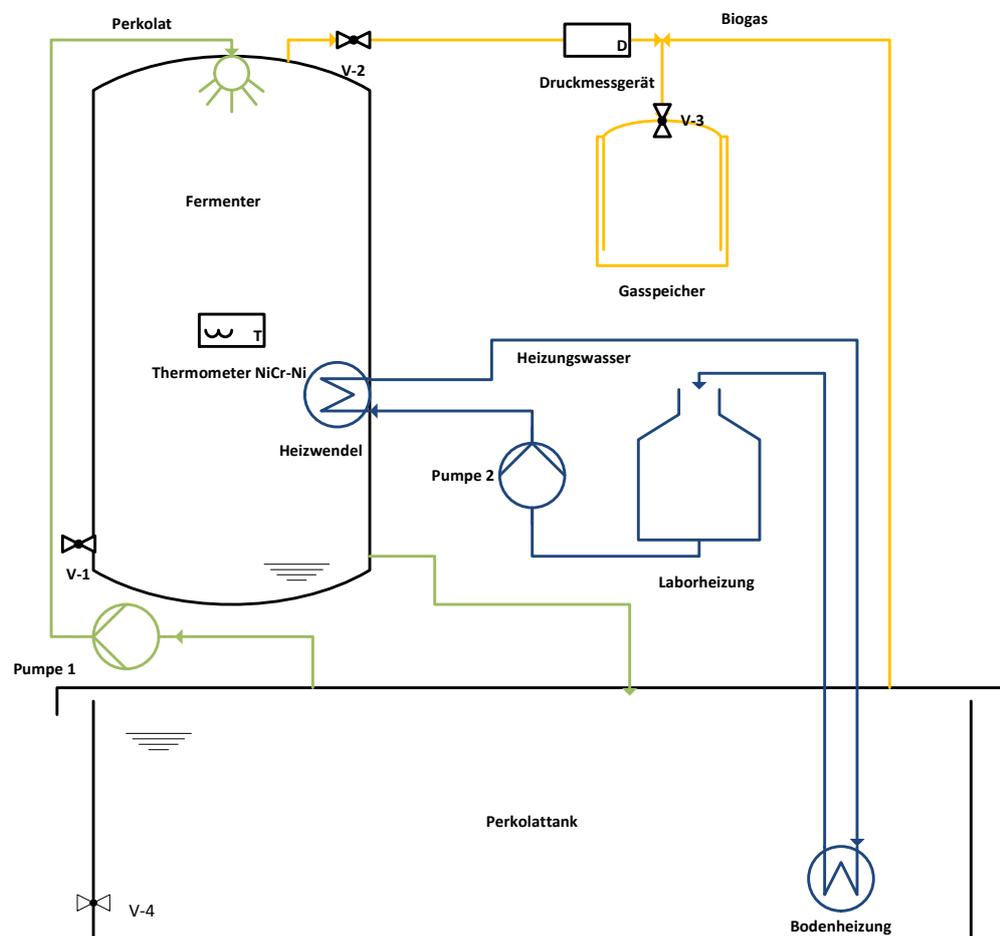


Abbildung 11: Verfahrensfließbild

## 5.2 Bauteilbeschreibung

In den folgenden Unterkapiteln werden die Bauteile im Einzelnen beschrieben. Die in Klammern gesetzten Ziffern beziehen sich dabei auf die Nummerierungen in der Montageanleitung.

### 5.2.1 Perkolattank

Für den Perkolattank (1) kommt eine 250l PE-Auffangwanne der Firma Chemo zum Einsatz. Zwei Kufen an der Unterseite ermöglichen den Transport mittels eines Hubwagens. Die Abmessungen (0,8 m x 1,2 m) entsprechen denen einer Europalette nach EN 13698-1. Zusammen mit einer 40 mm dicken PP-Platte, dem Perkolattankdeckel (2), bildet der Perkolattank einen stabilen Unterbau für den Fermenter. Für die Tankdurchführungen und für Servicearbeiten ist eine Abdeckung (3) auf den Perkolattankdeckel aufgeschraubt.



Abbildung 13: PE-Auffangwanne 250/2, 2 Kufen der Firma Chemo® [13]

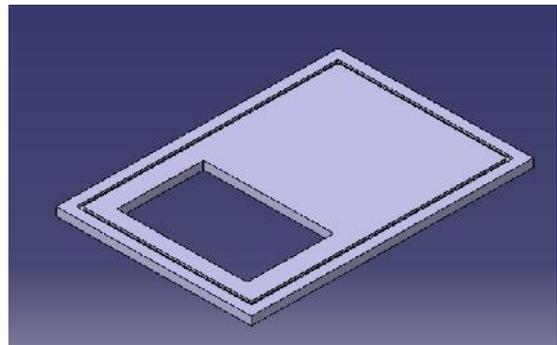


Abbildung 12: CAD-Modell Perkolattankdeckel

Zur Abdichtung des Perkolattanks (1) wurde eine Nut am Rand des Perkolattankdeckels (2) gefräst. In diese Nut wird Silikon gespritzt und der Perkolattank (1) hineingesteckt und verklebt.

Vor- und Rücklauf der Perkolation werden mit Tankdurchführungen durch die Abdeckung geleitet. Für die Entgasung und die Tankheizung sind ebenfalls eine bzw. zwei Tankdurchführungen vorgesehen. Die Tankheizung erfolgt über am Boden verlegte Rohre, die von einem Laborheizer gespeist werden. Um das Perkolat ablassen zu können, ist ein 3/4" Kugelhahn am Tank montiert.

### 5.2.2 Fermenter

Der Fermenter besteht aus 5 Hauptkomponenten: dem Sumpf (4), dem Fermenterrohr (5), dem Substratsieb (6), dem Teleskopadapter (7) und dem Fermenterdeckel (8). Aus dem Programm der Firma Rehau® stammen die Bauteile (4), (5) und (7). Für den Sumpf wird der Schachtboden „Awaschacht PP DN 600 mit geradem Durchgang“ verbaut. In den Sumpf wird das Fermenterrohr (5), das Steigrohr „Awaschacht PP DN 600“, gesteckt und das Substratsieb eingelegt. Gleichzeitig wird der Sumpf als Sandfang genutzt. Durch den erhöhten Perkolat-ablauf sammeln sich Sand und weitere Ablagerungen im unteren Teil des Sumpfes. Ist der Sandfang voll, können diese Ablagerungen über einen Kugelhahn abgelassen werden. Die Kombination aus Teleskopadapter und Fermenterdeckel schließt den Fermenter luftdicht ab

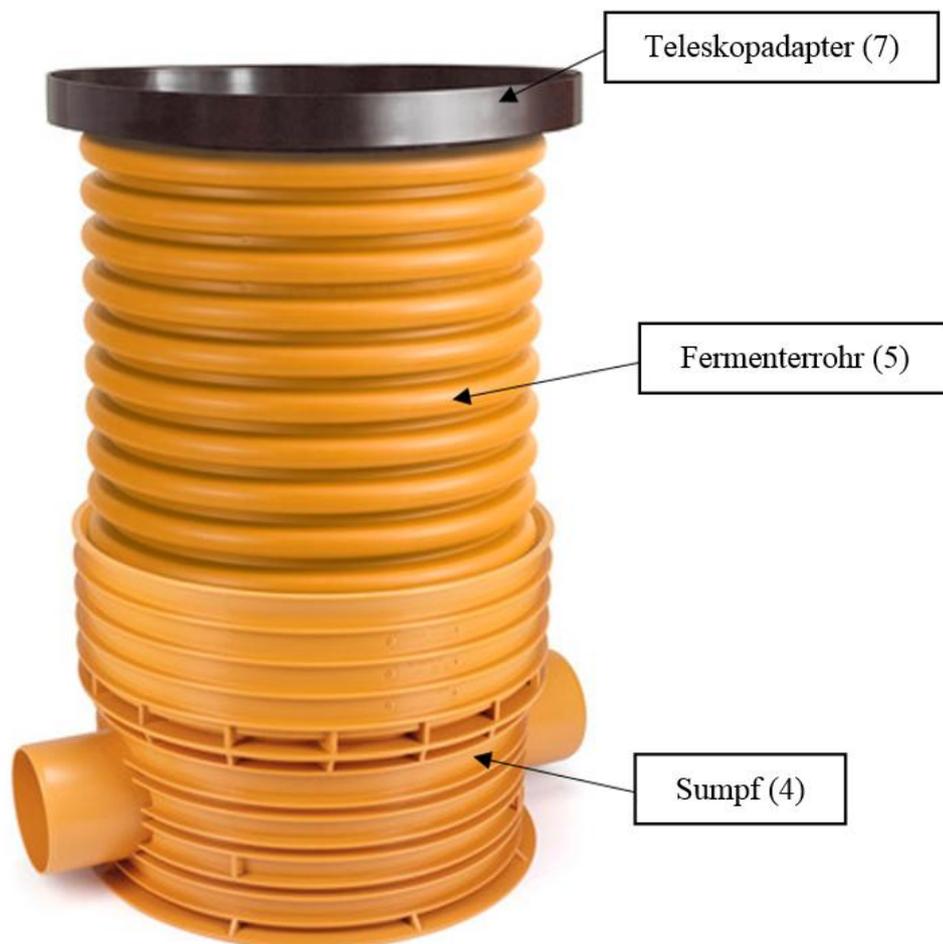


Abbildung 14: Awaschacht PP DN 600 [7]

Im Fermenterdeckel werden Tankdurchführungen für Vor- und Rücklauf der Heizung, zwei Temperaturmesssonden und eine Perkolatdüse montiert. Der Sumpf wird mit zwei Muffenstopfen verschlossen.

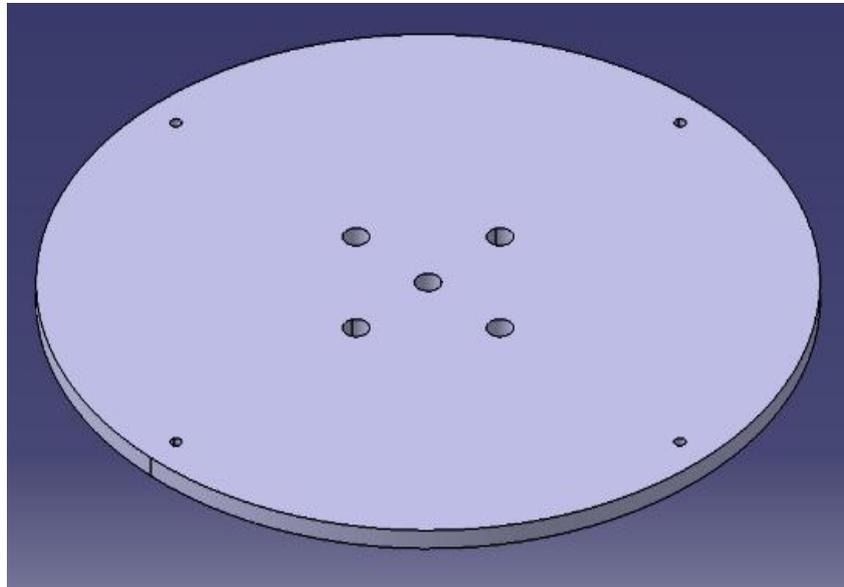


Abbildung 15: CAD-Modell Fermenterdeckel

Das Substratsieb wird horizontal in das Fermenterrohr gelegt. Es dient als flüssigkeitsdurchlässiger Zwischenboden und ermöglicht das Aufschütten des Substrats im Fermenter. Gleichzeitig wird dadurch verhindert, dass Substrat in den Perkolattank gespült wird.

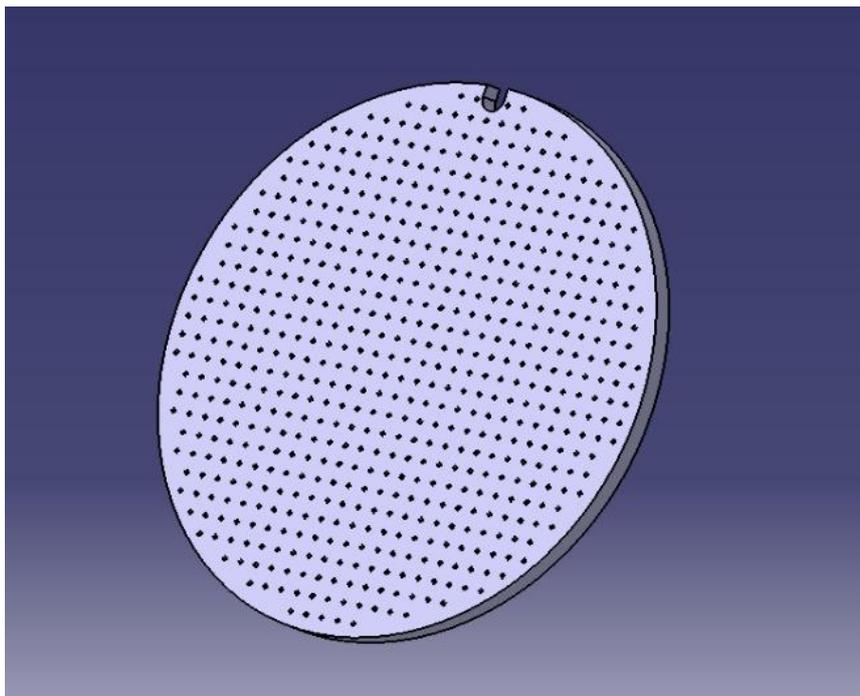


Abbildung 16: CAD-Modell Substratsieb

### 5.2.3 Laborheizung

Um die Betriebstemperatur von 40 – 45 °C zu erreichen, werden der Fermenter und der Perkolattank durch eine externe Laborheizung beheizt. Ein geschlossener Wasserkreislauf durchläuft die Heizschläuche im Fermenter und im Perkolattank. Dieser wird durch das Laborheizgerät „Lauda NB/D8/17“ erwärmt und durch die Schläuche gepumpt. Das Laborheizgerät besteht aus einer DUPLEX-Pumpe (Druck- und Saugpumpe) und einem Laborthermostat mit Spiral-Heizelement. Es können der Volumenstrom und die Vorlauftemperatur eingestellt werden.

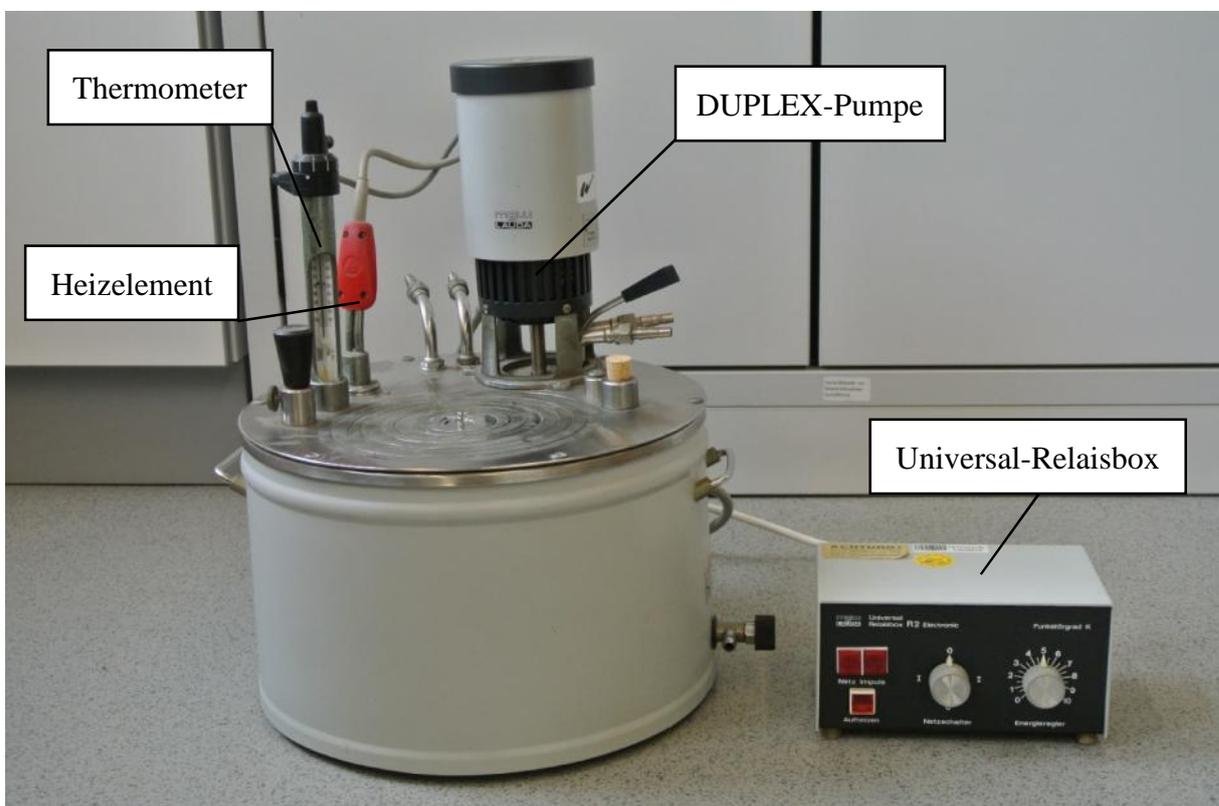


Abbildung 17: Laborheizung Lauda NB/D8/17

### 5.2.4 Perkolatpumpe

Der Perkolatkreislauf wird von einer Bohrmaschinenpumpe (Abbildung 18) angetrieben. Um eine Verstopfung der Pumpe zu vermeiden, ist vor dem Ansaugrohr ein Saugfilter montiert. Im Saugfilter integriert ist ein Rückschlagventil, das ein Trockenlaufen der Bohrmaschinenpumpe verhindert.



Abbildung 18: Perkolatpumpe [8]

Kenndaten der Bohrmaschinenpumpe:

- Leistung max.: 1300 l/h
- Förderhöhe: 15 m
- Ansaughöhe: 3 m
- Trockenlauf: 30 s
- selbstansaugend
- Schlauchanschluss: 1/2"
- Drehzahl max.: 2.800 U/min
- Leistung der Bohrmaschine: mindestens 600 Watt

Angetrieben wird die Bohrmaschinenpumpe von einer drehzahlregulierten Bohrmaschine. Die Bohrmaschine wird zeitgesteuert „an“ bzw. „aus“ geschaltet; hierdurch kann das Perkolat in definierten Intervallen in den Fermenter gespritzt werden. Mit der Drehzahlregelung der Bohrmaschine ist der Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{Perkolat}}$  einzustellen.

### 5.3 Zusammenbau

Der Zusammenbau der Biogasanlage ist von zwei Personen zu bewerkstelligen. Mit dem nötigen Werkzeug und Know-how dauert der Aufbau maximal einen Tag. Eine detaillierte Montageanleitung befindet sich im Anhang.

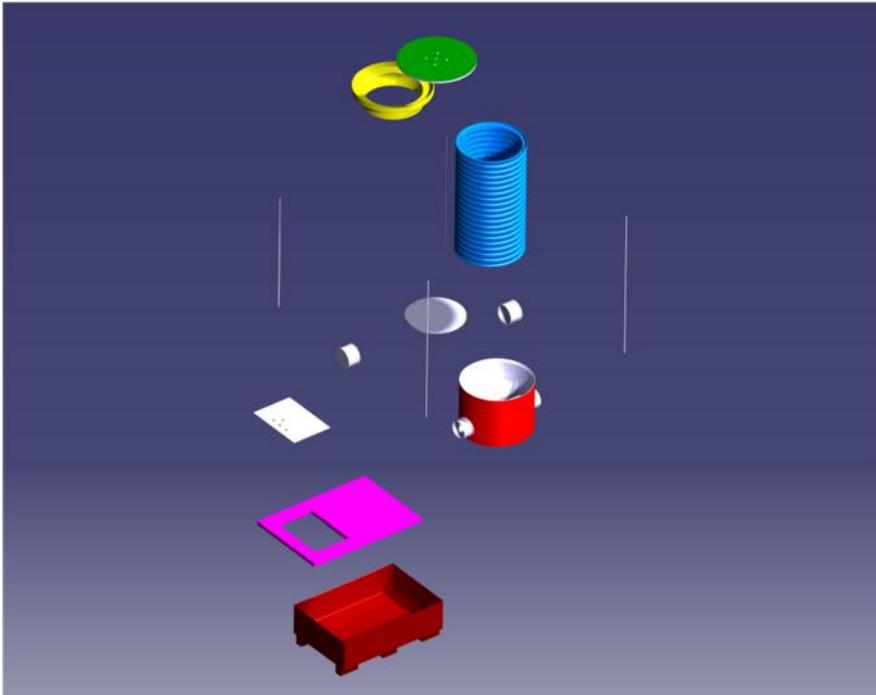


Abbildung 19: Bauteile in Explosionsdarstellung

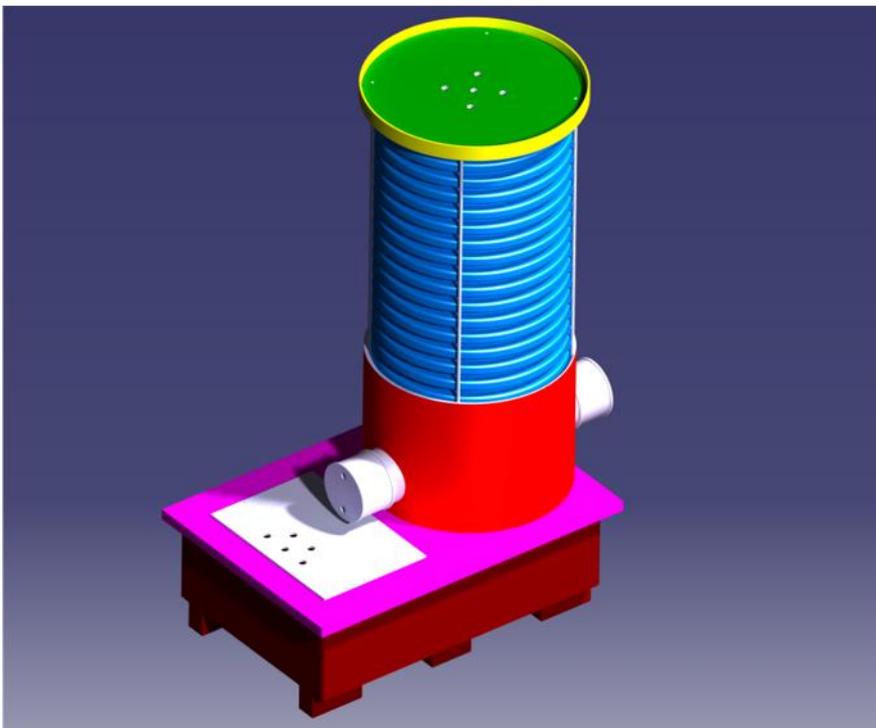


Abbildung 20: Zusammenbau Laborbiogasanlage

## 6 Dichtheitsprüfung

Biogas ist in einem weiten Konzentrationsbereich explosionsfähig. Der Hauptbestandteil des Biogases, das Methan, ist von 4,4 Vol.-% (untere Explosionsgrenze) bis 16,5 Vol.-% (obere Explosionsgrenze) explosiv [9]. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an die Dichtheit einer Biogasanlage sehr hoch. Es darf kein Biogas austreten und keine Luft in den Fermenter gelangen.

Um die Dichtheit der Laborbiogasanlage sicherzustellen, wurde sie einer Dichtheitsprüfung unterzogen. Dazu wurde die Anlage mit einem Überdruck von 0,1 bar beaufschlagt und der Druck über mehrere Stunden aufgezeichnet.

Für die Druckmessung und -aufzeichnung wurde das Messsystem „Cobra 4“ der Firma PHYWE Systeme GmbH und Co. KG verwendet. Mit dem Messaufsatz „pressure“ wurde der Druck gemessen. Um das System an die Biogasanlage anzuschließen, wurde der in Abbildung 21 zu sehende Adapter gebaut.



Abbildung 21: Adapter für Druckmessung

Für die Dichtheitsprüfung wurden die Anschlüsse für die Gasleitung und die Perkolation miteinander kurzgeschlossen (siehe Abbildung 22)



Abbildung 22: kurzgeschlossene Tankdurchführungen

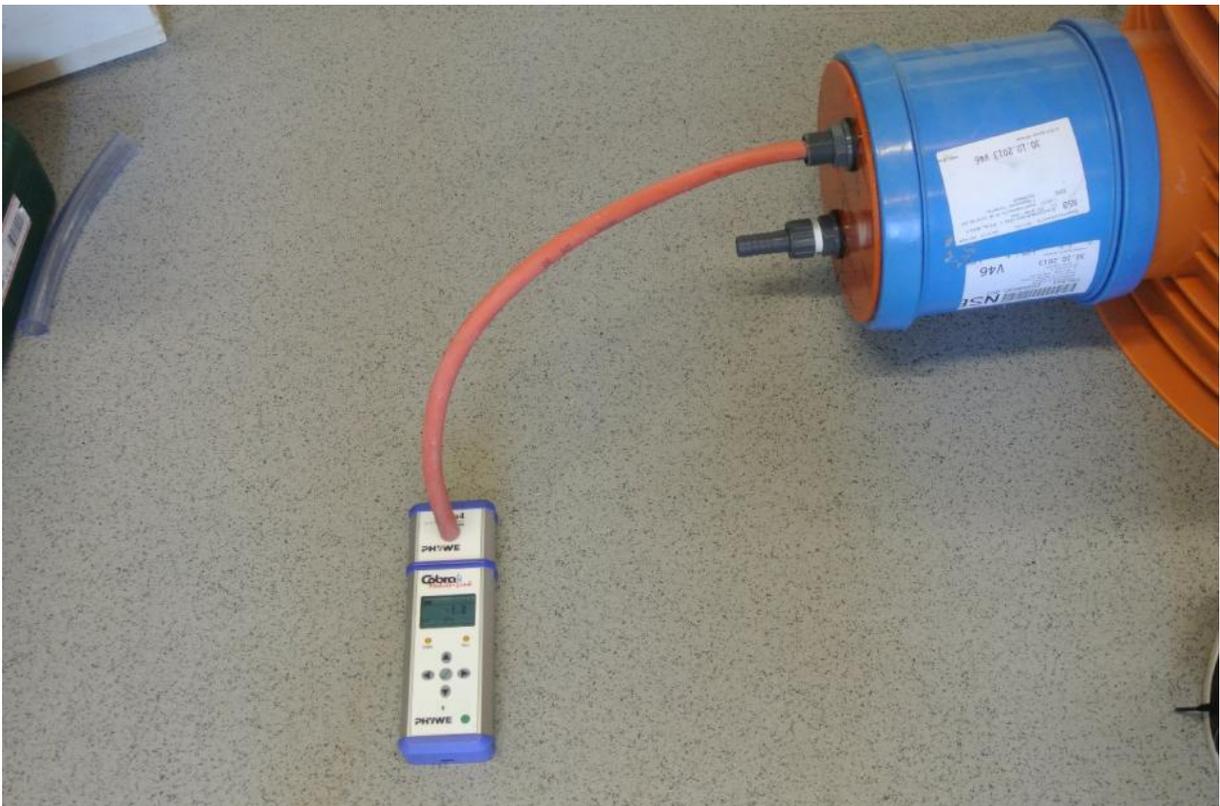


Abbildung 23: Phywe Messsystem mit Adapter im Messbetrieb

Ergebnisse der Dichtheitsprüfung:

Die Dichtheitsprüfung hat gezeigt, dass die konstruierte Laborbiogasanlage prinzipiell in der Lage ist, dem Überdruck standzuhalten. Es sind keine größeren Leckagen festgestellt worden. Bei der Deckeldichtung (10), die den Teleskopadapter (7) und den Fermenterdeckel (8) abdichten soll, konnten jedoch kleine Leckagen festgestellt werden, über die Druck entwich. Ursache hierfür ist der mangelnde Anpressdruck auf die Dichtung. Abhilfe können zusätzliche Verschraubungen schaffen. Es sollten daher 8 Verschraubungen M8 am Teilkreisdurchmesser der Stäbe (9) in einem Abstand von 30° angebracht werden.

Des Weiteren müssen die auftretenden Kräfte, die auf den Perkolattankdeckel (2) wirken, von einem zusätzlichen Bauteil aufgenommen werden. Durch den Innendruck wird nämlich der Perkolattankdeckel (2) „angehoben“ und es kommt zu einer starken mechanischen Beanspruchung der Klebefuge. Um die Kräfte ideal aufzunehmen, wird deshalb empfohlen, 2 Spanngurte um den Perkolattank (1) und den Perkolattankdeckel (2) anzubringen. Hierzu eine kurze Berechnung:

$$F = p * a \quad (\text{Gl. 3})$$

$$F = 1000 \text{ [Pa]} * (1,2 * 0,8) \text{ [m]}$$

$$\underline{F = 960 \text{ [N]}}$$

Die 960 [N] entsprechen 98 kg und wirken entgegen der Schwerkraft. Daher reicht die Masse des Fermenters (ca. 60 kg) nicht aus, diesen 960 [N] entgegenzuwirken. Um die zusätzliche Kraft aufzubringen, werden die oben beschriebenen Spanngurte angebracht

## 7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurden die Grundzüge der Feststofffermentation im Labormaßstab beschrieben. Ausgehend von der Entstehung des Biogases durch Mikroorganismen über verschiedene Anlagenkonzepte wurde in den Kapiteln 4 und 5 die Konzeption und Konstruktion der Feststofffermentations-Laborbiogasanlage ausführlich beschrieben. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit geringem Einsatz von Ressourcen eine betriebsbereite Laborbiogasanlage aufzubauen. Zukünftig können potenzielle Substrate auf ihre Eignung zur Biogasproduktion getestet werden. Darüber hinaus kann die Biogasanlage in Privathaushalten und kleinen land- und forstwirtschaftlichen Betrieben zum Einsatz kommen. Auch in Entwicklungsländern, in denen der Zugang zu Energieträgern eingeschränkt ist, wird ein gewisses Einsatzpotenzial gesehen. Die Anlage zeichnet sich durch einfach gestaltete, aber robuste Komponenten aus. Das Verhältnis von Perkolatvolumen zu Substratvolumen ist deutlich größer als 1, was sich entscheidend auf die pH-Wert-Stabilität auswirkt. Somit ist eine zuverlässige und stabile Biogasproduktion gewährleistet.

Bedauerlicherweise war es aufgrund des begrenzten Zeitraums und baulicher Gegebenheiten nicht möglich, die Anlage in Betrieb zu nehmen und Versuchszyklen zu fahren.

## 8 Ausblick

Hinsichtlich der Mess- und Regelungstechnik werden weitere Ausbaumöglichkeiten der Laborbiogasanlage gesehen. Es können zusätzliche Parameter, wie zum Beispiel der Fermenterfüllstand und die Vor- und Rücklauftemperatur der Heizung, gemessen und aufgezeichnet werden. Dies ermöglicht eine bessere Prozesssteuerung und Überwachung. Eine grafische Darstellung der Parameter und der Messgrößen, wie es bei großen Biogasanlagen üblich ist, sollte zusätzlich integriert werden. Es könnten auch Prozessvisualisierungsprogramme wie zum Beispiel LabView zum Einsatz kommen.

Vor Inbetriebnahme ist die gesamte Anlage mit komplett angeschlossener Peripherie nochmals einem Drucktest zu unterziehen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit war dies nicht möglich.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme kann der Versuchsbetrieb gestartet werden. Anfangs bietet es sich an, mit verschiedenen Substraten Versuche zu fahren und zu ermitteln, welches Substrat für die Biogasanlage am geeignetsten ist. Weiterhin können im Auftrag von externen Kunden Substrate auf ihre Eignung zur Feststofffermentation getestet werden.

Um die Laborbiogasanlage autark und energieeffizient zu betreiben, kann zukünftig die Heizung über Solarthermie erfolgen. Auch der benötigte Strom für Pumpen und Messtechnik könnte über Fotovoltaikmodule eigenständig auf 12 Volt-Basis erzeugt werden.

## 9 Anhang

Anhang A: Montageanleitung .....	39
Anhang B: Konstruktionszeichnungen .....	56
Anhang C: Stückliste .....	63

## Anhang A: Montageanleitung

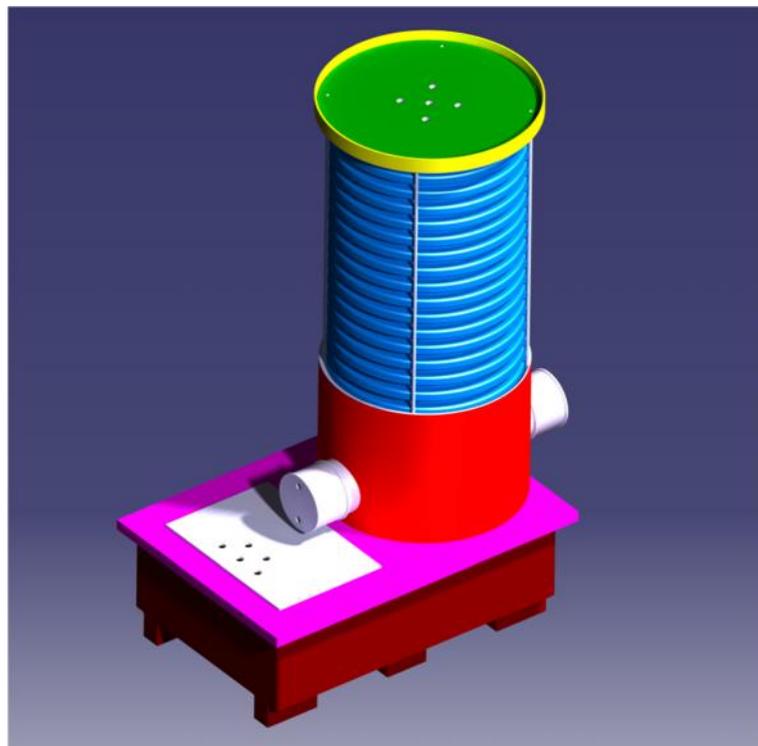


**HOCHSCHULE LANDSHUT**  
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN



# Montageanleitung

„Feststofffermentations-Laborbiogasanlage“



## Inhalt

1 Einleitung .....	41
2 Grundlegendes zur Montage.....	42
3 Montage.....	43
3.1 Baugruppe Perkolattank .....	43
3.1.1 Unterbaugruppe Abdeckung.....	45
3.2 Baugruppe Fermenter .....	48
3.2.1 Unterbaugruppe Sumpf.....	48
3.2.2 Unterbaugruppe Fermenterrohr .....	50
3.2.3 Unterbaugruppe Teleskopadapter/Fermenterdeckel.....	51
3.3 Heizung.....	55
3.4 Gasleitungen/Gasspeicher .....	55

## 1 Einleitung

Im Rahmen der Bachelorarbeit „Konstruktion und Aufbau einer Feststofffermentation-Laborbiogasanlage“ (2014) wurde die in Abbildung 24 zu sehende Biogasanlage konstruiert und gebaut. Diese Montageanleitung beschreibt den Zusammenbau aller Einzelteile und wie die Biogasanlage betriebsbereit aufgestellt wird.

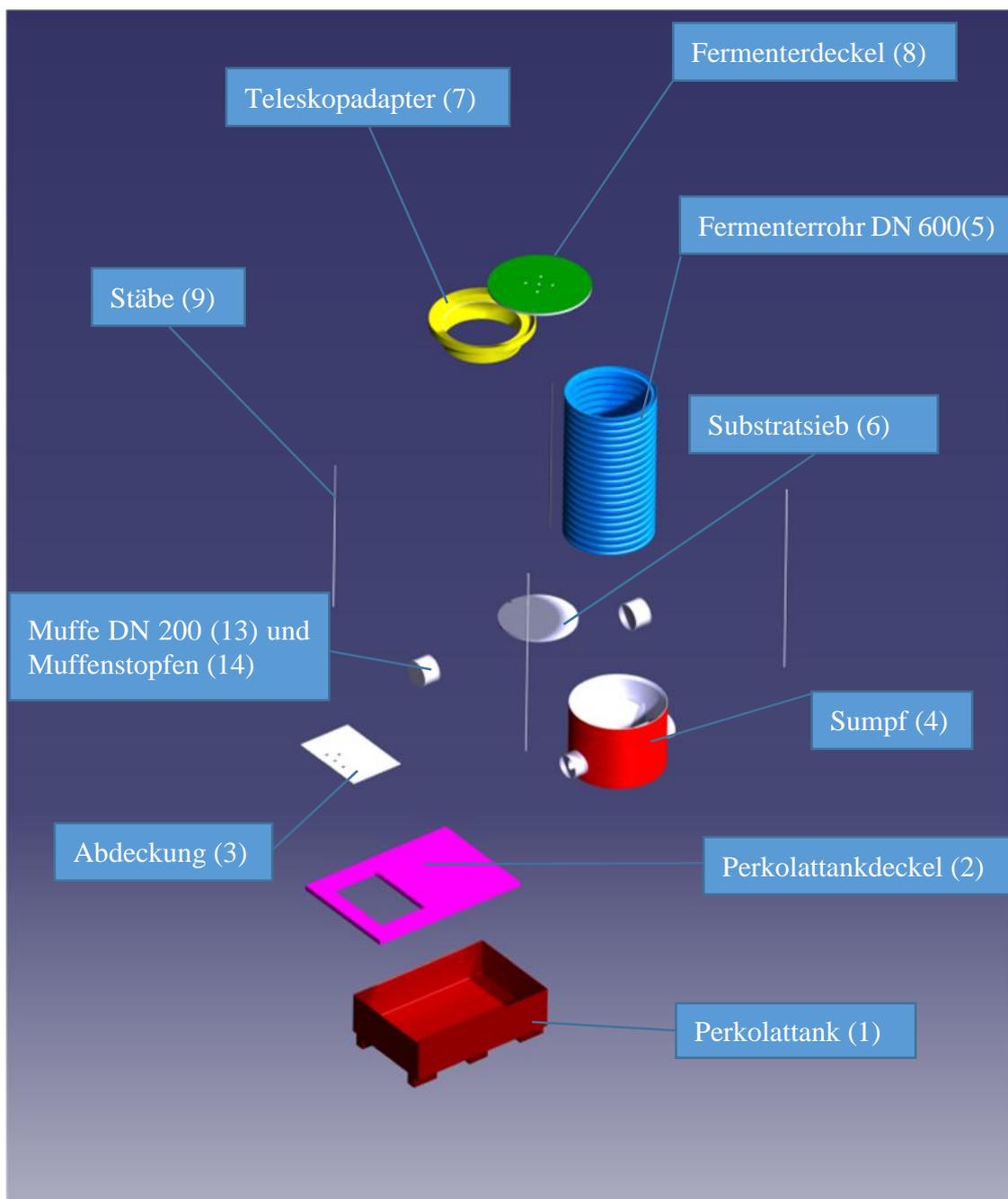


Abbildung 24: Explosionszeichnung der Laborbiogasanlage

## 2 Grundlegendes zur Montage

Für einen reibungslosen Betrieb der Biogasanlage ist es wichtig, die folgenden Punkte zu beachten. Es ist sorgsam darauf zu achten, die Anlage sachgemäß und gewissenhaft aufzubauen; mindestens eine weitere Person ist für den Aufbau notwendig.

- Alle Dichtflächen müssen sauber und staubfrei sein.
- Sämtliche Verschraubungen müssen mit Dichtungsband (PTFE) abgedichtet werden.
- Bei Klebeverbindungen muss die Klebestelle staub- und fettfrei sein. Es wird empfohlen, die Klebestellen anzuschleifen und anschließend mit Ethanol zu reinigen.
- Für das Zusammenstecken von Rohren muss geeignetes Gleitmittel verwendet werden.
- Schläuche müssen mit Schlauchschellen oder Kabelbindern auf den Schlauchtüllen befestigt werden.

### Hilfsstoffe

Die benötigten Hilfsstoffe für die Montage sind in Tabelle 5 aufgeführt. Bestellnummern und Bezugsquellen befinden sich im Anhang.

Nr.:	Name	Bezeichnung
H1	2K-Kleber	Uhu 45585 - 2-Komponentenkleber Plus Endfest
H2	Gleitmittel	Rehau-Gleitmittel 250 g
H3	Vergussmasse	Vergussmasse Typ Wepuran VU 4457/51
H4	Silikon-Klebe-/Dichtmasse	Silikon-Klebe-/Dichtmasse RTV 116, rot, 82,8 ml-Tube
H5	Silikonkleber	OTTOSEAL S 54 Spezial-Silicon B1
H6	Primer	OTTO Primer 1216 Silicon-Metall-Grundierung

Tabelle 5: Liste der benötigten Hilfsstoffe

## 3 Montage

Bevor mit der Montage begonnen werden kann, müssen die Teile Perkolattankdeckel (2), Abdeckung (3), Substratsieb (6), Teleskopadapter (7), Fermenterdeckel (8), Stäbe (9), Deckeldichtung (10), Dichtung für die Abdeckung (11) und Muffenstopfen (14) gemäß den angehängten Zeichnungen gefertigt werden.

### 3.1 Baugruppe Perkolattank

Für die Heizung des Perkolattanks (1) werden am Boden Heizschläuche (20) verlegt. Hierzu werden 8 Befestigungssockel (26) – wie in Abbildung 25 zu sehen – mit 2K-Kleber (H1) auf den Boden geklebt und der PVC-Schlauch (20) wird mit Kabelbindern (25) fixiert. Der Schlauch sollte an den Enden jeweils ca. 30 cm über den Perkolattank (1) herausstehen.



Abbildung 25: Perkolattank (1) mit Befestigungssockel (26)

Anschließend wird der Perkolattank (1) mit dem Perkolattankdeckel (2) verklebt. Zuerst werden die Klebestellen mit Primer (H6) vorbehandelt. Dann wird der Perkolattankdeckel (2) mit der Klebenut nach oben auf den Boden gelegt und die Nut mit Silikonkleber (H5) ausgefüllt. Anschließend wird der Perkolattank (1) umgedreht in die Nut eingesetzt (siehe Abbildung 26) und nicht mehr bewegt.



Abbildung 26: Verkleben des Perkolattanks (1) mit dem Perkolattankdeckel (2)

## 3.1.1 Unterbaugruppe Abdeckung

Für die Unterbaugruppe Abdeckung (3) werden die Tankdurchführungen (TD) – wie in Abbildung 27 und

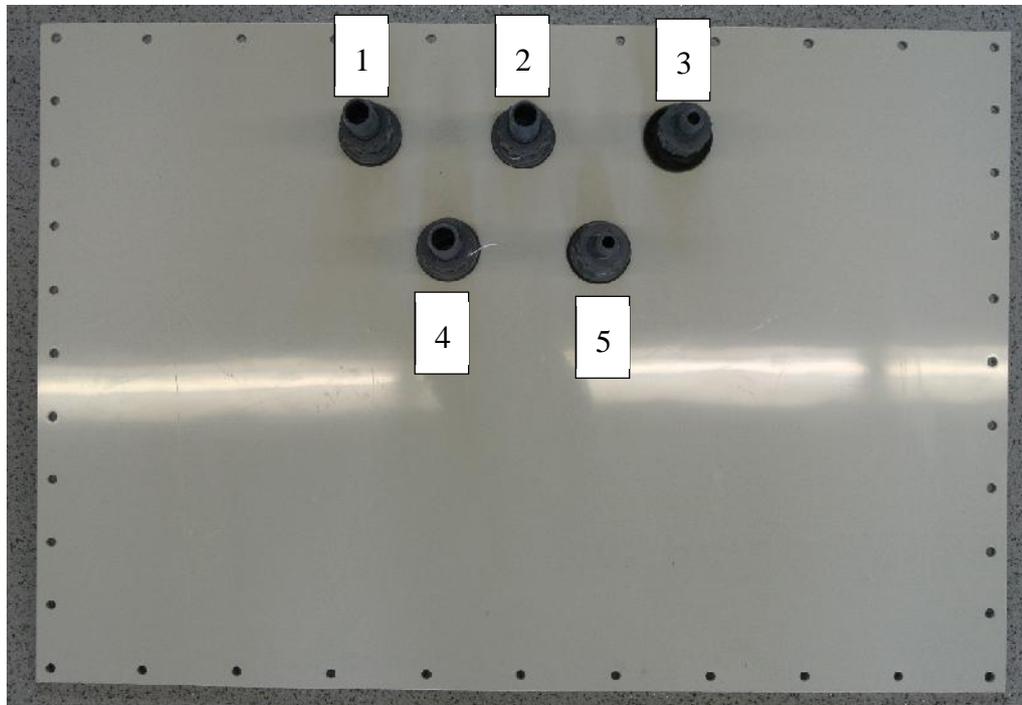


Abbildung 27: Abdeckung (3) von oben

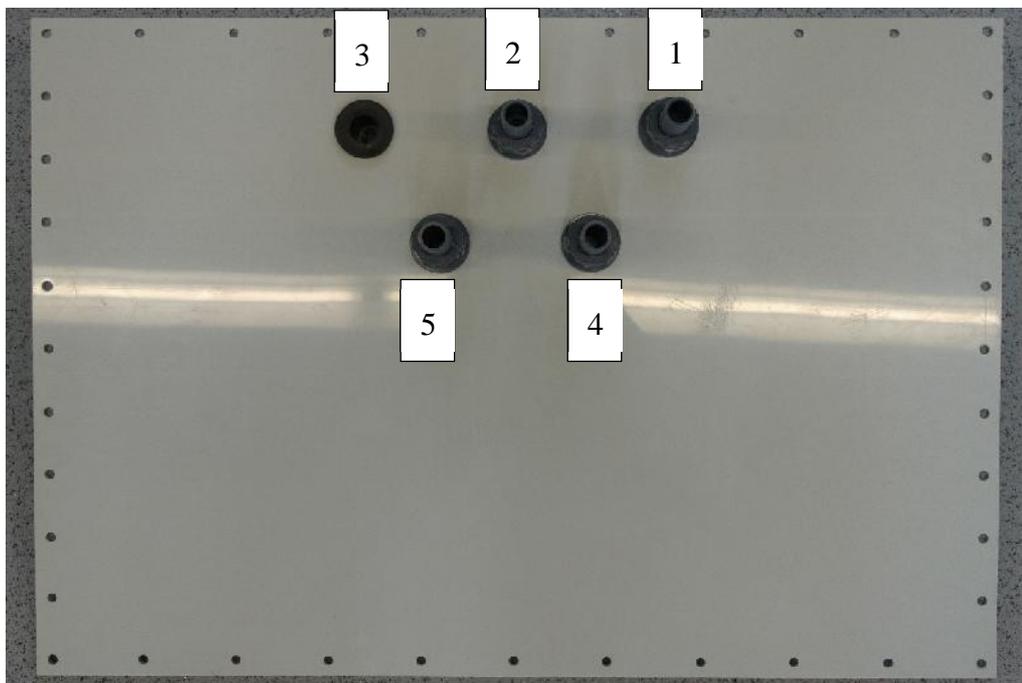


Abbildung 28: Abdeckung (3) von unten

Bauteilnummern der Tankdurchführungen 1 - 5:

- TD 1: Tankdurchführung (27), 2 x Schlauchtülle (28)
- TD 2: Tankdurchführung (27), 2 x Schlauchtülle (28)
- TD 3: Tankdurchführung (28), Schlauchtülle (29)
- TD 4: Tankdurchführung (27), 2 x Schlauchtülle (28)
- TD 5: Tankdurchführung (27), Schlauchtülle (28), Schlauchtülle (29)

Danach wird der Saugfilter (19) mit einem ca. 50 cm langen Stück Schlauch (20) verbunden und von unten auf die Abdeckung (3) gesteckt (Abbildung 29).



Abbildung 29: Saugfilter (19) mit Schlauch (20)

Die Enden des Heizschlauchs werden ebenfalls von unten auf die Abdeckung (3) gesteckt. Von oben werden die Gasleitung, der Auslauf des Sumpfes (4), der Vor- und Rücklauf der Heizung und der Ansaugschlauch der Perkolatpumpe (17) montiert (Abbildung 30).

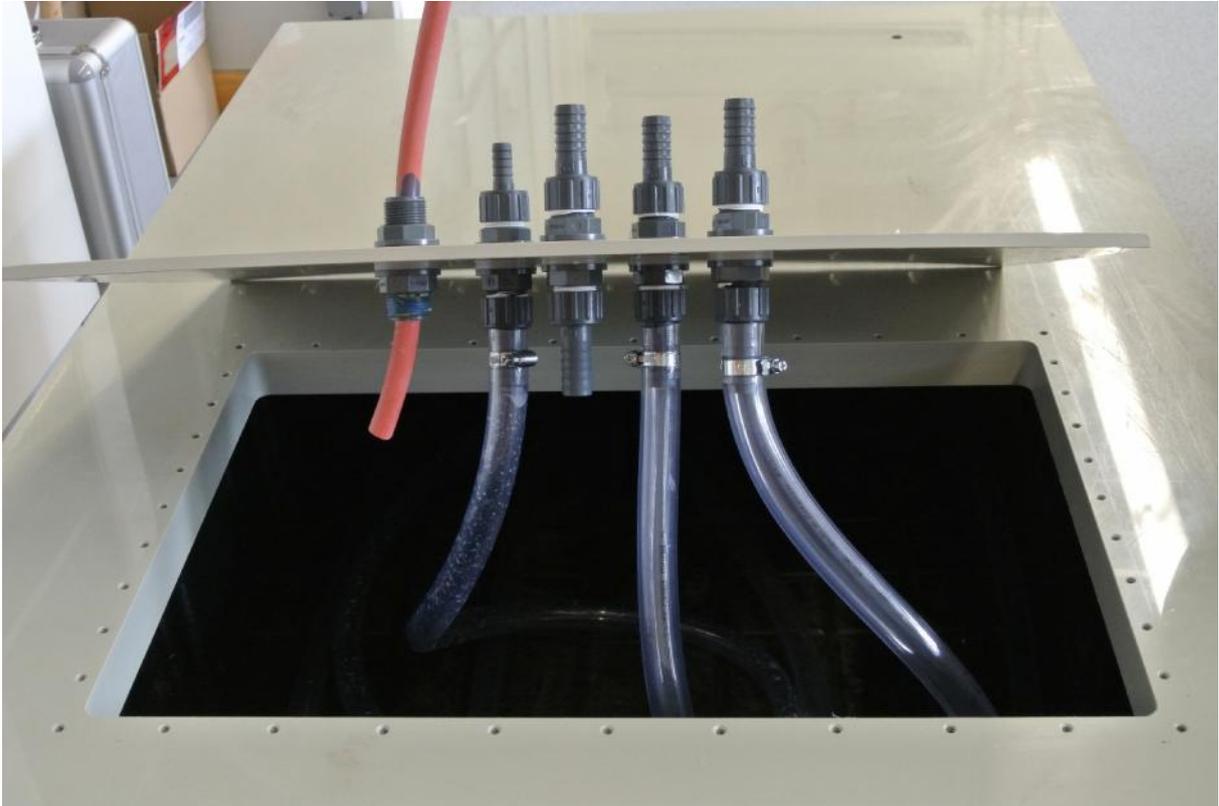


Abbildung 30: Abdeckung (3) mit Tankfurchführungen

Jetzt wird die vormontierte Baugruppe Abdeckung (3) mit den Schrauben (22), Unterlegscheiben (23) und der Dichtungs-Abdeckung (11) auf den Perkolattankdeckel (2) geschraubt

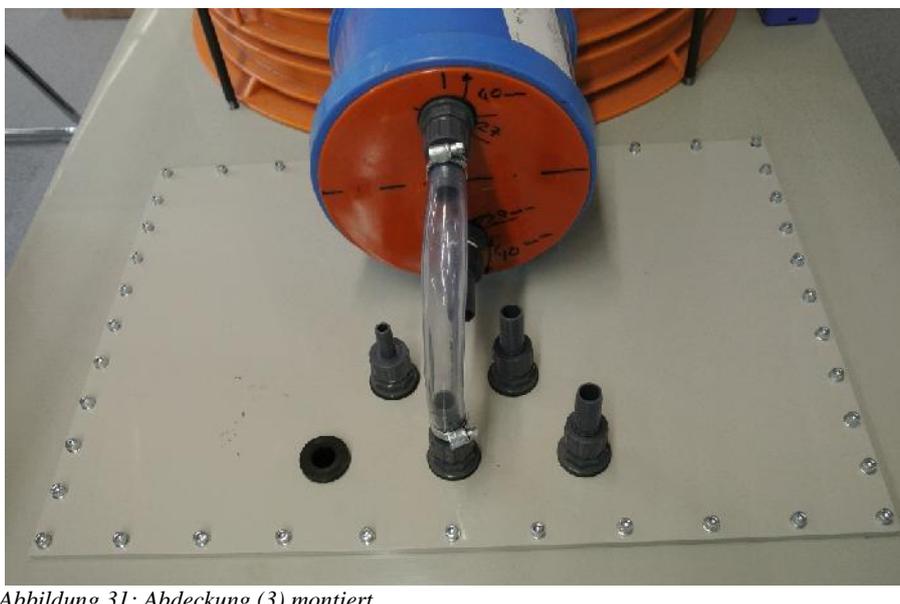


Abbildung 31: Abdeckung (3) montiert

### 3.2 Baugruppe Fermenter

Der Fermenter besteht aus 3 Unterbaugruppen: dem Sumpf (4), dem Fermenterrohr DN 600(5) und dem Teleskopadapter (7) mit dem Fermenterdeckel (8).

#### 3.2.1 Unterbaugruppe Sumpf

2 Muffenstopfen (14) werden jeweils mit einer Muffe DN 200 (13) zusammengesteckt und an den Tankdurchführungen – wie in Abbildung 32 zu sehen – Abbildung 32: Muffenstopfen (14) links und rechts am Sumpf (4) angebracht. An einen der Muffenstopfen wird ein ca. 30 cm langer Schlauch (20) gesteckt und der Druckluftanschluss (24) am anderen Ende befestigt. Der Sockel des Druckluftanschlusses (24) wird mit 2K-Kleber (H1) auf den Muffenstopfen (14) geklebt.

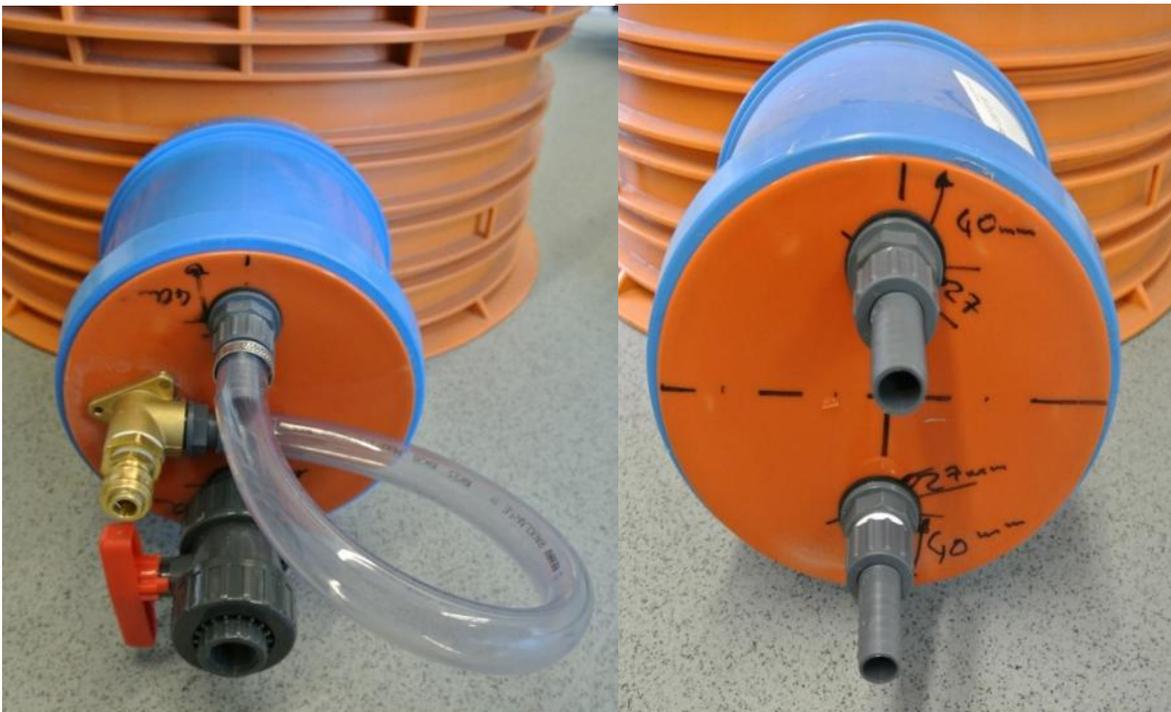


Abbildung 32: Muffenstopfen (14) links und rechts am Sumpf (4)

#### Bauteilnummern der Tankdurchführungen:

- links oben: Tankdurchführung (27), Schlauchtülle (28)
- links unten: Tankdurchführung (27), Kugelhahn 3/4“ (18)
- rechts oben: Tankdurchführung (27), Schlauchtülle (28)
- rechts unten: Tankdurchführung (27), 2 x Schlauchtülle (28)

Der Schlauch (20) der Fermenterheizung wird mit der Schlauchtülle (28) verbunden (Abbildung 33).



Abbildung 33: Muffenstopfen (14) mit Fermenterheizung verbinden

Die so vorbereiteten Muffen werden auf die beiden Öffnungen des Sumpfes (4) gesteckt.

### 3.2.2 Unterbaugruppe Fermenterrohr

Jetzt wird das Fermenterrohr DN 600 (5) mit den Heizschläuchen (20) versehen. Dazu wird der Schlauch (20) spiralförmig in die Rillen des Fermenterrohrs DN 600 (5) gelegt und mit Befestigungssockeln und Kabelbindern fixiert (siehe Abbildung 34). Oben sollte der Schlauch (20) ca. 30 cm, unten ca. 70 cm herausstehen. Anschließend wird der Schlauch (20) mit dem Fermenterrohr DN 600 (5) verklebt; zu diesem Zweck wird Silikon-Klebe- und Dichtmasse (H4) verwendet. Es wird empfohlen, das Fermenterrohr (5) in horizontaler Lage aufzustellen und die Silikon-Klebemasse langsam zwischen Schlauch (20) und Fermenterrohr DN 600 (5) fließen zu lassen. Der Schlauch (20) kann behelfsmäßig mit Kartonkeilen und Befestigungssockeln (26) fixiert werden. Dieser Schritt ist auch an den gegenüberliegenden Stellen durchzuführen.



Abbildung 34: Verkleben des Fermenterrohr (5)

Sodann wird das Dichtungs-Fermenterrohr DN 600 (15) mit Gleitmittel eingestrichen und über das erste Wellental des Fermenterrohrs DN 600 (5) geschoben. Im nächsten Schritt wird der Steckbereich des Sumpfes (4) mit Gleitmittel eingestrichen und das Fermenterrohr DN 600 (5) bis zum Anschlag eingeschoben.

### 3.2.3 Unterbaugruppe Teleskopadapter/Fermenterdeckel

In das im Schritt 3.2.2 montierte Fermenterrohr DN 600 (5) wird das zweite Dichtungs-Fermenterrohr DN 600 (15) auf der Innenseite zwischen der ersten und zweiten Welle montiert. Anschließend wird der Teleskopadapter (7) in das Fermenterrohr DN 600 (5) gesteckt.



Abbildung 35: Teleskopadapter montiert

Im nächsten Schritt wird der Fermenterdeckel (8) mit den in Abbildung 36: Fermenterdeckel (8) oben und unten gezeigten Tankdurchführungen verschraubt. Die Deckeldichtung (10) wird in den Teleskopadapter (7) gelegt dann der Fermenterdeckel (8) daraufgesetzt

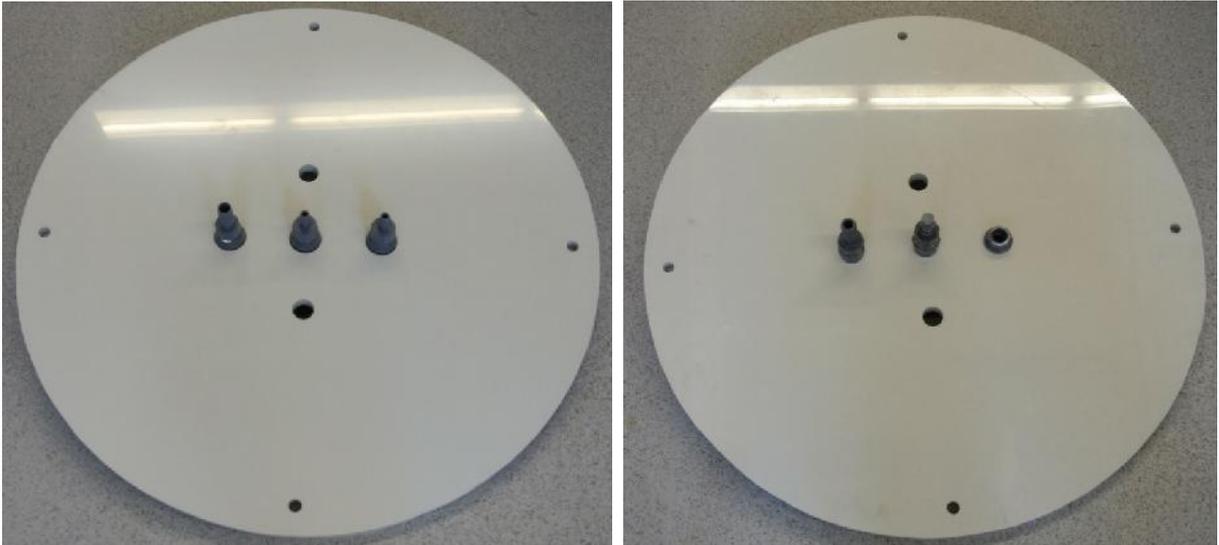


Abbildung 36: Fermenterdeckel (8) oben und unten

Bauteilnummern der Tankdurchführungen (von oben):

- links: Tankdurchführung (27), 2 x Schlauchtülle (28)
- Mitte: Tankdurchführung (27), 3/4“ Verbinder (33), MC-Pralldüse (34)
- rechts: Tankdurchführung (32), Schlauchtülle (29)

In die zwei freien Bohrungen werden jetzt die Temperaturmesssonden (16) gesteckt und festgeschraubt.

Anschließend wird die Baugruppe Fermenter auf die Baugruppe Perkolattank gestellt und mit den vier Stäben (9) verschraubt (siehe Abbildung 37).



Abbildung 37: Fermenter auf Perkolattank stellen

Zum Schluss wird der Auslauf des Fermenters mit der Abdeckung (3) verbunden (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38: Fermenterauslauf in Perkolattank

Die übrigen Schläuche werden gemäß Abbildung 39 verlegt.

### 3.3 Heizung

Das Laborheizgerät wird gemäß der Betriebsanleitung betriebsbereit gemacht. Anschließend wird der Schlauch (20) mit den Schlauchtüllen des Laborheizgerätes verbunden.

### 3.4 Gasleitungen und Gasspeicher

Die Gasleitungen gemäß Abbildung 39 verlegen und mit dem Gasspeichersack verbinden.

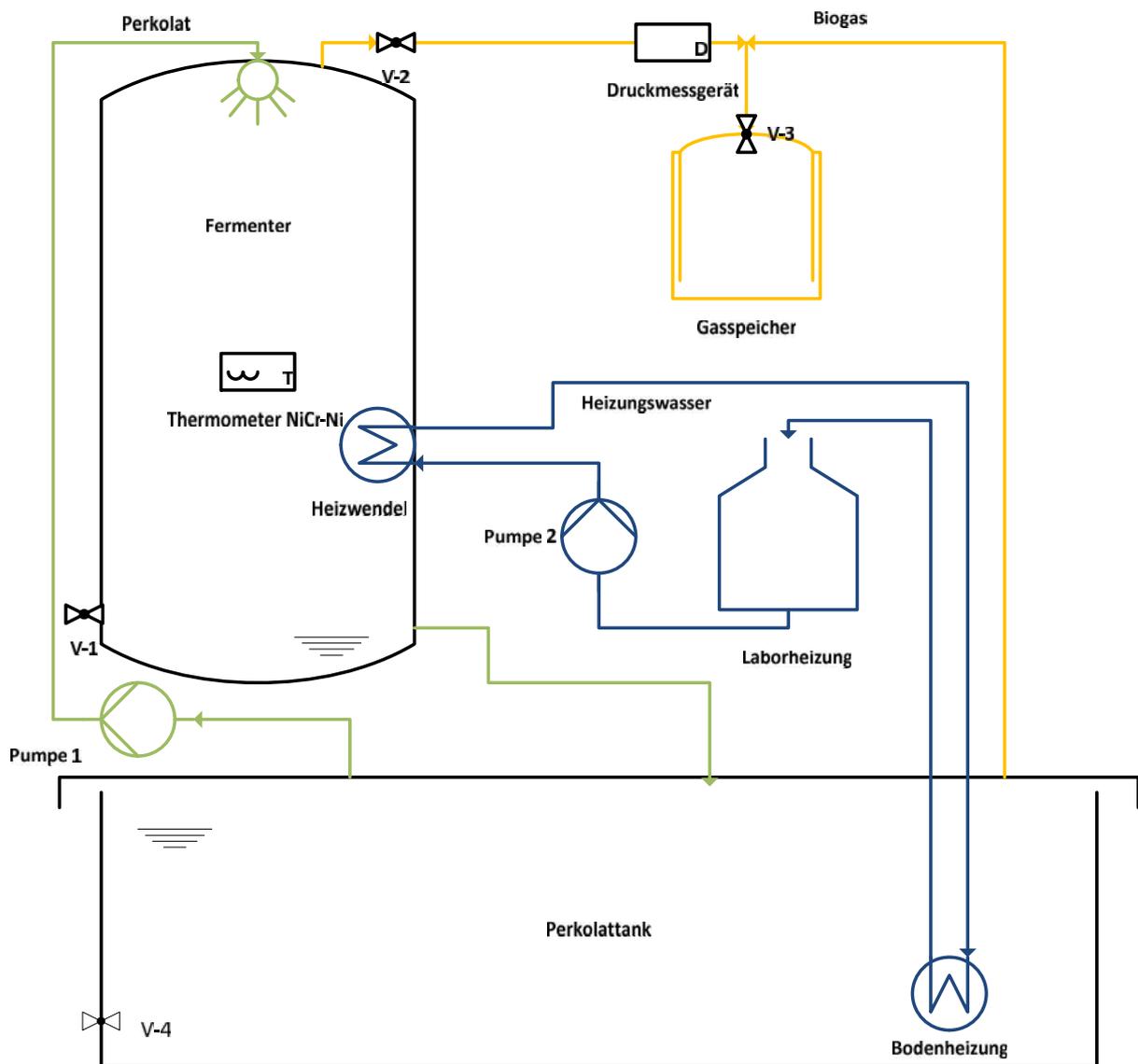
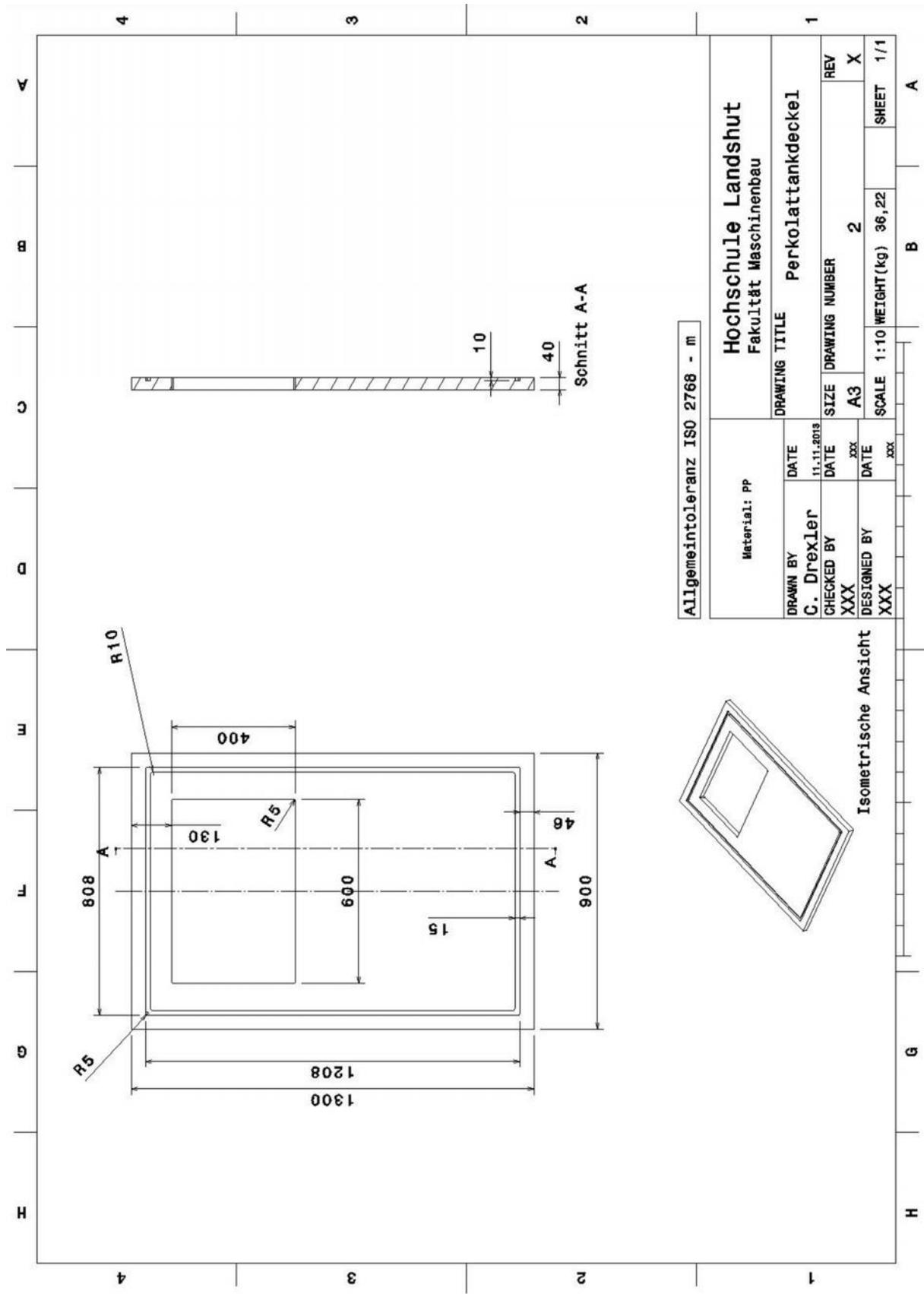
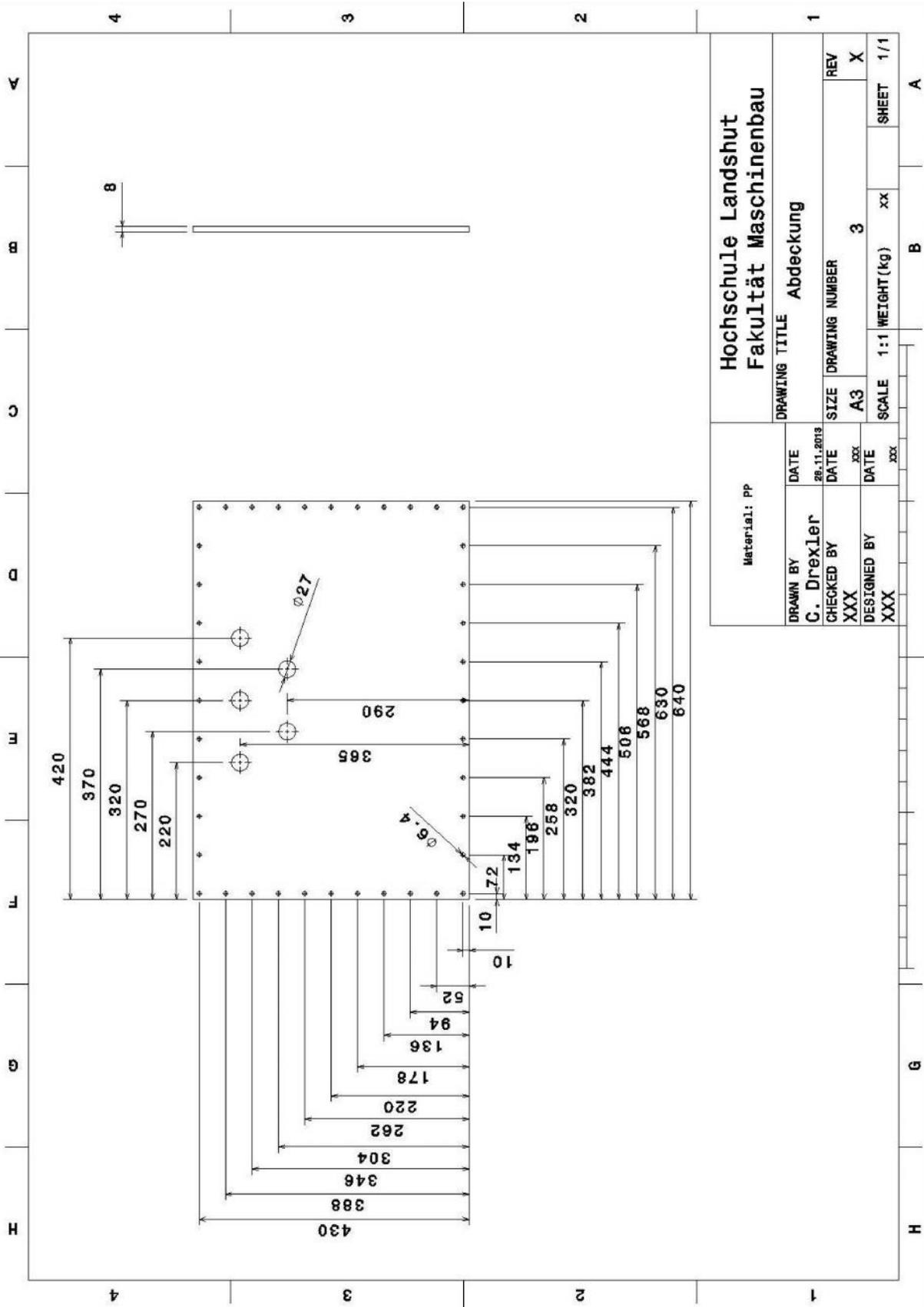
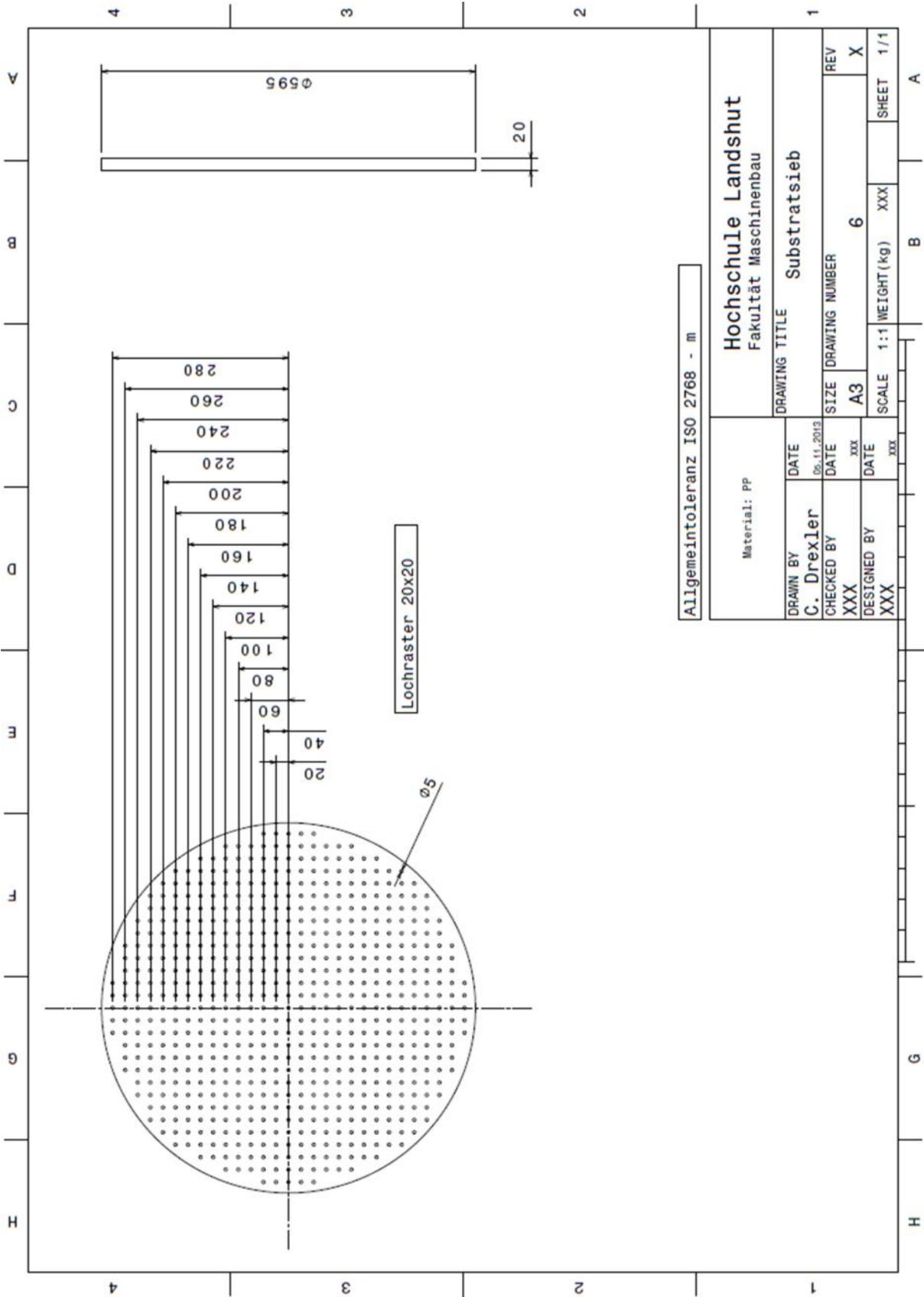


Abbildung 39: Verfahrensfließbild

Anhang B: Konstruktionszeichnungen

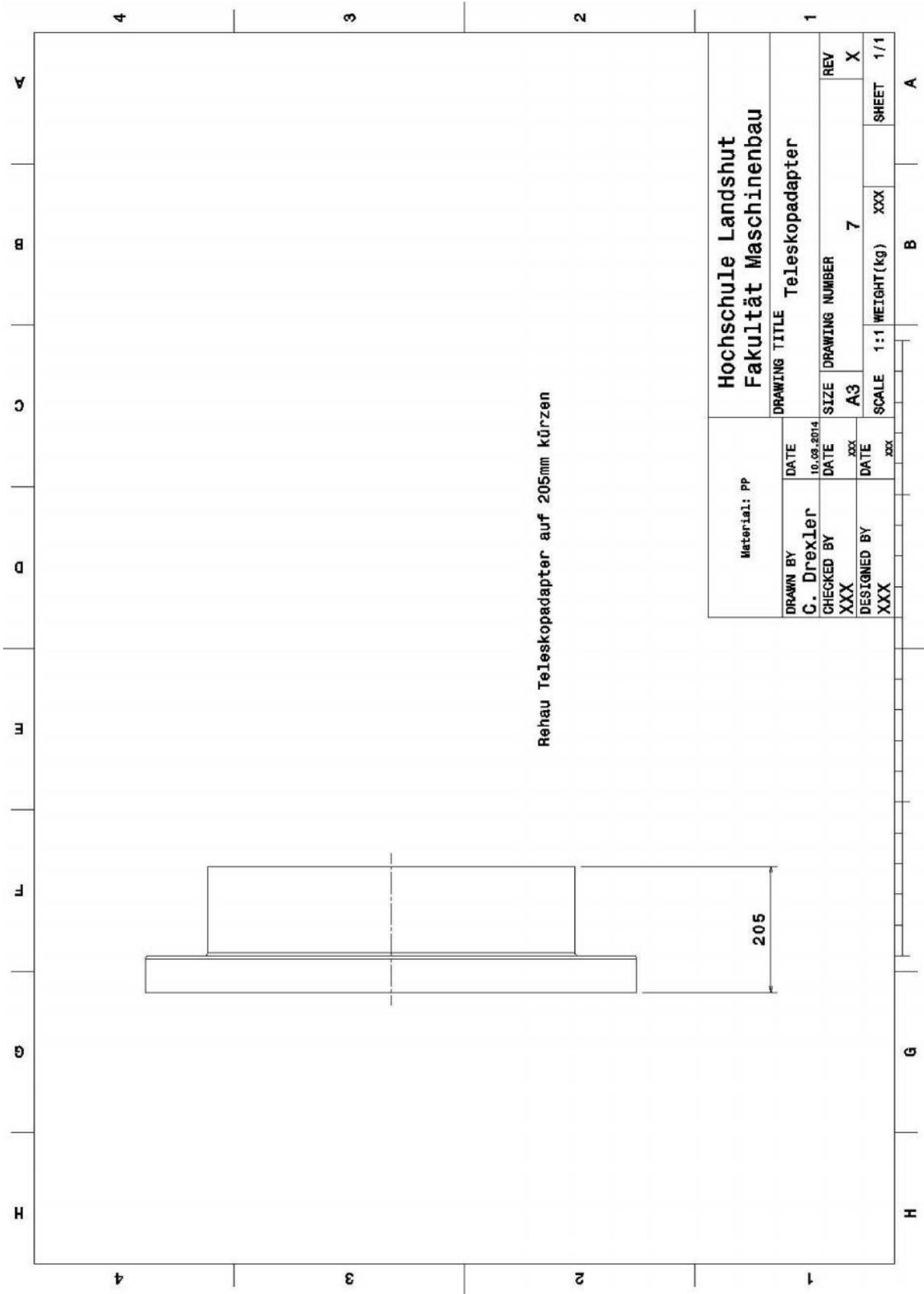


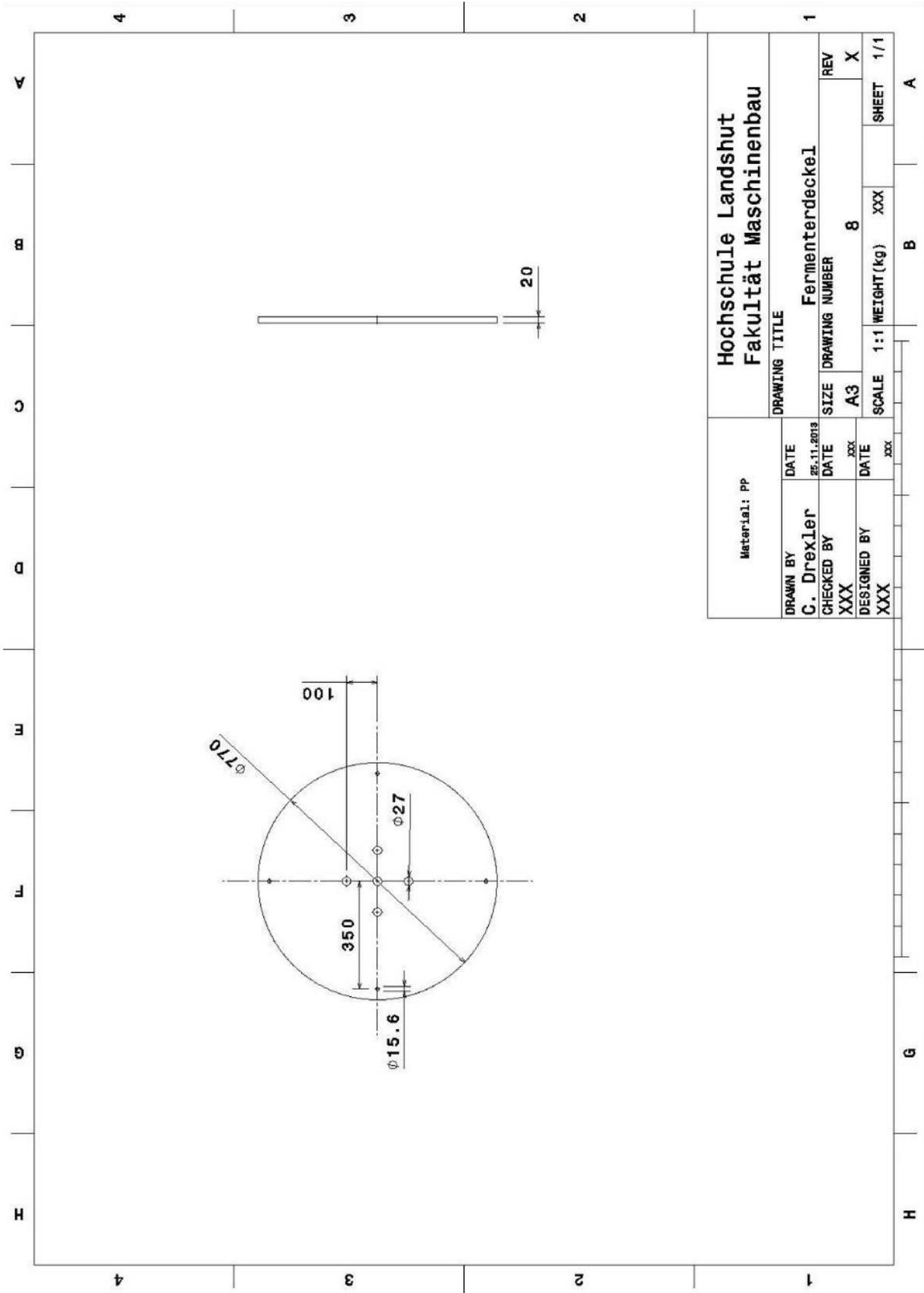


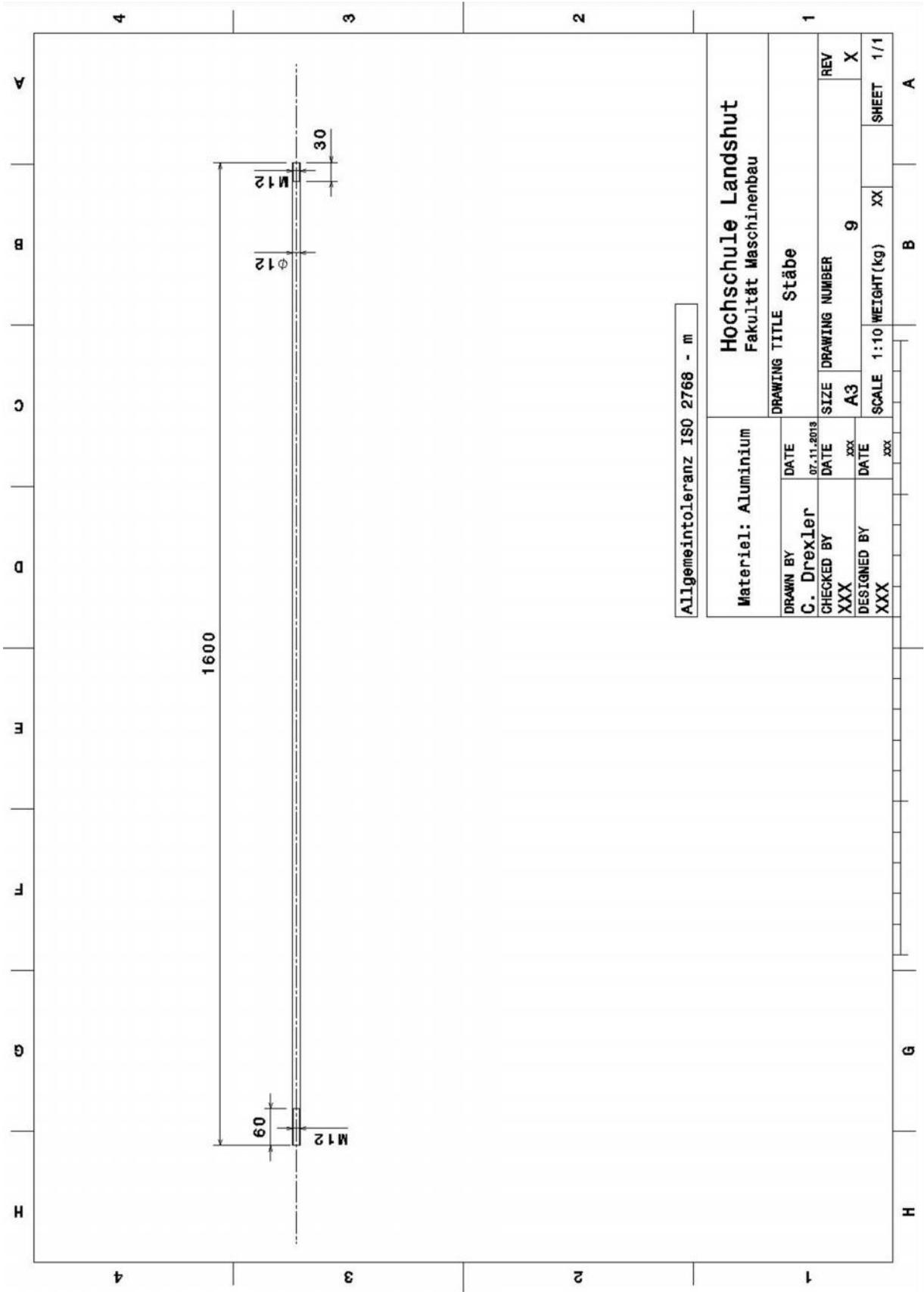


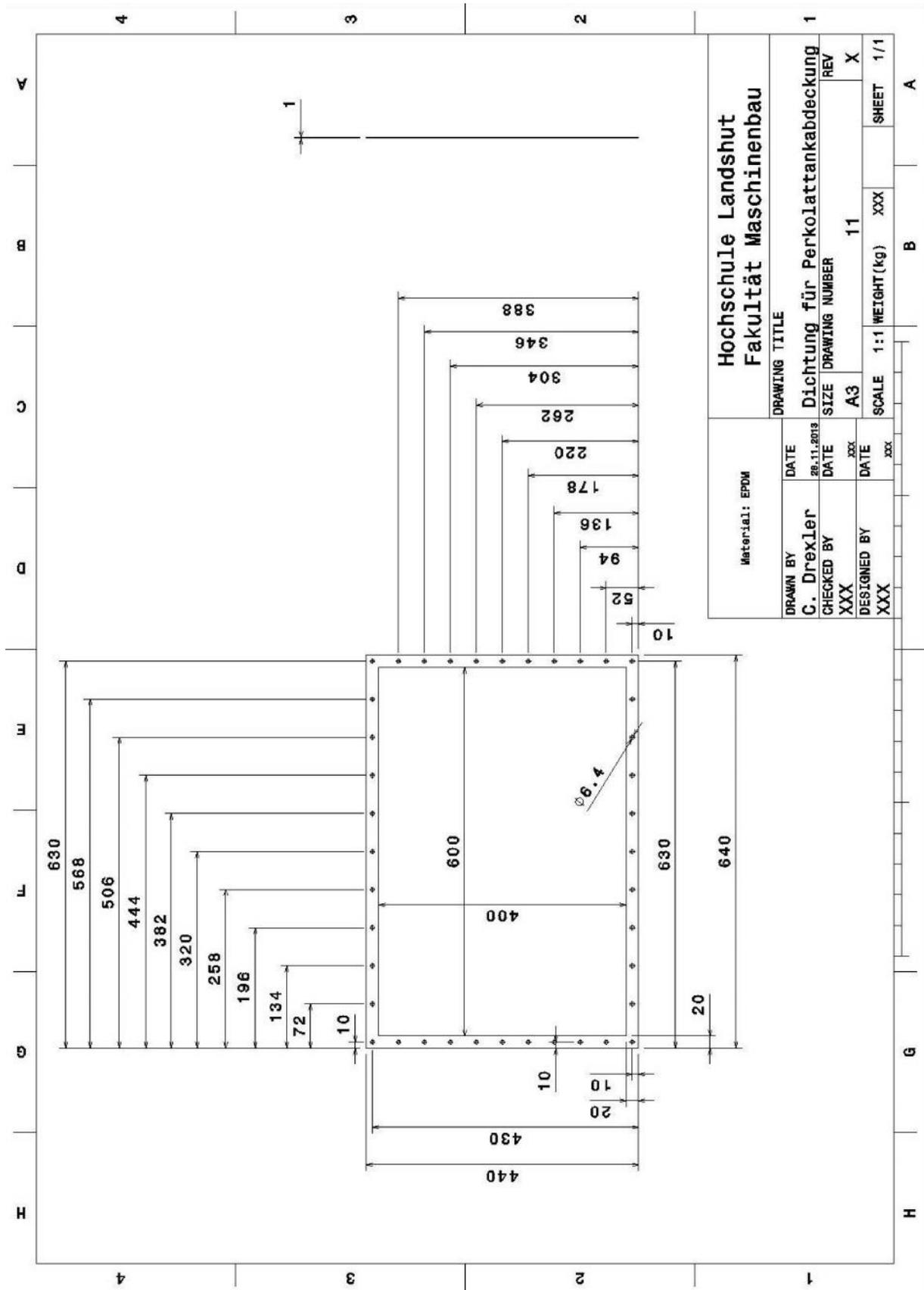
Allgemeintoleranz ISO 2768 - m

Material: PP		Hochschule Landshut Fakultät Maschinenbau	
DRAWING TITLE		Substratsieb	
DRAWN BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER
C. Drexler	06.11.2013	A3	6
CHECKED BY	DATE	SCALE	REV
XXX	xxx	1:1	X
DESIGNED BY	DATE	WEIGHT (kg)	SHEET
XXX	xxx	xxx	1/1









Anhang C: Stückliste

Tabelle 6: Stückliste Fermenter

Nr.:	Name	Anzahl	Bezeichnung	Bemerkung
4	Sumpf	1	Awaschacht PP-Boden DN 600	HTI-Bestellnummer: AWA6S8GD200
5	Fermenterrohr	1	Awaschacht PP Steigrohr DN 600	HTI-Bestellnummer: AWA6SR100
6	Substratsieb	1	PP-Platte 2 x 1 m Dicke: 20mm	HTI-Bestellnummer: PPH2120FG
7	Teleskopadapter	1	Awaschacht PP Teleskopadapter DN 600	HTI-Bestellnummer: AWA6TA
8	Fermenterdeckel	1	PP-Platte 2 x 1 m Dicke 3cm	HTI-Bestellnummer: PPH2130EG
9	Stäbe	4	Halbzeug Durchmesser 12mm	
10	Deckeldichtung	1	Gummiplatte EPDM 1,20m x 0,83m, Stärke 2mm	
13	Muffe DN 200	2	Muffenstopfen KGM DN 200	HTI-Bestellnummer: KGMS200
14	Muffenstopfen	2		HTI-Bestellnummer:
15	Dichtung-Fermenterrohr DN 600	2		IITI-Bestellnummer:
16	Temperaturmesssonden	2	Tauchfühler NiCr-Ni, Teflon	Phywe-Bestellnummer: 13615-05
18	Kugelhahn	1	Kugelhahn Typ 546 3/4" mit Gewindemuffe	HTI-Bestellnummer: PVCKH54620I
20	Schlauch dick	8m	PVC-Schlauch 19 x 3,5 mm 3/4"	IITI-Bestellnummer: SPVC1935
21	Schlauch dünn	5m	PVC Öl-, Benzinschlauch 13mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 110/613
25	Kabelbinder	30	Kabelhalteband D 51, L 203, B 3,6 mm, PA 6.6, schwarz, PLT2I-C30	Bürklin-Bestellnummer: 13 H 1018
26	Befestigungssockel	30	Befestigungssockel 4,0 mm ABMM AT CC, ABS, schwarz, hitzestabilisiert, für Außen	Bürklin Bestellnummer: 12 H 4784
27	Tankdurchführung mit AG	4	Tankdurchführung mit AG	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 3/06/4
28	Schlauchtülle mit IG 3/4" 19mm	2	Schlauchtülle mit IG 3/4" 19mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 370586
29	Schlauchtülle mit IG 3/4" auf 13mm	2	Schlauchtülle mit IG 3/4" auf 13mm	Schlauchprofi.de Bestellnummer: 346166
30	Schneckenwindeschelle groß	2	Schneckenwindeschelle 16-27mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 15200816
31	Schneckenwindeschelle klein	2	Schneckenwindeschelle 12-22mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 15200812
32	Tankdurchführung mit AG, einseitig	1	PE Tankdurchführung mit Außengewinde, einseitig	Schlauchprofi.de Bestellnummer: 9110064
40	Reduzierung 3/4" auf 3/8"	1		
33	3/4" Verbinder	1		
34	MC-Pralldüse	1	Vollkreis - Prall - Düse Type R 3/8" HW 30 in PVC	MC-GmbH-Bestellnummer: HW-3/8-30.PVC
35	M12 Mutter	4	Sechskantmuttern DIN 934 M12	Bauhaus
36	M12 Flügelmutter	4	Flügelmutter M12 DIN 315	Bauhaus
37	M12 Unterlegscheibe	4	Unterlegscheibe Form Λ; DIN 125 Λ M12	Bauhaus
24	Druckluftanschluss	1	Wanddose mit Innengewinde 3/4" und Kupplung NW7,2	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 422072

Tabelle 7: Stückliste Perkolattank

Nr.:	Name	Anzahl	Bezeichnung	Bemerkung
1	Perkolattank	1	Chemo; PE-Auffangwanne 250/2 mit 2 Kufen, ohne Gitterrost	HTI-Bestellnummer: HLHCHWE0101 (8282)
2	Perkolattankdeckel	1	PP-Platte 2 x 1 m Dicke 40mm	HTI-Bestellnummer: PPH2140EG
3	Abdeckung	1	PP-Platte 2 x 1 m Dicke 8mm	HTI-Bestellnummer: PPH218EG
20	Schlauch dick	8m	PVC-Schlauch 19 x 3.5 mm 3/4"	HTI-Bestellnummer: SPVC1935
25	Kabelbinder	8	Kabelhalteband D 51, L 203, B 3,6 mm, PA 6.6, schwarz, PLT2I-C30	Bürklin-Bestellnummer: 13 H 1018
26	Befestigungssockel	8	Befestigungssockel 4,0 mm ABMM-AT-C0, ABS, schwarz, hitzestabilisiert, für Außen	Bürklin-Bestellnummer: 12 H 4784
27	Tankdurchführung mit AG	4	Tankdurchführung mit AG	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 370674
28	Schlauchtülle mit IG 3/4" 19mm	7	Schlauchtülle mit IG 3/4" 19mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 370586
29	Schlauchtülle mit IG 3/4" auf 13mm	2	Schlauchtülle mit IG 3/4" auf 13mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 346166
11	Dichtung für Abdeckung	1	Gummiplatte EPDM 1,20m x 0,83m, Stärke 2mm	
30	Schneckengewindeschelle groß	7	Schneckengewindeschelle 16-27mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 15200816
31	Schneckengewindeschelle klein	2	Schneckengewindeschelle 12-22mm	Schlauchprofi.de-Bestellnummer: 15200812
22	Zylinderschrauben M6 x 20	40	Zylinderschraube M6 x 20; DIN 912/8.8	Bauhaus
23	Unterlegscheiben M6	40	Unterlegscheibe Form A; DIN 125 A M6	Bauhaus
17	Saugfilter	1	Gardena Saugfilter 3/4	<a href="http://www.amazon.de/Gardena-641726-Saugfilter-3-4/dp/B0001E3SZY/ref=sr_1_3?s=diy&amp;ie=UTF8&amp;qid=1377939208&amp;sr=1-3&amp;keywords=Gardena+Saugfilter">http://www.amazon.de/Gardena-641726-Saugfilter-3-4/dp/B0001E3SZY/ref=sr_1_3?s=diy&amp;ie=UTF8&amp;qid=1377939208&amp;sr=1-3&amp;keywords=Gardena+Saugfilter</a>
32	Tankdurchführung	1		
24	Druckluftanschluss	1		

Tabelle 8: Hilfsstoffliste

Nr.:	Name	Bezeichnung	Bemerkung
H1	2K-Kleber	Uhu 45585 - 2-Komponentenkleber Plus Endfest	<a href="http://www.amazon.de/Uhu-45585-2-Komponentenkleber-Plus-Endfest/dp/B000WGYSVO/ref=sr_1_1">http://www.amazon.de/Uhu-45585-2-Komponentenkleber-Plus-Endfest/dp/B000WGYSVO/ref=sr_1_1</a>
H2	Gleitmittel	Rehau-Gleitmittel 250 g	HTI-Bestellnummer: ARRRERE0101
H3	Vergussmasse	Vergussmassen Typ Wepuran VU 4457/51	Bürklin-Bestellnummer: 12 L 700
H4	Silikon-Klebe-/Dichtmasse	Silikon-Klebe-/Dichtmasse RTV 116, rot, 82,8 ml-Tube	Bürklin-Bestellnummer: 12 L 6975
H5	Silikonkleber	OTTOSEAL S 54 Spezial-Silicon B1	<a href="http://www.ebay.de/itm/22-55-L-OTTOSEAL-S-54-Spezial-Silicon-B1-Schwarz-Otto-Chemie-/400250659473?pt=DE_Heimwerker_Baustoffe&amp;hash=item5d30cc6291">http://www.ebay.de/itm/22-55-L-OTTOSEAL-S-54-Spezial-Silicon-B1-Schwarz-Otto-Chemie-/400250659473?pt=DE_Heimwerker_Baustoffe&amp;hash=item5d30cc6291</a>
H6	Primer	OTTO Primer 1216 Silicon-Metall-Grundierung	<a href="http://cgi.ebay.de/ws/eBayISAPI.dll?ViewItem&amp;item=400559747523&amp;ssPageName=ADME:L:COSI:DE:1123">http://cgi.ebay.de/ws/eBayISAPI.dll?ViewItem&amp;item=400559747523&amp;ssPageName=ADME:L:COSI:DE:1123</a>

