HOCHSCHULE LANDSHUT
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Konstruktion eines UASB-Reaktors zur Erzeugung von Biowasserstoff

Bachelorarbeit zum Erlangen des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Aufgabensteller:

Prof. Dr. rer. nat. Josef Hofmann

Zweitkorrektor:

Prof. Dr.-Ing. Peter Holbein

vorgelegt von: Paul Büschel

Ort, Datum: Landshut, 14.06.2015

Erklärung zur Bachelorarbeit

Name, Vorname des Studierenden: Paul Büschel

Matrikelnummer: 1000295

Hochschule Landshut, Fakultät Maschinenbau

Studiengang: Maschinenbau

Profilierungsrichtung: Energie- und Umwelttechnik

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit mit dem Thema

„Konstruktion eines UASB-Reaktors zur Erzeugung von Biowasserstoff“

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 Fachhochschulbibliothek zugänglich gemacht werden

☐ nach einer Sperrfrist von ..... Jahren über die Fachhochschulbibliothek zugänglich gemacht werden

Landshut, den ....

Unterschrift der/s Studierenden

Danksagung

Für die Unterstützung während der Arbeit, aber auch für das Engagement, mir ein Thema in meinem Interessensbereich anzubieten, möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Josef Hofmann bedanken. Nicht viele Bacheloranden haben die Möglichkeit, sich in dieser Weise kreativ mit ihren eigenen Ideen zu beschäftigen.

Des Weiteren möchte ich mich bei der Hinneburg GmbH für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit sowie für den Bau der Laboranlage bedanken. In diesem Zusammenhang gilt insbesondere Frau Schleh mein Dank, da sie meine Anfragen zu Konstruktionsdetails stets schnell und kompetent beantwortet hat.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und Freunden bedanken, die mich bei Aufbaufragen und Korrekturarbeiten unterstützt haben. Besonderer Dank gilt meiner Großmutter, die oft für das kulinarische Wohl während der Erstellung gesorgt hat.

Aufgabenstellung

Im Rahmen eines Projekts zur hydrothermalen Karbonisierung (HTC) von Landschaftspflegegras im Raum Moosburg soll der Abwasseranteil des Prozesses in einem weiteren Schritt behandelt werden. Es ist vorgesehen, aus dem anfallenden Abwasserstrom mittels mikrobieller Dunkelfermentation biologischen Wasserstoff zu gewinnen und somit den Gesamtwirkungsgrad des Verfahrens zu erhöhen. Dafür kommt ein UASB-Reaktor (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), der bei 70°C betrieben werden soll, zum Einsatz.

In der folgenden Arbeit soll für erste Versuche zur Wasserstoffgewinnung ein einfacher, möglichst störunauffälliger und preiswerter Konstruktionsvorschlag eines UASB-Reaktors mit 5 Liter Arbeitsvolumen vorgelegt werden, welcher später im Energie- und Umwelttechnik-Labor der Hochschule Landshut betrieben werden soll. Eine Anlage zur thermophilen Wasserstofffermentation der Firma Tintschl GmbH soll hierfür als Vorlage dienen.

Weiterhin werden verschiedene Reaktorentwürfe vorgestellt und im Zusammenhang mit dem Vorhaben bewertet. Zur Leistungsbewertung des Laborreaktors wird eine geeignete Messinstrumentierung zur Gasanalyse ausgewählt.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung zur Bachelorarbeit ..... **ii**

Danksagung ..... **iii**

Aufgabenstellung ..... **iv**

Abbildungsverzeichnis ..... **vii**

Tabellenverzeichnis ..... **vii**

Abkürzungsverzeichnis ..... **viii**

Literaturverzeichnis ..... **ix**

1 Einleitung **1**

2 Prozess der Dunkelfermentation zur Wasserstofferzeugung **2**

2.1 Phasen der Vergärung 2

2.2 Theoretische Wasserstoffausbeute 4

2.3 Einflussmöglichkeiten zur Erhöhung der Wasserstoffausbeute 5

2.3.1 Substrat 5

2.3.2 Inokulum 6

2.3.3 Temperatur 7

2.3.4 pH-Wert 8

3 UASB-Reaktoren **9**

3.1 Hintergrund 9

3.2 Funktionsweise 10

3.3 Auslegung eines UASB-Reaktors 11

3.4 Weiterentwicklung der UASB-Technik 14

4 Analyse des Reaktors der Tintschl-GmbH **15**

4.1 Hintergrund 15

4.2 Funktion 15

4.3 Aufbau und Verfahrensfließbild 17

4.4 Probleme und Beurteilung 19

5 Konstruktion eines UASB-Reaktors im Labormaßstab **20**

5.1 Anforderungen 20

5.2 Konzeption 22

5.2.1 Verfahrensfließbild 22
5.3 Entwurf 23
5.3.1 Reaktorgeometrie 23
5.3.2 Einlaufsystem 24
5.3.3 Dreiphasenabscheider 24
5.3.4 Heizsystem 25
5.4 Bewertung und Auswahl der Entwürfe 26
5.5 Ausarbeitung des Reaktorentwurfs 28
5.5.1 Reaktorhülle 28
5.5.2 Heizsystem 30
5.5.3 Einlaufsystem 32
5.5.4 Dreiphasenabscheider 33
5.5.5 Isolierung und Aufständerung 34
5.5.6 Gesamtübersicht 35
5.6 Weitere betriebsnotwendige Anlagenteile 36
5.6.1 Pumpensystem 36
5.6.2 Gasfangsack 38
5.6.3 Manometer 39
5.6.4 Temperatur 40

6 Analysemethoden 40
6.2 Chemischer Sauerstoffbedarf 41
6.3 organische Säuren 41
6.4 Wasserstoff 42
6.6 Kohlenstoffdioxid 42

7 Zusammenfassung 43

8 Fazit 44

Anhang A: Konstruktionszeichnungen 45

Anhang B: Stückliste 56

Anhang C: Angebote Pumpen 57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus [3] 3
Abbildung 2: Vorbehandlungsmaßnahmen bei Impfschlämmen [10] 6
Abbildung 3: Gliederung anaerober Verfahren [9] 9
Abbildung 4: Aufbau eines UASB – Reaktors [9] 10
Abbildung 5:Beziehung der CSB-Belastung zu Reaktorvolumen [16] 12
Abbildung 6: Biobed® EGSB-Reaktor; Innen- und Außenansicht [13] 14
Abbildung 7: Reaktorkonzepte zur Abwasserbehandlung [19] 16
Abbildung 8: CAD-Modell des Tintschl-Reaktors [18] 17
Abbildung 9: Verfahrensfließbild des Fermenterbereichs [18] 18
Abbildung 10: Begasungsvorrichtung im Inneren des Fermenters 18
Abbildung 11: Verfahrensfließbild UASB-Reaktor 22
Abbildung 12: Entwurf der Reaktorgeometrie 23
Abbildung 13: Entwurf des Einlaufsystems 24
Abbildung 14: Entwurf des Dreiphasenabscheiders 24
Abbildung 15: Entwurf der Heizung 25
Abbildung 16: Modell der Reaktorhülle 28
Abbildung 17:Heizwendel aus Kupfer und Schnitt durch die Doppelwand des Fermenters ... 30
Abbildung 18: Laborheizung Lauda NB/D8/17 Foto: Bachelorarbeit Christian Drexler 31
Abbildung 19: Schnitt durch das Einlaufsystem 32
Abbildung 20: Schnitt durch den oberen Reaktorteil 33
Abbildung 21: Aufständerung und Isolierung 34
Abbildung 22: Explosionsansicht des Reaktors 35
Abbildung 23: Spektralphotometer DR 3900 Hach Lange 40
Abbildung 24: Funktionsprinzip des Wärmeleitfähigkeitsdetektors [30] 42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Richtlinie zur Anzahl benötigter Einlassöffnungen [16] 13
Tabelle 2: Anforderungsliste UASB-Reaktor 20
Tabelle 3: Bewertungsmatrix 26

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
$C_6H_{12}O_6$	Glucose
$CH_3CH_2CH_2COOH$	Buttersäure
CH_3CH_2COOH	Propionsäure
$CH_3CHOHCOOH$	Milchsäure
CH_3COOH	Essigsäure
CH_4	Methan
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
d	Tag
EGSB	expanded granular sludge blanket
g	Gramm
h	Stunde
H_2	Wasserstoff
HRT	hydraulic retention time
HTC	Hydrothermale Karbonisierung
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramm
l	Liter
m	Meter
min	Minute
mm	Millimeter
Mol	Stoffmenge
O_2	Sauerstoff
oTR	organischer Trockenrückstand
Pa	Pascal
UASB	upflow anaerobic sludge blanket

Literaturverzeichnis

[1] Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. nachwachsende-rohstoffe.de. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2004

[2] Rechtenbach, D.: Fermentative Erzeugung von Biowasserstoff aus biogenen Roh- und Reststoffen. Hamburger Berichte, Bd. 34 : Abfallwirtschaft. Stuttgart: Verl. Abfall Aktuell 2009

[3] Brunstermann, R.: Entwicklung eines zweistufigen anaeroben Verfahrens zur kontinuierlichen Wasserstoff- und Methanerzeugung aus organischen Abfällen und Abwässern. Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität Essen, H. 36. Aachen: Shaker 2010

[4] Gülzower Fachgespräch: Wasserstoff aus Biomasse. Gülzower Fachgespräche, Bd. 25. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) 2007

[5] Kaltschmitt, M., Hartmann, H. u. Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, New York: Springer 2009

[6] Barca, C., Soric, A., Ranava, D., Giudici-Orticoni, M.-T. u. Ferrasse, J.-H.: Anaerobic biofilm reactors for dark fermentative hydrogen production from wastewater: A review. Bioresource Technology 0

[7] Stemann, J.: Hydrothermale Carbonisierung: Stoffliche und energetische Kreislaufführung, TU-Berlin Dissertation. Berlin 2013

[8] Kroiss, H. u. Österreichischer Wasserwirtschaftsverband: Anaerobe Abwasserreinigung - Grundlagen und großtechnische Erfahrung. Wiener Mitteilungen Wasser, Abwasser, Gewässer, Bd. 73. Wien: Technische Univ. Wien, Inst. für Wassergüte und Landschaftswasserbau 1988

[9] Bischofsberger, W.: Anaerobtechnik. Berlin: Springer 2005

[10] Wong, Y. M., Wu, T. Y. u. Juan, J. C.: A review of sustainable hydrogen production using seed sludge via dark fermentation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 34 (2014) 0, S. 471–482

[11] Europäische Kommission: Eine "offene Lösung" für die nachhaltige Wasseraufbereitung, 2010. http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/experts-interviews/472_de.htm, abgerufen am: 17.04.2015

[12] Dr. Brigitte Helmreich, David Martinez, Prof. Dr. Harald Horn: BMBF-Abschlussbericht. Entwicklung eines anaeroben Hochleistungsreaktors zur Behandlung von kommunalen Abwasser mit Hilfe einer Ultrafiltrationsmembran bei mesophilem und psychrophilem Betrieb, TU München Bericht. München 2010

[13] Christian Kiechle: Langjährige Betriebserfahrungen mit den Biothane Verfahren in der Papierindustrie. Wochenblatt für Paperfabrikation (2011) 9, S. 740–743

[14] Lettinga, G.: Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. Antonie van Leeuwenhoek 67 (1995) 1, S. 3–28

[15] Liu, Y., Xu, H.-L., Yang, S.-F. u. Tay, J.-H.: Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor. Water Research 37 (2003) 3, S. 661–673

[16] Lettinga, G. u. Hulshoff, L. W. (Hrsg.): UASB-Process design for various types of wastewaters. 24, Water Science & Technology. Great Britain: IWA Publishing 1991

[17] TU Hamburg Harburg: Design considerations of the UASB reactor. http://cgi.tu-harburg.de/~aw-wweb/wbt/emwater/lessons/lesson_b3/lm_pg_1300.html, abgerufen am: 23.04.2015

[18] Tintschl GmbH: Dokumente der Tintschl GmbH

[19] Medhat M. A. Saleh u. Usama F. Mahmood (Hrsg.): UASB/EGSB Applications for Industrial Wastewater Treatment. 2003

[20] Wasser-Wissen u. Das Internetportal für Wasser und Abwasser: Festbettreaktor. http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/f/festbettreaktor.htm, abgerufen am: 27.04.2015

[21] Grote, K.-H. u. Feldhusen, J.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014

[22] Wikipedia: Edelstahl. http://de.wikipedia.org/wiki/Edelstahl, abgerufen am: 19.05.2015

[23] ESSKA: Silikonschläuche. http://www.esska.de/esska_de_s/Silikonschlaeuche-60-Shore-ID-6-0-bis-8-9mm-transluzent/unverstaerkt-707112089000-6990.html, abgerufen am: 20.05.2015

[24] Böge, A.: Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner in GWV Fachverlage GmbH 2009

[25] Wikipedia: Schlauchpumpe, http://de.wikipedia.org/wiki/Schlauchpumpe, abgerufen am: 22.05.2015

[26] Klappbares Periodensystem der Elemente. (Periodensystem) der Atomarten nach Helmut Kohler, Hermann Fischer. München: Bayerischer Schulbuch-Verl 2013

[27] Wikipedia: Gaskonstante. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gaskonstante&redirect=no#Spezifische_Gaskonstante, abgerufen am: 23.05.2015

[28] Gujer, W.: Siedlungswasserwirtschaft. Mit 84 Tabellen. Berlin [u.a.]: Springer 2007

[29] Wikipedia: Wärmeleitfähigkeitsdetektor. http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeitsdetektor, abgerufen am: 23.05.2015

[30] Cerbe, G.: Grundlagen der Gastechnik. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. Studienbücher der technischen Wissenschaften. München u.a.: Hanser 1988

[31] Hedinger: Biowasserstoff-Set. http://www.der-hedinger.de/produkte/unterrichtseinheiten-biologie/enzymatik/artikel/HH_100.html, abgerufen am: 26.05.2015

1 Einleitung

Angesichts der unabwendbaren Tatsache endlicher fossiler Reserven auf der Erde sowie im Interesse der Vereinten Nationen zur Erfüllung von Klimaschutzzielen müssen Alternativen zur heutigen Energiewirtschaft gefunden werden. Dabei kann nicht auf eine einzelne Erfindung zur Lösung aller gegenwärtigen Probleme gewartet, sondern es muss einer Vielzahl einzelner Lösungsansätzen nachgegangen werden.

Eine Möglichkeit stellt die fermentative Herstellung des chemischen Energieträgers Wasserstoff dar. Ähnlich dem Verfahren zur Biogaserzeugung, welches erprobt und weit verbreitet ist, kann anstelle des Methans Wasserstoff hergestellt werden. Dazu müssen lediglich bestimmte Parameter des herkömmlichen Prozesses umgestellt werden, ansonsten kommt die konventionelle Technik zur Biogaserzeugung, wie beispielsweise ein UASB-Reaktor zum Einsatz. Diese gängige Anlage zur Abwasserreinigung wird bei Substraten mit niedrigen Feststoffgehalten eingesetzt und ist daher ideal geeignet, die wässrige Lösung der hydrothermalen Karbonisierung nachzubehandeln.

Gasförmiger Wasserstoff bietet durch seine Vielseitigkeit einen großen Vorteil: Er kann durch bekannte Umwandlungsschritte sowohl stofflich, zum Beispiel zur Kunststoffherstellung, als auch über eine Synthese zu Methanol, Diesel- oder Kerosinersatzstoffen energetisch genutzt werden und ist damit in der Lage, den herkömmlichen Ausgangsstoff dieser Produkte, das Rohöl, vollständig zu ersetzen. Zudem sind bisherige hochentwickelte Technologien des Mobilitäts- und Industriesektors ohne größere Anpassungen weiterhin nutzbar.

Die Biowasserstoffherstellung mag heute noch unwirtschaftlich sein, kann aber in der Zukunft, beispielsweise unter Einsatz von organischen Rest- und Abfallstoffen, seinen Beitrag zur Energiewende leisten.

2 Prozess der Dunkelfermentation zur Wasserstofferzeugung

2.1 Phasen der Vergärung

Die konventionelle Biogasproduktion basiert auf der Grundlage des anaeroben Abbaus (Vergärung) [1]. Durch die bakterielle Verwertung von Biomasse und Wasser unter Luftabschluss kann als Endprodukt CH_4 und CO_2 gewonnen werden. Dieser biologische Prozess gliedert sich in vier Phasen:

- Hydrolyse
- Acidogenese (Versäuerungsphase)
- Acetogenese (Essigsäurebildung)
- Methanogenese

Um jedoch eine fermentative Erzeugung von Bio-H_2 zu erreichen, muss der Prozess für dessen Produktion angepasst werden. Dies wird in der folgenden Beschreibung der Phasen näher erläutert:

In der Hydrolyse wird die aus komplexeren Verbindungen bestehende Biomasse (Fette, Kohlenhydrate, Proteine) in einfachere organische Verbindungen wie Aminosäuren, Zucker oder Fettsäuren zerlegt. Für den gesamten Prozess der Vergärung ist dieser Schritt meist geschwindigkeitsbestimmend [2]. Um den Ablauf der Hydrolyse auf die Produktion von Wasserstoff zu optimieren, sollte ein pH-Wert < 6 vorliegen. Daher ist ein Einsatz von proteinreichen Substraten nicht zu empfehlen (pH-Wert 7-7,5) [3].

Die entstandenen Zwischenprodukte werden anschließend in der Acidogenese von säurebildenden Bakterien zu kurzkettigen Fettsäuren, organischen Säuren (Essig-, Propion- und Buttersäure), Wasser sowie CO_2 und H_2 umgewandelt. Weiterhin werden zu geringen Teilen Alkohole, Milchsäure und Ammoniak erzeugt [1, 2]. Entscheidend auf die Wasserstoffbildung wirkt sich hier der Wasserstoffpartialdruck aus. Nur bei niedrigen Drücken entsteht in der Acidogenese mehrheitlich Essigsäure, dessen Entstehung die höchsten H_2-Erträge als „Nebenprodukt“ bewirkt. Ist dies nicht der Fall, so wird die Produktion von Propion-, Milch- und Buttersäure begünstigt. Hierbei fällt weniger, oder im Fall der Milchsäure, gar kein Wasserstoff an. Zudem

können durch Milchsäurebakterien produzierte Zwischenprodukte toxische oder hemmende Auswirkungen auf die Wasserstoffbildner haben [4, 5].

In der Acetogenese werden die restlichen organischen Säuren (Propion- und Buttersäure) unter Freisetzung von Wasserstoff zu Essigsäure umgewandelt. Auch hier sind die acetogenen Bakterien auf einen niedrigen Wasserstoffdruck angewiesen, hemmen sich also durch ihr eigenes Stoffwechselprodukt H_2 selbst [2].

Die letzte Phase der Vergärung, die Methanogenese, muss für die erfolgreiche Herstellung von Biowasserstoff unterdrückt werden, da dieser nur in der Acidogenese und Acetogenese entsteht. Die Möglichkeiten dazu werden in Kapitel 2.3.2 behandelt. Im abschließenden Schritt der Biogasproduktion werden sowohl Wasserstoff und Kohlendioxid als auch Essigsäure zu Methan umgewandelt. Dabei wird rund 70 % der CH_4-Produktion durch die Spaltung von Essigsäure zu CO_2 erreicht, die restlichen 30 % entstehen durch die Umwandlung von H_2 und CO_2 zu CH_4 und Wasser [5]. Da es sich bei der ausschließlichen fermentativen Produktion von Wasserstoff um eine unvollständige Oxidation handelt, ist eine weitere Verwendung der restlichen Biomasse sinnvoll [4].

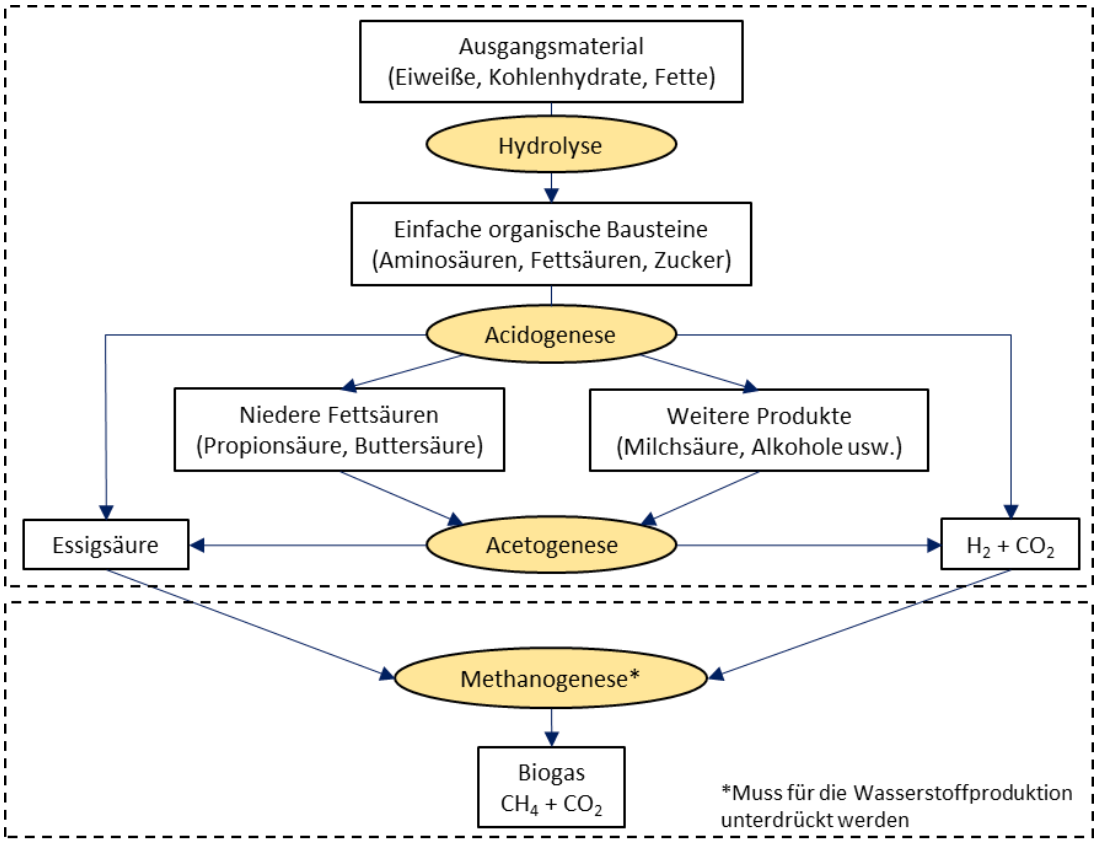


Abbildung 1: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus [1]

2.2 Theoretische Wasserstoffausbeute

Für erste Versuche soll Glucose (Traubenzucker) als Substrat im Anaerob-Reaktor eingesetzt werden. Dieses leicht abbaubare Monosaccharid ist Baustein vieler Kohlenhydrate und verspricht die höchsten Gasausbeuten im Laboreinsatz [4].
Erfolgt eine komplette Umsetzung von Glucose zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid, so ergibt sich folgende Summenformel:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,H_2O \rightarrow 6\,CO_2 + \mathbf{12\,H_2} \qquad \text{(Gl. 1)}$$

Der Wert von 12 mol H_2 pro mol Glucose ließe sich nur erreichen, wenn die entstandene Essigsäure vollständig umgesetzt würde. Dies ist jedoch nur bei Wasserstoffpartialdrücken von unter 1 mbar möglich und damit nicht relevant [3]. Die maximale theoretische Wasserstoffausbeute ergibt sich daher aus der Produktion des Stoffwechselprodukts Essigsäure (CH_3COOH) und beträgt 4 mol H_2 / $C_6H_{12}O_6$ (Gl. 2). Bei der reinen Entstehung von Buttersäure ($CH_3CH_2CH_2COOH$) sinkt der Wert auf 2 mol H_2 / $C_6H_{12}O_6$ (Gl. 3) und bei Propionsäure (CH_3CH_2COOH) auf 1,5 mol H_2 / $C_6H_{12}O_6$ (Gl. 4) [2].

$$C_6H_{12}O_6 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,CH_3COOH + 2\,H_2O + 2\,CO_2 + \mathbf{4\,H_2} \qquad \text{(Gl. 2)}$$

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2\,CO_2 + \mathbf{2\,H_2} \qquad \text{(Gl. 3)}$$

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow \frac{3}{2}\,CH_3CH_2COOH + \frac{3}{2}\,CO_2 + \mathbf{\frac{3}{2}\,H_2} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

Die Produktion von Milchsäure ($CH_3CHOHCOOH$) setzt hingegen keinen Wasserstoff frei:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\,CH_3CHOHCOOH \qquad \text{(Gl. 5)}$$

Da jedoch beim anaeroben Abbau von Glucose meist sowohl Essigsäure als auch Buttersäure entstehen, lässt sich die Wasserstoffausbeute bei gemeinsamer Produktion auf 2,5 mol H_2 / $C_6H_{12}O_6$ (Gl. 6) beziffern. Somit kann das Verhältnis der Säuren als Indikator für die Produktivität der Biowasserstoffherstellung herangezogen werden. Werden zudem die Anteile an Propion- und Milchsäure betrachtet, fällt der Anteil an Bio-H_2 geringer aus [2].

$$4\,C_6H_{12}O_6 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,CH_3COOH + 3\,CH_3CH_2CH_2COOH + 8\,CO_2 + \mathbf{10\,H_2} \qquad \text{(Gl. 6)}$$

2.3 Einflussmöglichkeiten zur Erhöhung der Wasserstoffausbeute

2.3.1 Substrat

Grundsätzlich eignet sich eine Vielzahl von Stoffen zur Verwendung als Substrat für die fermentative Biowasserstofferzeugung. Im Großteil der durchgeführten Studien wird auf Glucose oder Saccharose zurückgegriffen, aber auch Abwässer mit komplexeren Kohlehydraten wie Vinasse, Molasse oder Molkereiabwasser wie Käsemolke werden verwendet [6]. In der Doktorarbeit von Dorothea Rechtenbach werden hingegen biogene Reststoffe (Mais, Kartoffelstärke, Zuckerrübe, Steckrübe, Kartoffelschale usw.) auf ihren maximalen Wasserstoffertrag hin untersucht [2].

Eine wissenschaftliche Untersuchung zur Wasserstoffgewinnung aus dem Prozesswasser der hydrothermalen Karbonisierung ist jedoch bisher noch nicht erfolgt und soll daher, nach erfolgreichen Testdurchläufen mit Glucose, dem Laborreaktor als Substrat zugeführt werden. Dieses Abwasser ist reich an gelösten Kohlenstoffen und sollte sich daher zur Herstellung von Biogas eignen. Ein Problem zur Produktion von Wasserstoff stellt der hohe Anteil organischer Säuren (Essigsäure, Glycolsäure, Ameisensäure) im HTC-Prozesswasser dar [7]. Diese können von Wasserstoffbildnern nicht weiter katalysiert werden (siehe Kapitel 2.1, 2.2).

Das Substrat muss sich für eine korrekte Funktionsweise des UASB-Reaktors in flüssiger Form mit möglichst gelösten Kohlenhydraten befinden. Feststoffe behindern die Bildung von charakteristischen Pellets im Schlammbett des Reaktors und hemmen damit die bakteriellen Aktivitäten [8]. In der konventionellen Abwasserbehandlung durch das UASB-Verfahren herrscht bezogen auf das gesamte Reaktorwasservolumen im Mittel ein oTR von 25 kg/m^3. Die CSB-Raumbelastung beträgt dabei je nach Abbaubarkeit des Substrates zwischen 8-15 kg/m^{3}d [9]. Rechtenbach erzielte mit 10 kg/m^3 oTR Glucose die höchsten Wasserstoffausbeuten im Batchbetrieb [2]. Für die ersten Laborversuche sollte daher mit dieser Menge Glucose begonnen werden.

2.3.2 Inokulum

Durch das Inokulum, auch Impfschlamm genannt, werden die nötigen Bakterien zur Wasserstofffermentation eingebracht. Diese können aus Reinkulturen (z.B. *Thermoanaerobacter thermohydrosulfuricus*, *Clostridium stercorarium* usw.) oder aus Mischkulturen stammen. Da Reinkulturen aufgrund der Gefahr von mikrobiellen Verunreinigungen eine sterile Umgebung benötigen, bieten Mischkulturen den Vorteil der unkomplizierten Handhabung [2]. Weitere Argumente für den Einsatz von Mischkulturen sind ein unempfindliches Verhalten auf Temperatur- und Substratschwankungen im Prozess sowie eine höhere Gasausbeute bei komplexeren Kohlehydraten [10]. Da H_2-bildende Bakterien so gut wie überall in der Natur vorkommen, wie beispielsweise im Verdauungstrakt von Tieren oder im Boden, kann bei der Beschaffung auf Klärschlamm oder Komposterde zurückgegriffen werden [2].

Um die mikrobielle Aktivität einer Mischkultur auf die Wasserstoffproduktion zu beschränken, müssen methanogene Bakterien aus den eingesetzten Inokula abgetötet werden. Folgende Vorbehandlungsmaßnahmen aus Abbildung 2 bieten sich dafür an:

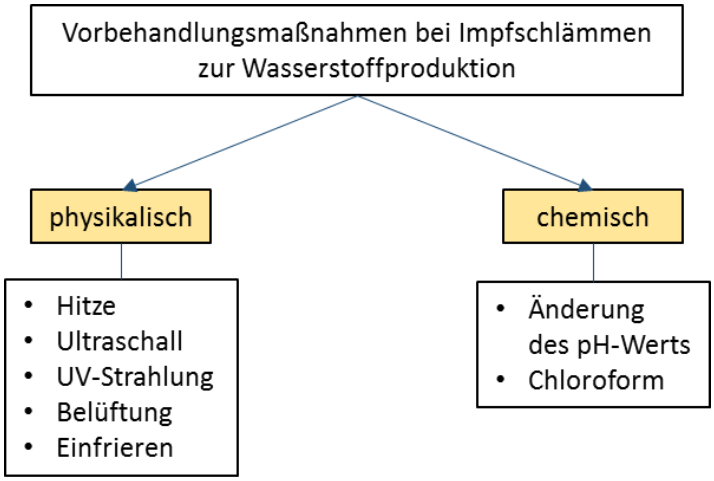


Abbildung 2: Vorbehandlungsmaßnahmen bei Impfschlämmen [10]

Versuche haben gezeigt, dass die Methode der Hitzevorbehandlung am vielversprechendsten ist. Die höchste Wasserstoffausbeute wurde durch Inokula erzielt, die entweder einer Temperatur von 100 °C bei 15 min oder einer Temperatur von 65 °C bei 30 min ausgesetzt waren [10]. Da der UASB-Reaktor im thermophilen Bereich betrieben werden soll (ca. 70 °C), könnte auf eine Vorbehandlung des Impfschlamms verzichtet werden. Das unbehandelte Inokulum würde durch die hohen Prozesstemperaturen von Methano-Bakterien separiert.

2.3.3 Temperatur

Grundsätzlich lassen sich Bakterien für anaerobe Prozesse in drei Temperaturbereiche einteilen, die sich ideal für deren Wachstum darstellen:

- psychrophile Bakterien mit einem Temperaturoptimum von etwa 25 °C
- mesophile Bakterien mit einem optimalen Temperaturbereich von 35 °C - 43 °C
- thermophile Bakterien mit einem Optimum von etwa 57 °C.

Der Prozess im UASB-Reaktor soll im thermophilen Bereich ablaufen. Vorteile dieser Bedingungen sind schnellere Wachstumsraten, eine mögliche Hygienisierung des Substrats, kürzere Durchlaufzeiten und eine schlechtere Löslichkeit von Sauerstoff sowie Wasserstoff [10] im flüssigen Substrat für eine absolut anaerobe Umgebung und niedrigen Wasserstoffpartialdrücken. Wie im Fall der hydrothermalen Karbonisierung [7] lässt sich weiterhin das hohe Temperaturniveau eines Abwassers nutzen [5].

Die Frage nach der optimalen Temperatur zur fermentativen Wasserstofferzeugung mit Mischkulturen lässt sich jedoch nicht eindeutig beantworten. Selbst unter den thermophilen Bakterienstämmen reichen die Temperaturvorlieben von 55°C bis 75°C. Daher müssen Versuche zeigen, welche Temperatur die höchsten Wasserstofferträge bringt. Fest steht nur, dass unter thermophilen Bedingungen die besten Ergebnisse erzielt wurden [2].

2.3.4 pH-Wert

Der pH-Wert gibt die Konzentration von Wasserstoff- (H^+) oder Hydroxidionen (OH^-) in einer wässrigen Lösung an und informiert damit über ein saures oder basisches Milieu [9]. Wie bei den Temperaturbedingungen auch, haben die H_2-bildenden Bakterien unterschiedliche Ansprüche an den pH-Wert. Die meisten bevorzugen, ähnlich wie ihre methanogenen Verwandten, einen pH-Wert zwischen 6,4 und 7,8 [2]. Allerdings beeinflussen bei einstufigen Verfahren die vorangegangenen Schritte des anaeroben Abbaus (z.B. Hydrolyse) das Milieu des Gesamtprozesses [9]. Idealerweise stellt sich daher automatisch ein günstiger pH-Wert ein, dieser liegt für einen maximalen Ertrag von Wasserstoff bei pH 5,5 - 6 [2].

Sollte dennoch eine starke Versauerung auftreten, bietet es sich zuerst an, den CSB-Wert durch die Menge an neu eingebrachtem Substrat zurückzufahren [9]. Weiterhin besteht die Möglichkeit, mittels Puffersubstanzen wie Carbonat oder Phosphat Einfluss auf den pH-Wert zu nehmen. Bei der Verwendung von Glucose als Substrat hat der Einsatz des Carbonatpuffers Jura Perlen ($CaCO_3$; 100 g/l) eine geringere Produktion von Milchsäure und damit eine Steigerung der Wasserstoffausbeute zur Folge [2].

3 UASB-Reaktoren

3.1 Hintergrund

Der UASB-Reaktor, auch bekannt als Schlammbett- bzw. Schlammdeckenreaktor, wurde Anfang der siebziger Jahre von Lettinga et al. entwickelt. Zweck des Systems ist die Reinigung von industriellen und in untergeordneter Rolle auch kommunalen Abwässern [11]. Der Reaktortyp kann den biomasseanreichernden Verfahren zugeordnet werden, der Aufbau von bakteriellen Kulturen erfolgt in Pelletform (siehe Abbildung 3).

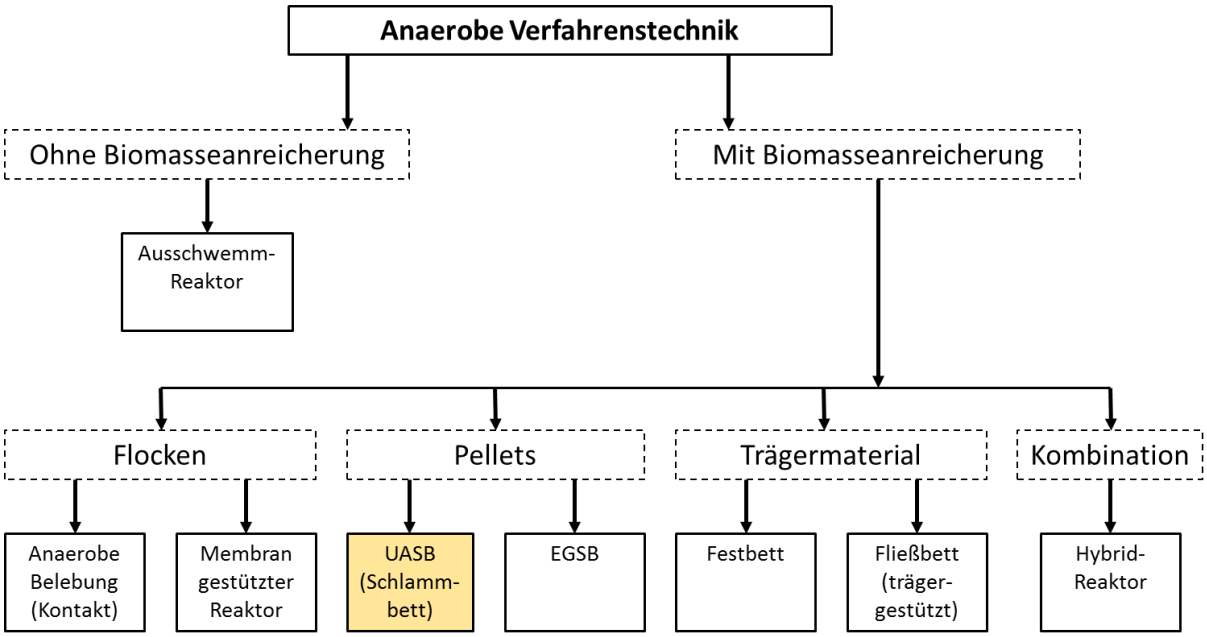


Abbildung 3: Gliederung anaerober Verfahren [9]

Der hauptsächliche Einsatz unter mesophilen Temperaturbedingungen sowie der einfache Aufbau eines UASB-Reaktors begünstigen den Einsatz in warm gelegenen Entwicklungs- und Schwellenländern wie Indien, Kolumbien, Vietnam oder Brasilien. Doch auch in Deutschland werden aufwärts durchströmte Schlammbettreaktoren verwendet, bisher jedoch nur bei industriellen Abwässern. 2009 befanden sich laut deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) 54 UASB-Reaktoren im Einsatz. 40 % der Anlagen sind der Papierindustrie zuzuordnen [12]. Die Unternehmen profitieren von einer deutlich geringeren Abwassergebühr, der Produktion von Biogas als Energieträger, weniger entsorgungspflichtigem Überschussschlamm und einer Wassereinsparung durch Rückführung der behandelten Abwässer in den Produktionsprozess [13].

3.2 Funktionsweise

Der mit einer runden oder rechteckigen Grundfläche ausgeführte Reaktor wird von unten mit Abwasser beschickt. Um einen möglichst gleichmäßigen Aufstrom des Abwassers zu erreichen, werden mehrere Einläufe im Reaktorboden installiert. Somit kann eine günstige Durchmischung des Abwassers mit der bestehenden Biomasse gewährleistet sowie eine Kanalbildung in der Flüssigkeitssäule vermieden werden [8]. Nach einer drei- bis fünfmonatigen Einlaufphase [14] agglomerieren sich Anaerob-Bakterien im unteren Bereich des Reaktors zu Pelletstrukturen mit einem Durchmesser von 1 - 3 mm. Für Entstehung dieser Formbildung existieren mehrere Theorien [15], die genaue Ursache ist bisher nicht bekannt. Diese Pellets bilden ein Schlammbett aus Biomasse, welches in etwa die Hälfte der Reaktorhöhe einnimmt. Die Abwässer strömen von unten nach oben durch dieses Schlammbett, wodurch die organischen Verbindungen unter Freisetzung von Methan und CO_2 abgebaut werden. Die aufsteigenden Gasblasen sorgen dabei stets für eine ausreichende Durchmischung im Tank, sodass auf mechanische Rührwerke verzichtet werden kann. Im oberen Teil wird das Gas von Dreiphasenabscheidern aufgefangen und aus dem Reaktor abgeführt. Gleichzeitig wird der Schlamm von den Abscheidern zurückgehalten und nach unten abgelenkt. Nur durch eine korrekte Funktionsweise der Abscheider kann gewährleistet werden, dass keine Biomasse aus dem Reaktor ausgeschwemmt wird. Das Wasser hingegen passiert die Vorrichtung und verlässt die Anlage über einen Abfluss [9].

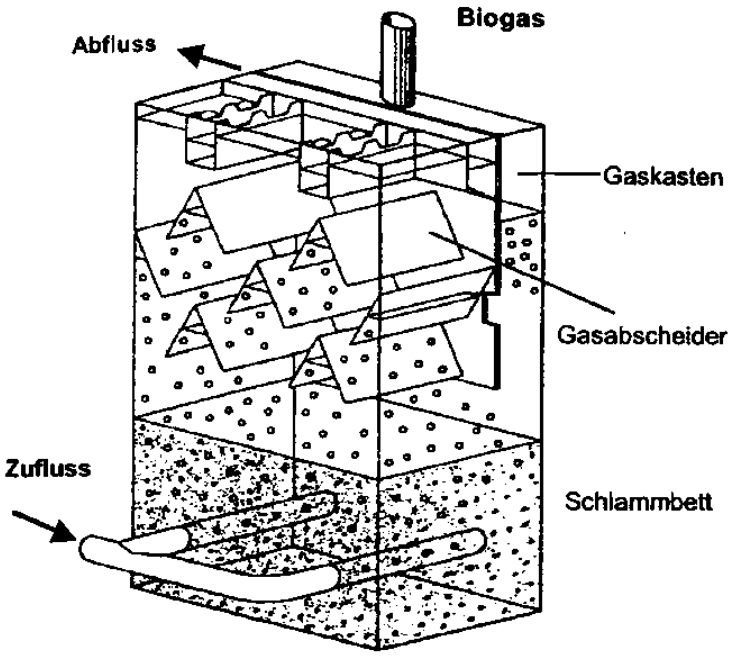


Abbildung 4: Aufbau eines UASB-Reaktors [9]

3.3 Auslegung eines UASB-Reaktors

Die Auslegung eines konventionellen UASB-Reaktors zur Abwasserreinigung gliedert sich in die drei Hauptbereiche Reaktorvolumen, Einlaufsystem und Dreiphasenabscheider:

Erforderliches Reaktorvolumen:
Das Volumen wird vornehmlich durch die höchste Tagesfracht an Abwasser festgelegt. Die zulässige tägliche CSB-Raumbelastung des Reaktors ist dabei die bestimmende Größe in der Auslegung. Der gängige Wert liegt bei 10 kg/m^{3}d, es werden jedoch auch Anlagen mit 4 bis 15 kg/m^{3}d betrieben. Sind die Abwasserinhaltsstoffe leicht abbaubar, kann die Raumbelastung hoch ausfallen, bei schwer abbaubaren Stoffen muss ein niedrigerer Wert zugrunde gelegt werden [9].

Bei kleineren CSB-Belastungen sind die hydraulische Aufenthaltszeit (HRT = hydraulic retention time), also die Verweilzeit des Abwassers im Reaktor, wie auch der durchschnittlich zugeführte Volumenstrom wichtige Parameter zur Berechnung des Volumens (Gl. 7) [16]:

$$\Theta = \frac{V}{Q} \qquad \text{(Gl. 7)}$$

$\Theta = HRT\ [h]$

$V = \ erforderliches\ Reaktorvolumen\ [m^3]$

$Q = Volumenstrom\ \left[\frac{m^3}{h}\right]$

Abbildung 5 zeigt, dass ab einer bestimmten organischen Belastung des Abwassers die Berechnung des Volumens zusätzlich von der CSB-Belastung sowie der täglichen CSB-Raumbelastung abhängt (Gl. 8) [16].

$$V = \frac{24 \cdot C \cdot Q}{B_v} \qquad \text{(Gl. 8)}$$

$C = CSB - Belastung\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$B_v = tägliche\ CSB - Raumbelastung\ \left[\frac{kg}{m^3 \cdot d}\right]$

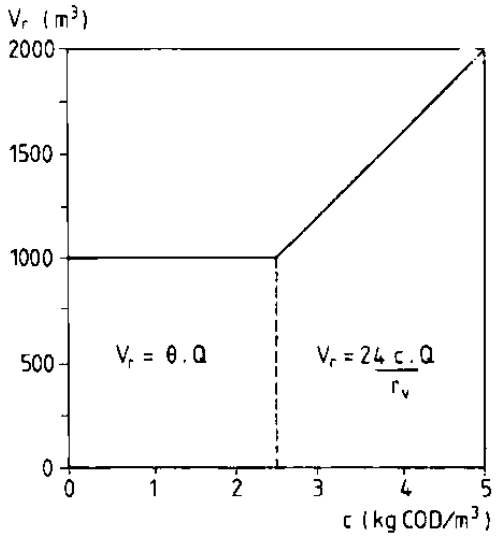


Abbildung 5:Beziehung der CSB-Belastung zu Reaktorvolumen [16]

Lettinga empfiehlt, eine HRT von 4 Stunden nicht zu unterschreiten. Dennoch gilt auch hier, je leichter ein Stoff organisch abgebaut werden kann, desto kürzer fällt die Verweilzeit aus. Daher werden Reaktoren auch unterhalb dieser Grenze erfolgreich betrieben [9]. Die Berechnung der HRT ergibt sich aus folgender Gleichung (Gl. 9) [17]:

$$HRT = \frac{C}{B_v} \qquad \text{(Gl. 9)}$$

Der Volumenstrom wird durch die Fracht an Abwasser und in zweiter Linie durch die Förderleistung der Pumpe festgelegt.

Das Verhältnis von Grundfläche zu Reaktorhöhe spielt eine eher untergeordnete Rolle, entscheidender ist die absolute Höhe des Reaktors. Diese wird durch die hydraulische Aufenthaltszeit und der Aufstiegsgeschwindigkeit des Wasserstands limitiert (Gl. 10). Handelt es sich um komplett lösliche Abwässer, können Höhen von über 10 Meter erreicht werden. Schlechter lösliche Stoffe weisen hingegen niedrigere Schlammbetthöhen auf, so dass die Anlagen dann niedriger ausfallen [16].

$$v = \frac{H}{\Theta} \qquad \text{(Gl. 10)}$$

$v = Aufstiegsgeschwindigkeit \left[\frac{m}{h}\right]$

$H = Höhe\ des\ Reaktors\ [m]$

Die Aufstiegsgeschwindigkeit liegt für komplett lösliche Abwässer bei 3 m/h, kann aber zeitweise auf 6 m/h erhöht werden. Bei Einhaltung dieser Werte wird gewährleistet, dass keine Biomasse aus dem Reaktor ausgetragen wird [16].

Einlaufsystem:

Um einen bestmöglichen Kontakt des Abwassers mit dem Schlammbett innerhalb des UASB-Reaktors herzustellen, ist eine Mindestmenge an Einlassöffnungen am Reaktorboden notwendig. Insbesondere bei Reaktoren mit geringer Gasproduktionsrate ist eine gleichmäßige Verteilung des Abwassers wichtig, da weniger aufsteigende Gasblasen für eine Durchmischung sorgen [16]. Bei vielen industriellen Anlagen findet der Wert von einer Einlauföffnung pro 2 m^2 Reaktorgrundfläche Verwendung [9]. Sind die CSB-Tagesfrachten niedrig (< 2 kg CSB/m^3d), sinkt die Flächenangabe für eine Öffnung auf bis zu 0,5 m^2 [16].

Tabelle 1: Richtlinie zur Anzahl benötigter Einlassöffnungen [16]

Beschaffenheit des Schlamms	**Fläche pro Einlaufstelle (m^2)**	**CSB-Tagesfracht**
Dicht flockender Schlamm (> 40 kg TSS/m^3)	0,5 - 1	< 1 kg/m^3 d
	1 - 2	1 - 2 kg/m^3 d
	2 - 3	> 2 kg/m^3 d
Mitteldick flockender Schlamm (20 - 40 kg TSS/m^3)	1 – 2	1 - 2 kg/m^3 d
	2 - 5	> 3 kg/m^3 d
Pellet-bildender Schlamm	0,5 - 1	bis zu 2 kg/m^3 d
	0,5 - 2	2 - 4 kg/m^3 d
	> 2	> 4 kg/m^3 d

Dreiphasenabscheider:

Der Dreiphasenabscheider gewährleistet einen optimalen Rückhalt des Schlamms und fängt gleichzeitig das aufsteigende Biogas vollständig auf. Für eine einwandfreie Funktionsweise müssen folgende wichtigste Auslegungshinweise beachtet werden [16]:

- Die Neigung der Abscheiderbleche beträgt 45° bis 60°
- Bei Einsatz mehrerer Dreiphasenabscheider (siehe Abb. 4), betragen die Flächen der Zwischenräume zwischen den Abscheidern 15 % und 20 % der Grundfläche
- Bei einer Reaktorhöhe von 5 - 7 m beträgt die Höhe der Abscheider 1,5 - 2 m

3.4 Weiterentwicklung der UASB-Technik

Eine Weiterentwicklung stellt der Expanded Granular Sludge Bed (EGSB)-Reaktor dar, auch als Hochleistungs-UASB-Reaktor bekannt. Äußerlich fällt die wesentlich höhere Bauform (bis zu 27 m) im Gegensatz zu einem klassischen UASB-Reaktor (max. 8 m) auf. Zudem ist er meist schmaler gebaut und verfügt über ein engmaschigeres Einlaufsystem sowie ein verbessertes Abscheidersystem. Hohe Aufstromgeschwindigkeiten (bis zu 8 m/h) sorgen für einen idealen Abwasser-Schlammkontakt und damit für gute organische Abbauleistungen [9]. Zwar sind EGSB-Reaktoren auf Raumbelastungen von 15 - 25 kg CSB/ m^3d ausgelegt, allerdings sind die Anlagen nur für schwächer belastete Abwässer geeignet (CSB < 1 kg/m^3), die sie jedoch bei niedrigen Temperaturen (bis zu 10 °C) verarbeiten können [14]. Durch die kürzeren hydraulischen Aufenthaltszeiten können die organischen Bestandteile des Abwassers in einem Durchgang nicht vollständig abgebaut werden. Aus diesem Grund verfügen alle EGSB-Reaktoren über eine Rezirkulation, welche innerhalb (z.B. IC-Reaktor der Firma Paques) oder außerhalb des Reaktors installiert wird. Die Rezirkulation wirkt sich nachteilig auf den Energieverbrauch der Pumpensysteme auf, deswegen muss mit höheren Betriebskosten gerechnet werden. Weiterhin sind die Anlagen aufgrund ihrer Komplexität und Bauweise teurer in der Anschaffung als herkömmliche UASB-Reaktoren [9].

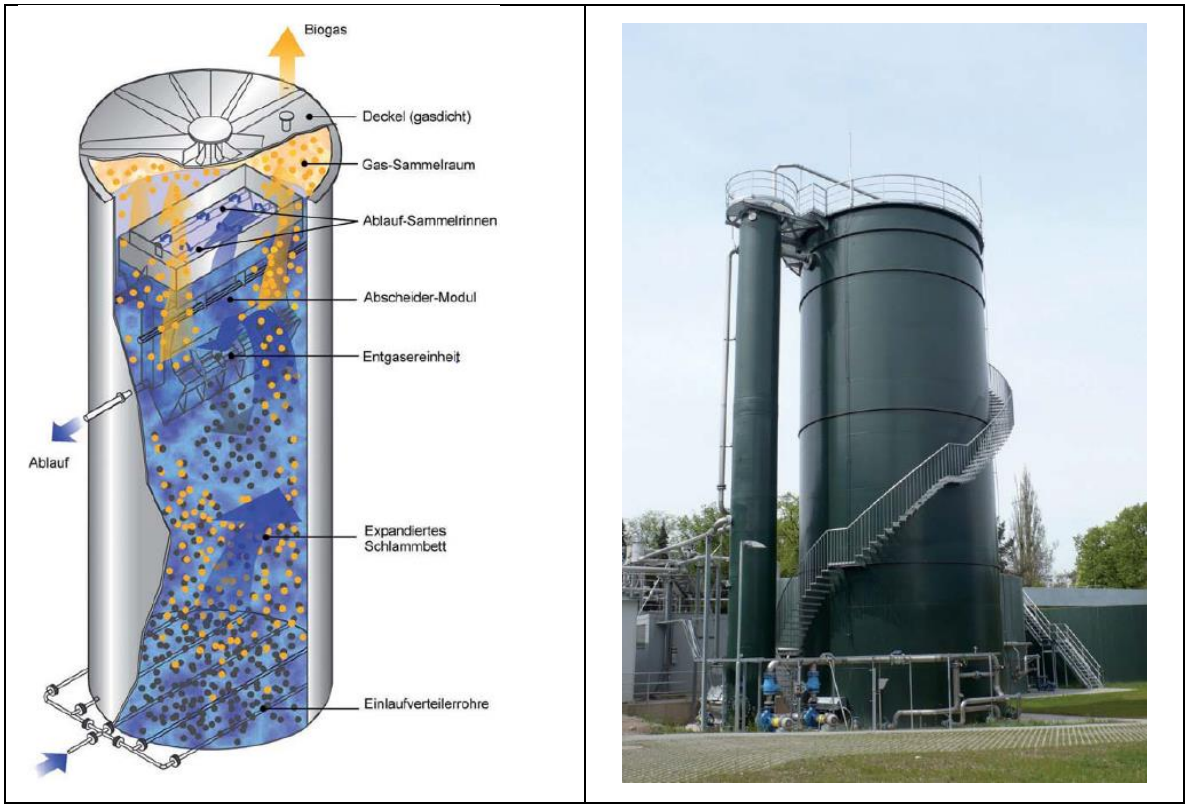


Abbildung 6: Biobed® EGSB-Reaktor; Innen- und Außenansicht [13]

4 Analyse des Reaktors der Tintschl-GmbH

4.1 Hintergrund

Die Firma Tintschl GmbH hat in den Jahren 2009 bis 2011 einen selbstentwickelten Reaktor zur fermentativen Wasserstoffproduktion aufgebaut und betrieben. Um von dieser Erfahrung zu profitieren, soll die Entwicklung des UASB-Reaktors im Labormaßstab für die Hochschule Landshut auf der Grundlage des Reaktors der Tintschl GmbH erfolgen. Dafür wird die Eignung der Anlage für das Vorhaben der Hochschule analysiert.

Anlass der Entwicklung des Tintschl Reaktors war die Vermarktung einer reststoffverwertenden Anlage zur Wasserstoffproduktion. Das Verfahren sollte als Ergänzungsmodul in bestehende Systeme zur konventionellen Methan-Biogasproduktion eingebunden werden können. Zunächst war der Einsatz im Bereich der Klärschlammbehandlung kommunaler Kläranlagen geplant, später sollten auch die Lebensmittelindustrie sowie landwirtschaftliche Betriebe als Kunden gewonnen werden. Durch einen modularen Aufbau konventioneller Biogasanlagen hätte der Reaktor der Firma Tintschl als Vorstufe der klassischen Methangärung eingesetzt werden sollen. Der produzierte Wasserstoff wäre der Stromerzeugung durch Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen zur Verfügung gestellt worden.
Vielseitige Probleme während des Betriebs der Anlage zwangen die Tintschl GmbH zur frühzeitigen Aufgabe des Projekts im März 2011 [18]. Momentan steht der Reaktor im Besitz der Hinneburg GmbH aus Willstätt-Legelshurst.

4.2 Funktion

Der Fermenter der Tintschl GmbH ist ursprünglich als Festbettreaktor konzipiert worden. Er wurde mit porösen Tonkugeln gefüllt, welche als mikrobielle Aufwuchsfläche dienten. Im späteren Einsatz fiel die Entscheidung, den Reaktor ohne Füllmaterial zu betreiben, da durch die Verwendung von Klärschlamm ausreichend Bakterienaktivität festgestellt werden konnte [18]. Abbildung 7 zeigt den Unterschied in der Funktionsweise zum UASB-Reaktor.

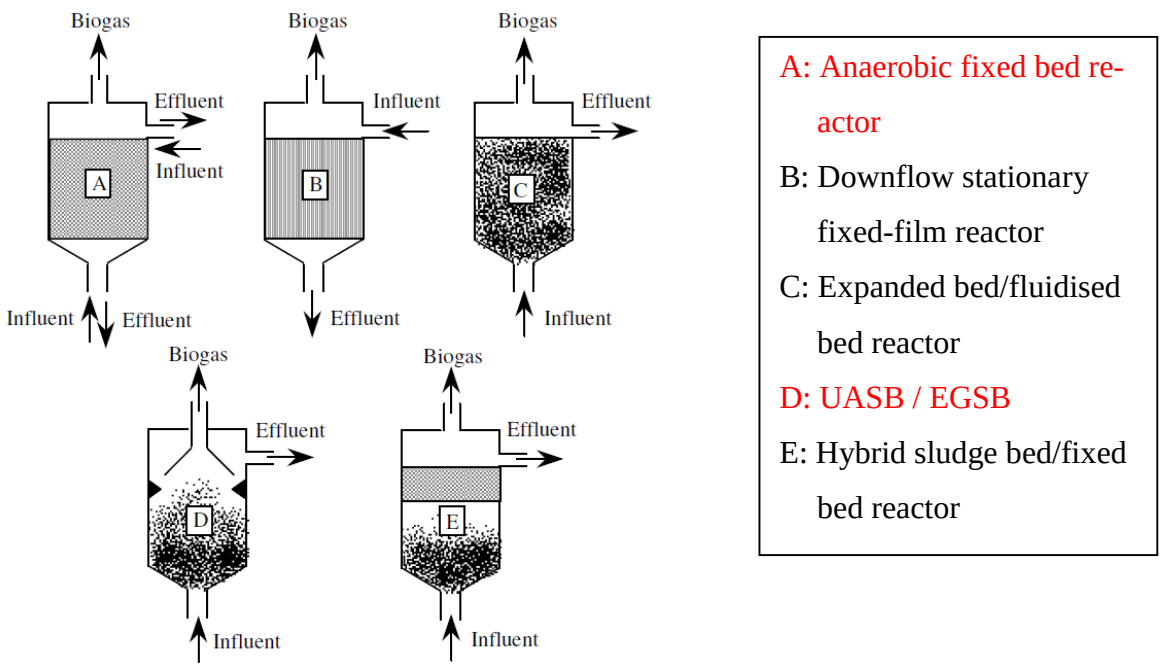


Abbildung 7: Reaktorkonzepte zur Abwasserbehandlung [19]

Im Gegensatz zum UASB-Reaktor wird der Festbettreaktor mit Trägermaterialen aus Holz, Ton oder Kunststoff zum Aufwuchs von Mikroben befüllt [20]. Der Festbettreaktor kann in aufströmender oder abströmender Weise betrieben werden. Wie beim UASB-Reaktor auch, müssen keine mechanischen Rührwerke zur Durchmischung eingesetzt werden, jedoch entfällt der Dreiphasenabscheider zum Schlammrückhalt.

In ersten Versuchen wurden dem Tintschl-Reaktor Glucoselösungen und Melasse zugeführt, damit konnte ein Produktgas mit 50 Vol% Wasserstoff gewonnen werden. Auch über einen längeren Zeitraum von 55 Tagen waren konstant hohe Wasserstofferträge möglich. Die Aufenthaltszeit im Fermenter betrug je nach eingesetztem Substrat wenige Stunden bis einige Tage. Das Substrat wurde mit Faulschlamm aus der Kläranlage angeimpft. Um die methanogene Bakterienaktivität zu eliminieren, wurde der Fermenter für einen Tag bei Betriebstemperatur mit Umgebungsluft begast (siehe Abb. 10). In weiteren Versuchen ist schließlich Überschussschlamm der Kläranlage Erlangen als Substrat verwendet worden, was jedoch zu schwerwiegenden Verzopfungsproblemen im System führte. Dennoch konnte auch hier eine Produktion von Wasserstoff festgestellt werden [18].

4.3 Aufbau und Verfahrensfließbild

Die komplette Technik des Reaktors ist in einem ISO-Container untergebracht und damit leicht transportierbar. Hauptbestandteile der Anlage sind der Vorratsbehälter und Fermenter aus Edelstahl zu je 1 m^3 Volumen. Oberhalb des Fermenters ist ein Trommelgaszähler zur Gasmengenerfassung der Firma Ritter angebracht. In einem Gasanalyseschrank erfolgen die Messungen der Konzentrationen von CO_2, H_2, O_2 und CH_4. Ein auf dem Containerboden stehender Kompressor soll Druckluft für die Begasung im Fermenter bereitstellen. Weitere Nebenaggregate sind Pumpen, Heizungen, diverse Sensoren und die Regelung [18].

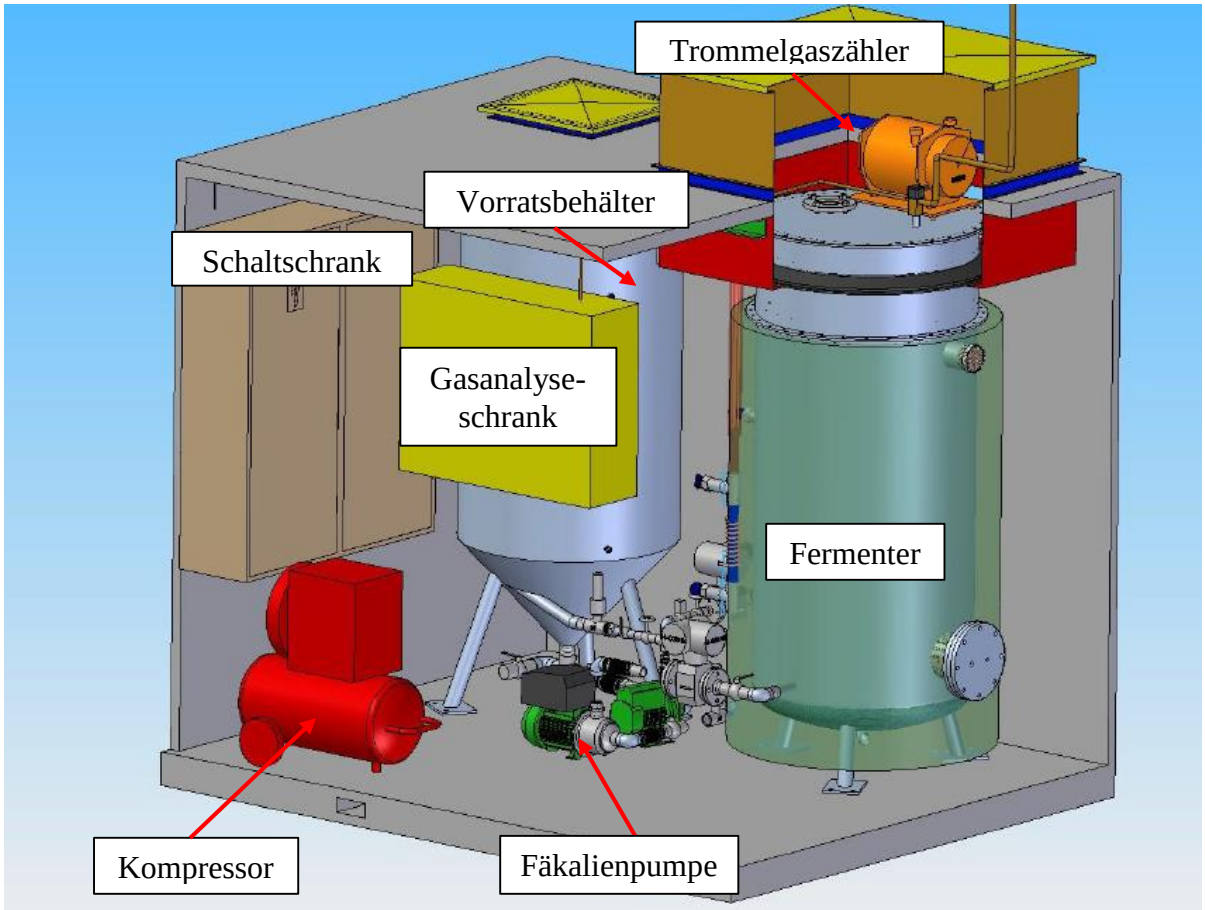


Abbildung 8: CAD-Modell des Tintschl-Reaktors [18]

Abbildung 9 zeigt das Verfahrensfließbild des Fermenterbereichs. Drei hintereinander installierte Kreislaufheizungen dienen zur Erwärmung des Substrates während des Zirkulationvorgangs. Durch den Kompressor kann der Fermenter im unteren Teil mit Umgebungsluft begast werden. Das Produktgas wird an der höchsten Stelle des Reaktors entnommen, durch den Überlauf wird das behandelte Substrat ausgetragen.

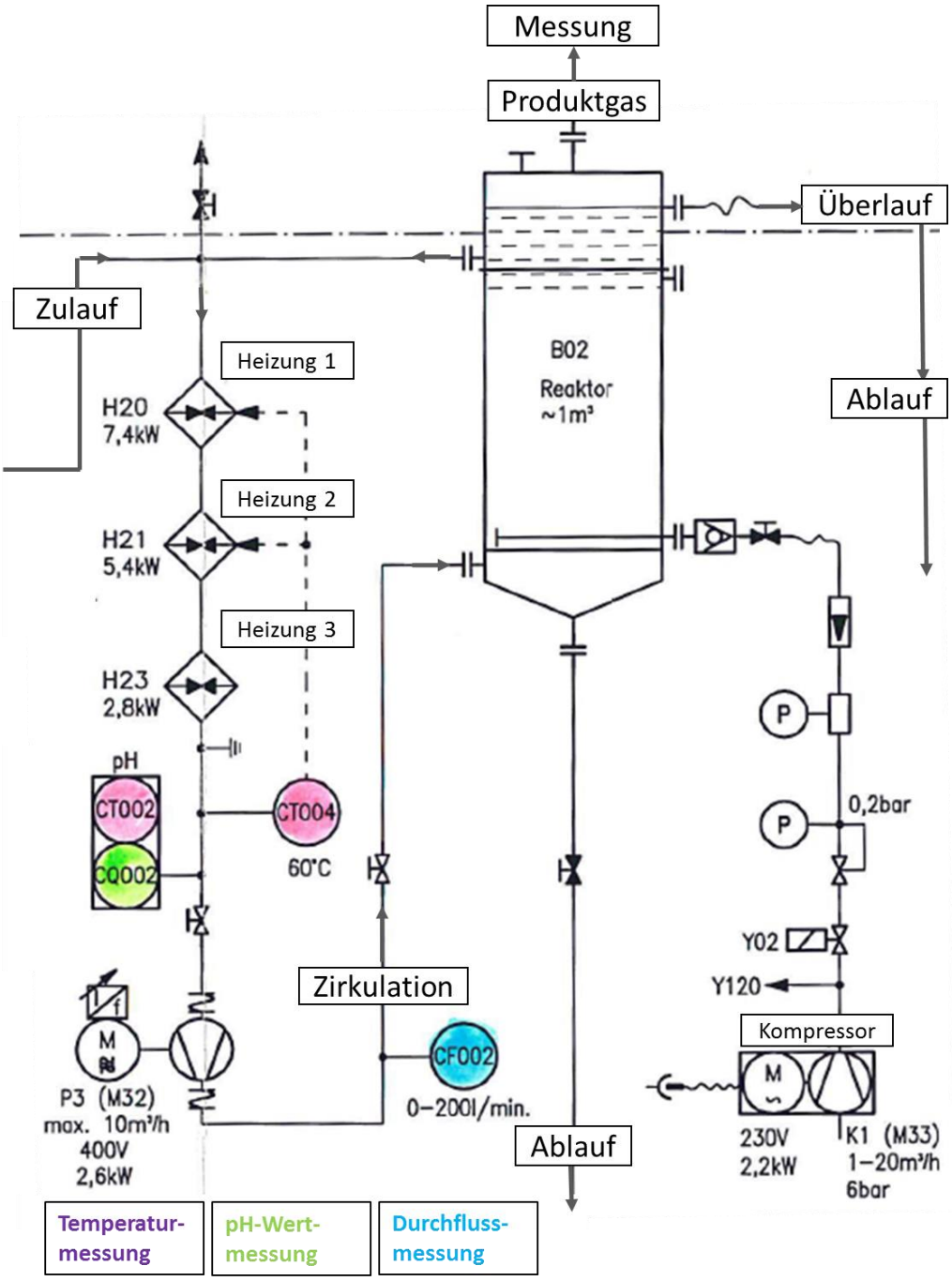


Abbildung 9: Verfahrensfließbild des Fermenterbereichs [18]

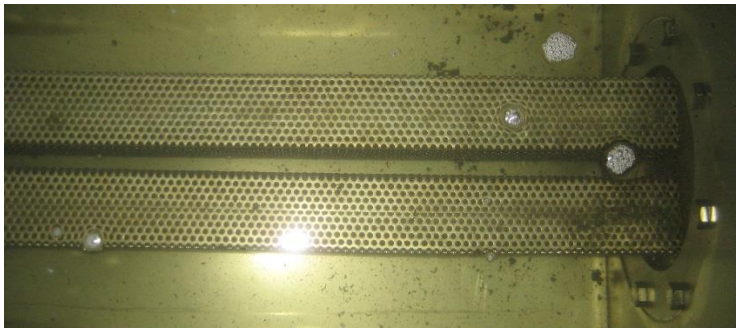


Abbildung 10: Begasungsvorrichtung im Inneren des Fermenters

4.4 Probleme und Beurteilung

Während des Betriebs des Tintschl-Reaktors traten einige Probleme auf, die zum Abbruch des Projekts führten. Beim Einsatz von Klärschlamm musste eine massive Verzopfung innerhalb der Pumpen und Heizungen festgestellt werden. Das Medium sorgte für ein „Anbacken“ an den Rohrwänden und somit für ein kontinuierliches Sinken des Kreislaufdurchflusses. Auch die spätere Verwendung eines Pipestrainers zur Entfernung des problematischen Faseranteils im Klärschlamm brachte nur geringfügige Verbesserung. Zudem wurden durch austretenden Klärschlamm im Inneren des Containers Pumpen beschädigt. Durch eintretende Minustemperaturen im Winter vereisten Teile der Anlage und es mussten Isolierungs- und Heizungsmaßnahmen ergriffen werden. Die hohen Kosten der ständigen Reparatur- und Umbaumaßnahmen bewegten die Tintschl GmbH schließlich zum Abbruch der Versuche [18].

Der Einsatz von Glucoselösung und Melasse zeigt, dass ein erfolgreicher Betrieb der Anlage über einen längeren Zeitraum möglich war. Jedoch wurde die Anlage durch die Verwendung von Klärschlamm zweckentfremdet oder im Umkehrschluss das falsche Verfahren für die Behandlung von Klärschlamm gewählt. Ursprünglich werden Festbettreaktoren, ähnlich einem UASB-Reaktor, für sehr niedrige Feststoffgehalte (unter 3 % Trockenmassegehalt) eingesetzt, während Klärschlamm Trockenmassegehalte von 3 - 5 % aufweist [5]. Der Umbau bewährter Biogasanlagen-Technik wäre für diesen Anwendungszweck besser gewesen. Dennoch kann das Verfahrensschema für die Konstruktion des UASB-Reaktors als Beispiel dienen.

5 Konstruktion eines UASB-Reaktors im Labormaßstab

Der allgemeine Konstruktionsprozess gliedert sich in vier Hauptphasen: Klären der Aufgabenstellung, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten [21]. Im folgenden Abschnitt sollen diese im Hinblick zur Konstruktion eines UASB-Reaktors im Labormaßstab durchlaufen werden.

5.1 Anforderungen

Zur Klärung der Aufgabenstellung müssen Informationen über die Anforderungen einer konstruktiven Lösung beschafft werden. Dies erfolgt in der Regel durch das Aufstellen einer Anforderungsliste [21]:

Tabelle 2: Anforderungsliste UASB-Reaktor

	Anforderungen	**Qualität**	**Quantität**			
Eigenschaften	*Hauptmerkmal*	*Beschreibung*	*Mindest-erfüllung*	*Soll-Erfüllung*	*Ideal-Erfüllung*	*Einheit*
	Reaktorvolumen	Labormaßstab, im Gasabzugs-schrank platzierbar	5	5	5	Liter
	Gewicht	von einer Person tragbar, im Gasabzugs-schrank platzierbar	< 40		< 10	kg
	Material	Verwendung von Edelstahl, säurefest			X6CrNiTi 18-10	
	Anzeige	LCD-Anzeige zur Temperatu-rüberwachung und Durchflussrate			x	
	Heizung	beheiztes Substrat		+/- 1		K
	Substrataufbewah-rung	verschließbares und evtl. lichtun-durchlässiges Gefäß			x	
	Gasspeicher	Möglichkeit der Speicherung des Gases		x		
	Analyse	Analyse von H_2, CO_2, CSB, und organischen Säuren		x		

Betriebsbedingungen	Substrat	Verwendung von Glucoselösung und HTC-Abwasser		x		
	Dichtigkeit	kein Eindringen von Außenluft in den Fermenter		x		
	Temperatur	Herstellung von thermophilen Bedingungen im Reaktor	≤ 70	≤ 70		°Celsius
	hydraulische Verweilzeit	hydraulische Verweilzeit durch Pumpe anpassbar	> 4			h
	hydraulische Aufstromgeschwindigkeit	Aufstromgeschwindigkeit des Subtrats durch den Reaktor	0,5-6			m/h
	CSB-Raumbelastung	Organisch abbaubares Material im Substrat		< 15		kg/m^3*d
	Stofftransport	Einsatz einer Pumpe für Flüssigkeiten		x		
	Gasdruck	keine Überdruckbedingungen im Reaktor			≤ 1013	hPa
Weitere Bedingungen	Fertigung	Von Hinneburg GmbH herstellbar, einfache Bauweise		x		
	Transport	von einer Person transportierbar		x		
	Säuberung	Durch Wasserspülung säuberbar		x		
	Kosten	niedrige Herstellkosten		x		€
	Energieverbrauch	niedriger Energieverbrauch, Isolierung		k.A.		kW
	Einbau	von einer Person zu bewerkstelligen, Ständersystem		x		
	Sicherheit	Unterbringung in Gasabzugschrank, verschlossen		x		

5.2 Konzeption

5.2.1 Verfahrensfließbild

Das Verfahrensfließbild des Laborreaktors (Abb. 11) zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Anlage. In einem Vorlagebehälter wird das eingesetzte Substrat aufbewahrt, bis es durch eine Pumpe in den unteren Teil des Reaktors eingebracht wird. Durch eine Leitungsabsperrung an Zulauf und Zirkulationskreislauf kann zunächst das Arbeitsvolumen des UASB-Reaktors befüllt werden und anschließend zirkulierend umgepumpt werden. Durch Justierung der Durchflussmenge an den Absperrvorrichtungen besteht die Möglichkeit, den Zulauf frischen Substrats einzustellen. Mit Hilfe des Überlaufs verlässt überschüssiges Substrat den Fermenter selbstständig und wird im Auffangbehälter gesammelt. Über das Abscheidersystem im oberen Teil des Reaktors wird produziertes Gas in den Gasspeicher weitergeleitet. Eine äußere Beheizung stellt die gewünschte Betriebstemperatur für den Prozess her. Mit den Vorlage- und Auffangbehältern kann durch Befüllung bzw. Entnahme von Substrat für einen kontinuierlichen Betrieb gesorgt werden.

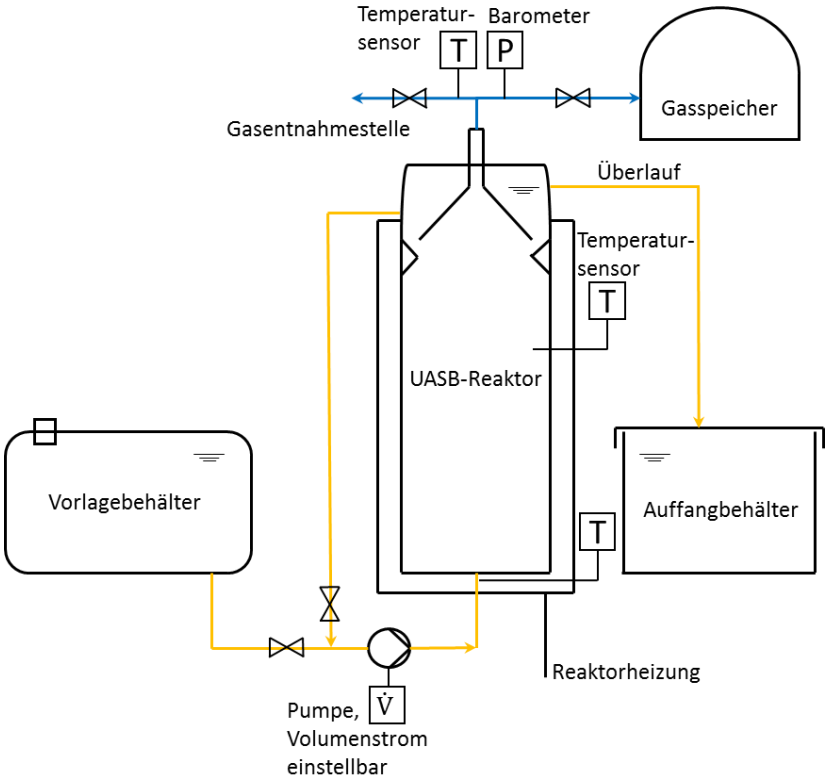


Abbildung 11: Verfahrensfließbild UASB-Reaktor

5.3 Entwurf

In dieser Phase der Konstruktion werden mögliche Lösungsansätze zur Gestaltung der Hauptbauteile des UASB-Reaktors entworfen. Daraufhin wird ein passendes Gesamtkonzept nach einer Beurteilung ausgewählt.

5.3.1 Reaktorgeometrie

Die Reaktorgrundfläche kann entweder rund oder rechteckig gestaltet werden. Bei der eckigen Bauweise kann die Fertigung mit einer Abkantbank erfolgen, bei der runden Bauweise sind zum Beispiel Rohre in passender Größe als Halbzeuge erhältlich. Weiterhin besteht die Möglichkeit, den Durchmesser des Fermenters auf Höhe des Dreiphasenabscheiders zu erweitern (siehe Skizze 2). Dadurch sinkt die Komplexität des Abscheiders deutlich.

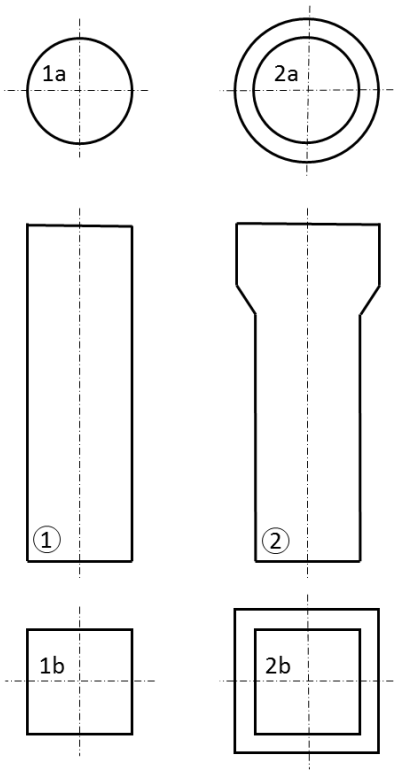


Abbildung 12: Entwurf der Reaktorgeometrie

5.3.2 Einlaufsystem

Der Einlauf des Substrats kann entweder von unten oder von der Seite erfolgen. Wichtig ist jedoch die gleichmäßige und beruhigte Einbringung. Skizze 1 zeigt ein gekrümmtes Einlaufrohr nach dem Beispiel des Tintschl-Reaktors. Skizze 2 zeigt ein an der Reaktorwand befestigtes Blech, das den Strom seitlich ablenkt. Eine ähnliche Methode wird in Skizze 4 angewandt, jedoch ist das Ablenkblech direkt am Einlaufstutzen befestigt. Auch über ein perforiertes Rohr (Skizze 3) kann das Substrat eingebracht werden.

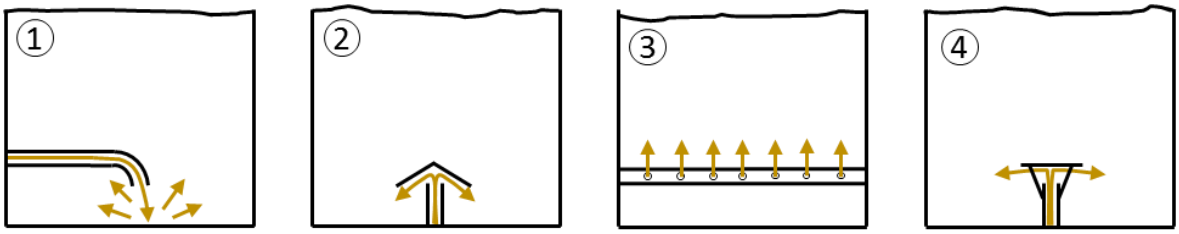


Abbildung 13: Entwurf des Einlaufsystems

5.3.3 Dreiphasenabscheider

Die Gestaltung des Dreiphasenabscheiders hängt von der Geometrie der Grundfläche ab. So können nur Varianten der Skizze 1 und 5 in einem rundförmigen Reaktor verwirklicht werden, da diese symmetrisch um die Drehachse sind. In Skizze 5 kann aufgrund der Reaktorgrundform auf Ablenkbleche verzichtet werden, dadurch reduziert sich die Abscheiderkonstruktion auf ein Teil. Bei einer eckigen Bauweise sind grundsätzlich alle Skizzen der Abbildung 14 möglich. Entscheidend ist die Ablenkung und der vollständige Auffang aller aufsteigenden Gasblasen sowie die Abfuhr des behandelten Substrats. Die Biomasse hingegen muss vom Ablauf ferngehalten und nach unten abgeleitet werden.

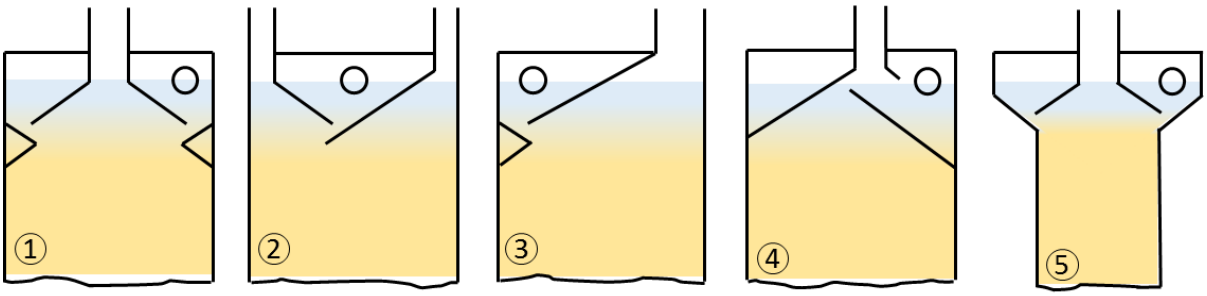


Abbildung 14: Entwurf des Dreiphasenabscheiders

5.3.4 Heizsystem

Die Flüssigkeit im Reaktorinneren soll eine Temperatur von 70°C erreichen. In der Pilotanlage der Tintschl GmbH wird das Substrat im Zirkulationskreislauf erhitzt. Durch diese Methode ist der Wärmeeintrag abhängig vom Betrieb und dem Volumenstrom des Kreislaufs. Der UASB-Reaktor sollte jedoch auch ohne Zirkulation und mit variablen Substratzufuhren eingesetzt werden können, weswegen der Reaktorbehälter beheizt werden muss. Ein Wärmetauscher im Reaktor scheidet als Option aus, da für die optimale Funktion glatte Innenwände ohne Störstellen notwendig sind.

Für eine Beheizung der Außenwand sind in Abbildung 2 folgende Entwürfe vorgesehen: In der doppelwandigen Ausführung (Skizze 1) wird Wasser durch einen elektrischen Widerstand erhitzt und somit Wärme an das Innere des Reaktors abgegeben. Skizze 2 stellt eine Beheizung über Heizmatten dar. Diese bestehen aus einem elektrischen Widerstand eingebettet in einer Matrix (z.B. Silikon). Die Funktion ist ähnlich einer elektrischen Fußbodenheizung, über die Matten wird Wärme an den Reaktor übertragen. Der Entwurf aus Skizze 3 sieht eine Beheizung durch Wärmetauscher-Rohre aus Kupfer vor. Dies hat zur Folge, dass ein flüssiges Medium mit einem externen Heizgerät erhitzt und umlaufend in den Wärmetauscher gepumpt werden muss.

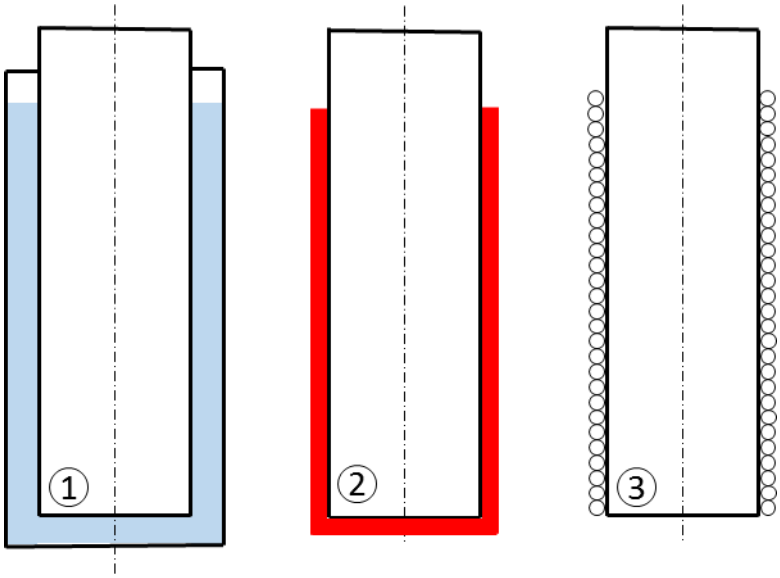


Abbildung 15: Entwurf der Heizung

Alle drei Modelle müssen mit einer Außendämmung versehen werden, um die Wärmeverluste so gering wie möglich zu halten. Die Temperatureinstellung erfolgt über einen im Reaktorvolumen angebrachten Temperatursensor.

5.4 Bewertung und Auswahl der Entwürfe

In Tabelle 3 werden die vorgestellten Entwürfe hinsichtlich der Hauptkriterien zur Bauweise, der Störunauffälligkeit und des finanziellen Aufwands zum Bau des UASB-Reaktors bewertet. Für die einzelnen Skizzen werden für ein bestimmtes Kriterium Punkte von 1 (schlechteste Punktzahl) bis 5 (beste Punktzahl) vergeben. Zudem werden 10 Gewichtungspunkte auf die Bewertungskriterien aufgeteilt und anschließend mit den vergebenen Punkten multipliziert. Diese Ergebnisse werden addiert, sodass eine Skizze die maximale Punktzahl von 50 erreichen kann. Die besten Gesamtergebnisse sind in Rot abgebildet.

Tabelle 3: Bewertungsmatrix

Bewertungskriterien	**einfache Bauweise**		**störunauffällig**		**kostengünstig**		**Ge-samt:**
	Gewich-tung:	4	Gewich-tung:	3	Gewich-tung:	3	**10**
Reaktorgeometrie	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Summe
Skizze 1a	*5*	20	*5*	15	*4*	12	**47**
Skizze 1b	*4*	16	*5*	15	*5*	15	**46**
Skizze 2a	*3*	12	*5*	15	*3*	9	**36**
Skizze 2b	*2*	8	*5*	15	*3*	9	**32**
Einlaufsystem	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Summe
Skizze 1	*4*	16	*5*	15	*4*	12	**43**
Skizze 2	*5*	20	*5*	15	*5*	15	**50**
Skizze 3	*4*	16	*4*	12	*4*	12	**40**
Skizze 4	*4*	16	*5*	15	*5*	15	**46**
Dreiphasenabscheider	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Summe
Skizze 1	*3*	12	*4*	12	*4*	12	**36**
Skizze 2	*3*	12	*4*	12	*4*	12	**36**
Skizze 3	*4*	16	*4*	12	*4*	12	**40**
Skizze 4	*2*	8	*3*	9	*4*	12	**29**
Skizze 5	*5*	20	*5*	15	*5*	15	**50**
Heizsystem	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Punkte	Pro-dukt	Summe
Skizze 1	*3*	12	*3*	9	*5*	15	**36**
Skizze 2	*4*	16	*4*	12	*3*	9	**37**
Skizze 3	*4*	16	*4*	12	*4*	12	**40**

Die Entwürfe werden zunächst unabhängig voneinander bewertet. Für die endgültige Auswahl muss jedoch auch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten betrachtet werden.

So ist eine Reaktorgeometrie mit auflaufendem Durchmesser zwar aufwändiger und teurer zu fertigen, jedoch sinkt dafür die Komplexität des Dreiphasenabscheiders. In einem Reaktor mit quadratischer Grundfläche können einfache Blechstücke eingeschweißt werden. Sind jedoch die Ablenkbleche nicht beidseitig geschlossen (siehe Abb. 14, Skizze 4), so kann sich absinkender Schlamm darauf absetzen. Um dies zu verhindern, steigt wiederum die Anzahl benötigter Einzelteile.

Durch eine Beheizung des Reaktors im Wasserbad wird eine Gefahr zu hoher Temperaturen vermieden und es besteht eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung über eine große Oberfläche. Allerdings wird mit dieser Methode mehr Bauraum und Material benötigt. Zudem kann der Anschluss für den Zulauf schlechter erreicht werden. Der Einsatz von Heizmatten ist hingegen teuer, da diese aus dem Fachhandel zugekauft werden müssen. Jedoch sinkt die Gefahr von Leckagen und die Anlage kann kompakter gebaut werden. Die Verwendung eines Rohr-Wärmetauschers ist nur bei einer runden Reaktorbauform sinnvoll, die Wärmeübertragung durch die Metallwände ist problematisch. Denkbar ist daher eine Kombination aus Rohrwärmetauscher und Wasserbad, um die Wärmeübertragung zu verbessern.

Bei der Auswahl eines Gesamtsystems ist eine runde Reaktorgeometrie mit auflaufendem Durchmesser zu bevorzugen. Zwar schneidet diese in der Einzelbetrachtung schlechter als die anderen Vorschläge ab, jedoch ist diese mit den „Gewinnern“ der restlichen drei Hauptbauteile besser vereinbar. Bei der Verwendung des besten Abscheiders und Heizsystems kommt nur diese Reaktorform in Frage, das ideale Einlaufsystem kann auch damit kombiniert werden. Um von den Vorteilen eines Wasserbeckens mit einer externen Heizung zu profitieren, kann beides eingesetzt werden.

5.5 Ausarbeitung des Reaktorentwurfs

Im folgenden Kapitel wird die Konstruktion und Auswahl einzelner Bestandteile der Anlage näher erläutert. Um das Projekt zu realisieren, hat sich die Hinneburg GmbH freundlicherweise bereit erklärt, die Fertigung des Reaktors zu übernehmen. Alle detaillierten Zeichnungsableitungen der Konstruktion mit Stückliste befinden sich im Anhang.

5.5.1 Reaktorhülle

Die wesentliche Geometrie wird durch zwei Bauteile bestimmt, den unteren und oberen Reaktorteil. Da der Edelstahlwerkstoff X6CrNiTi18-10 eine hohe Beständigkeit gegenüber Essigsäure aufweist [22] wird dieser hier eingesetzt. Bei allen Blechbauteilen, die in direkten Kontakt mit dem eingesetzten Substrat treten, sollte dieser Werkstoff Verwendung finden. Die Wandstärke der Behälterwand muss für eine gute Wärmeübertragung zwischen der Heizung und dem Substrat möglichst dünn sein, beträgt aber nach Absprache mit der Hinneburg GmbH mindestens 2 mm, um eine gute Schweißbarkeit zu gewährleisten.

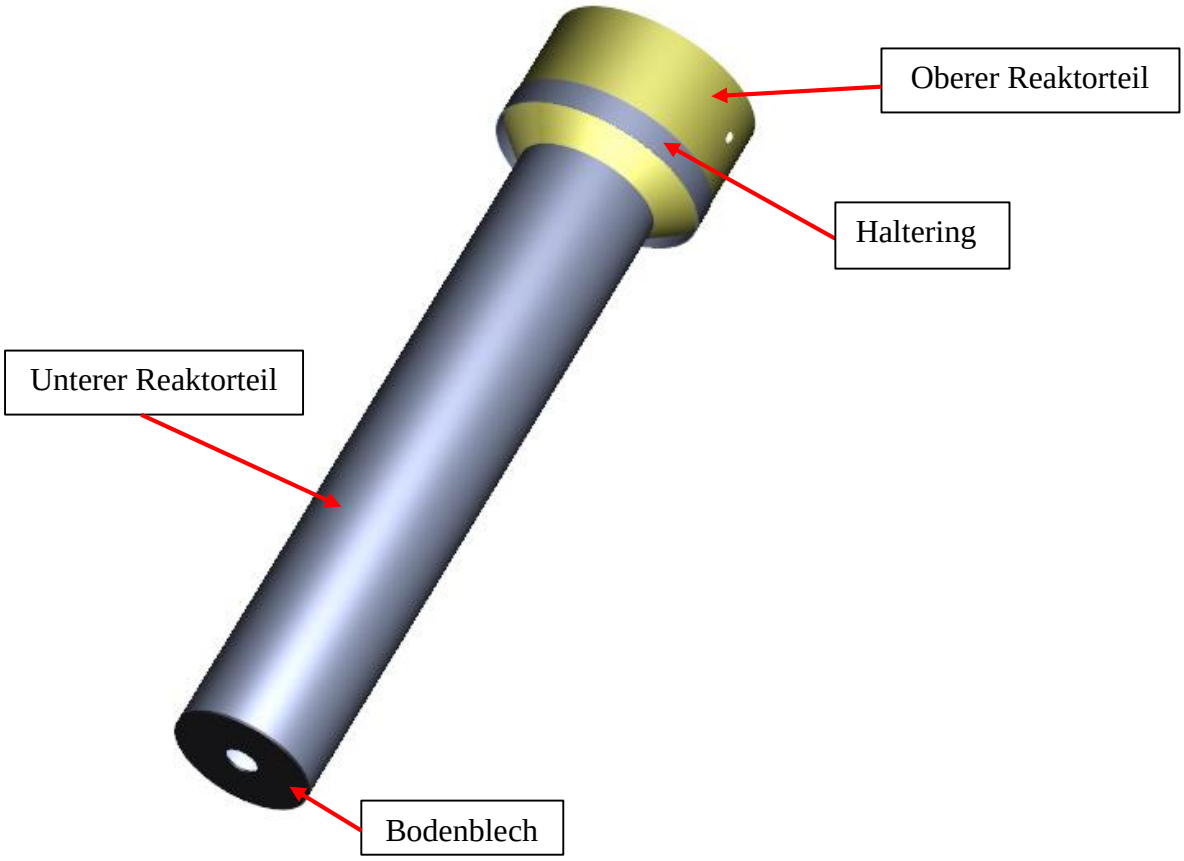


Abbildung 16: Modell der Reaktorhülle

Der obere Reaktorteil weist eine trichterförmige Erweiterung des Durchmessers auf, welche in einem Winkel von 54° ein Festsetzen des Schlamms verhindert. Zugleich kann dadurch ein ebenso trichterförmiger Dreiphasenabscheider, der mit größerem Durchmesser als der untere Reaktorteil ausgelegt ist, alle aufsteigenden Gasblasen abfangen. Zwei Bohrungen an der Seitenwand in unterschiedlicher Höhe werden für den Zirkulationskreislauf (untere Bohrung) und den Ablauf (obere Bohrung) benötigt. Ein runder Bodendeckel, fest verschweißt am unteren Reaktorteil, schließt den Behälter nach unten hin ab. Der Einfachheit halber ist er flach ausgeführt. Eine Öffnung ermöglicht die Anbringung eines Einlaufsystems. Durch einen angeschweißten Haltering am oberen Reaktorteil kann der gesamte Fermenter von oben in ein Rohr gesetzt und somit innerhalb einer zweiten Hülle beheizt werden.

Da keine konstruktiven Vorgaben bezüglich der Größenverhältnisse des Reaktors bestehen, wird ein praktikabler Wert für den Innendurchmesser und die Höhe gewählt. Zu beachten ist, dass zwar die Größe eines UASB-Reaktors als Miniaturmodell angepasst werden kann, jedoch die eingesetzten Bakterienkulturen immer ähnliche Bedingungen für eine stabile Entwicklung auffinden müssen. Das bedeutet insbesondere für eine minimale angestrebte Aufstiegszeit von 0,5 m/h, um die Bakterienpellets in einem Aufstrom in der Schwebe halten zu können, einen möglichst hohen Reaktor bei kleinem Rohrdurchmesser zu wählen. Dadurch kann mit geringem Volumenstrom eine hohe Aufstromgeschwindigkeit mit einer niedrigen hydraulischen Verweilzeit vereinbart werden.

Da die Bauhöhe aufgrund der Laborbedingungen begrenzt ist, sind ein Innendurchmesser von 100 mm sowie eine Höhe von 500 mm des unteren Reaktorteils als sinnvoll anzusehen. Damit können unter Zunahme des restlichen oberen Reaktorvolumens die geforderten 5 Liter Gesamtvolumen eingehalten werden. Allerdings sind diese Abmaße immer noch nicht geeignet, um eine hydraulische Verweilzeit von mindestens 4 Stunden im Einmaldurchlauf zu ermöglichen. Deswegen verfügt das System über einen Zirkulationskreislauf, sodass die Aufenthaltszeit beliebig festgelegt werden kann.

5.5.2 Heizsystem

Das Heizsystem wird aufgrund der Bedingung einer glatten Reaktorinnenwand außen angebracht. Da das Energie- und Umwelttechniklabor der Hochschule Landshut über ein Laborheizgerät (siehe Abb. 18) verfügt, kann auf dieses zurückgegriffen und die Kosten einer Neuanschaffung eines anderen Heizsystems eingespart werden.

Die Reaktorheizung besteht aus einem Kupferrohr als Wärmetauscher mit 10 mm Außendurchmesser. Dieses wird kreisförmig um den unteren Reaktorteil gewickelt, um die Oberfläche der Wendel zu vergrößern. Dabei muss darauf geachtet werden, zwischen den Windungen ausreichend Platz für den Zulaufschlauch des Substrats zu lassen, da dieser zwischen dem Kupferrohr ebenfalls um den Fermenter gewickelt wird. Somit verfügt die eingebrachte Flüssigkeit schon beim Eintritt in den Reaktor über die gewünschte Temperatur, unabhängig vom eingestellten Substratvolumenstrom.

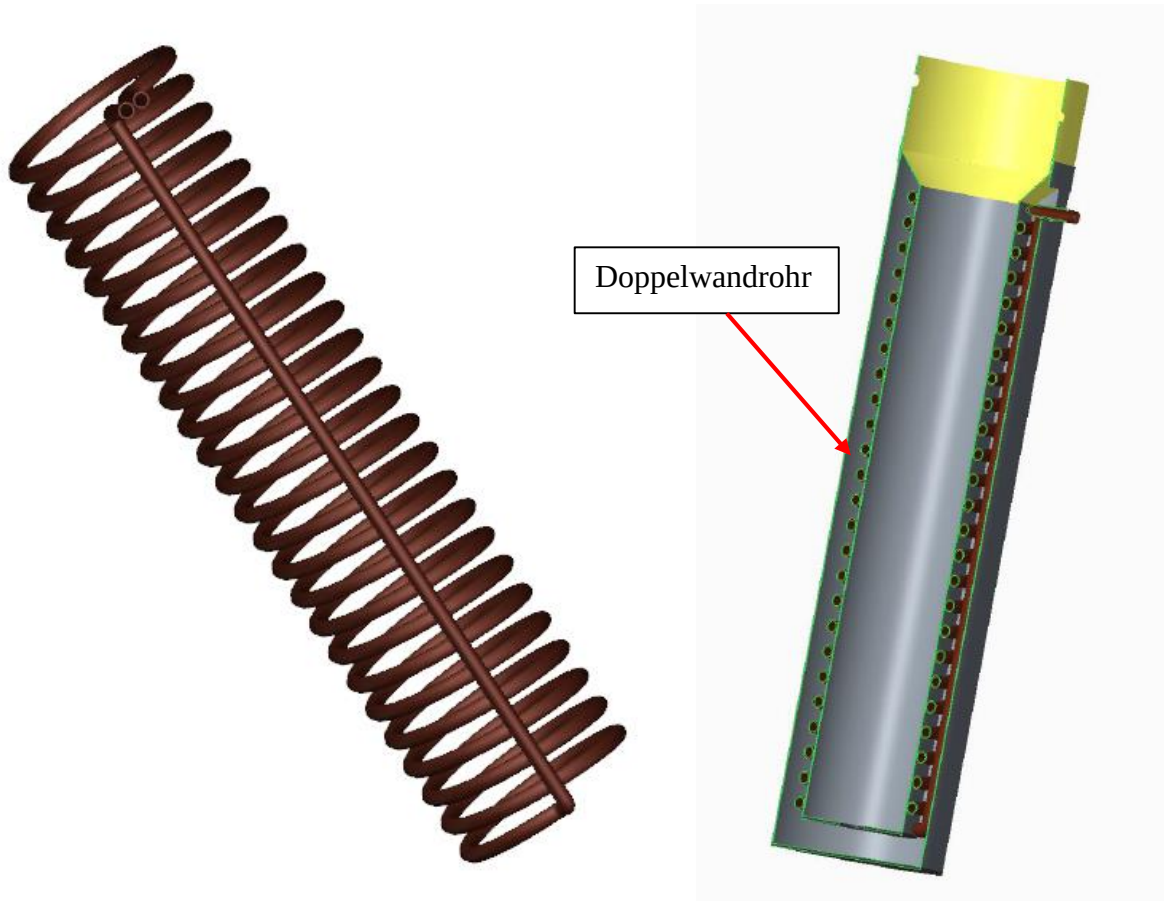


Abbildung 17:Heizwendel aus Kupfer und Schnitt durch die Doppelwand des Fermenters

Um den Wärmeübergang zwischen dem Kupferrohrwärmetauscher und dem Substratschlauch bzw. dem Reaktor zu verbessern, wird Wasser als Zwischenmedium verwendet. Da eine Abweichung von maximal 1 K während des Prozesses im Reaktor gefordert ist, dient das Wasser gleichzeitig als „Dämpfer“ und kann kleine Temperaturschwankungen abfangen.

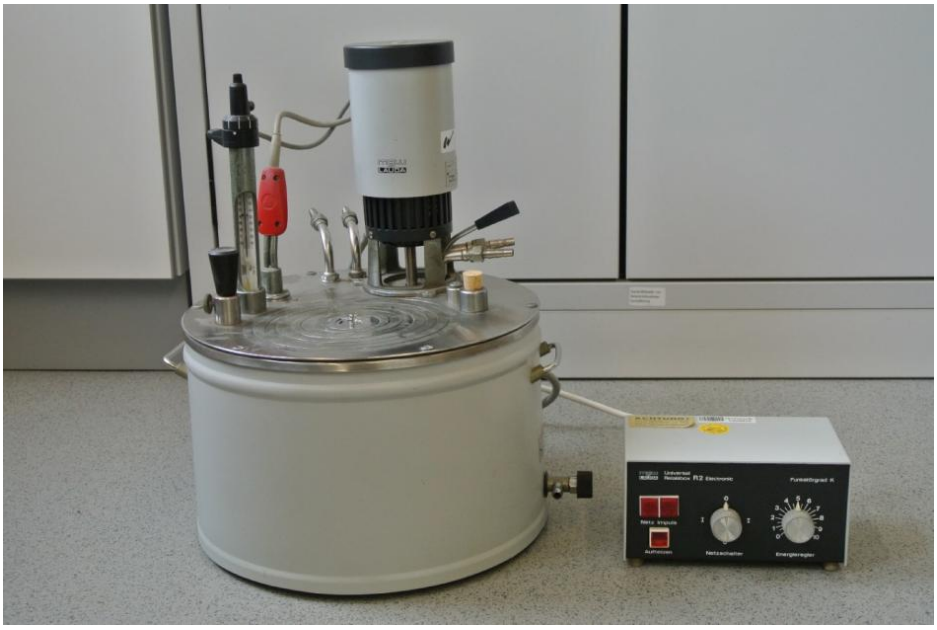


Abbildung 18: Laborheizung Lauda NB/D8/17 Foto: Bachelorarbeit Christian Drexler

Ein am unteren Ende mit einem Deckel wasserdicht verschweißtes Rohr dient als Wasserbecken und wird mit möglichst destilliertem oder entionisiertem Wasser befüllt, um Kalkablagerungen am Wärmetauscher zu vermeiden. Da es denselben Durchmesser wie der obere Reaktorteil aufweist, kann der fertige Fermenter einfach auf das Doppelwandrohr aufgesetzt werden, wobei dieser durch den Haltering und der Trichterform optimal zentriert wird und keine weiteren Abstandshalter nötig sind.

Über einen Einschnitt in den oberen Rand des Doppelwandrohrs werden sowohl Heizungsvorlauf, Rücklauf und die Substratzuleitung geführt. Dadurch bleibt die Außenhaut beschädigungsfrei und es müssen keine Muffen oder andere Behälterdurchführungsmaßnahmen vorgenommen werden, die zu Undichtigkeiten führen können oder das System unnötig verkomplizieren.

5.5.3 Einlaufsystem

Die Muffe des Einlaufsystems wird durch die Bohrung am Deckelboden geschoben und mit diesem verschweißt. Dadurch kann absolute Dichtigkeit bei geringer Bauhöhe gewährleistet werden. Mittels vier radial angeordneten Bohrungen an der Einlaufmuffe wird das Substrat gleichmäßig in das Innere des Reaktors eingelassen. Damit wird eine hydraulische Tunnelbildung durch das Schlammbett verhindert. Um den Volumenstrom durch die Einlassbohrungen zu leiten, muss die Muffe verschlossen werden. Dies geschieht durch einen Deckel, welcher mit dem Gewinde der Muffe verschraubt wird. Um die Bauhöhe zu reduzieren, ist der Deckel auf der Innenseite des Reaktors angebracht, jedoch trotzdem händisch von oben zu erreichen. Es besteht zwar die Möglichkeit, die Muffe durch einen Stopfen oder ein angeschweißtes Blech dauerhaft zu verschließen, allerdings kann diese dann zu Wartungszwecken oder bei Verstopfungsproblemen nicht mehr geöffnet werden. Die Tülle zum Anschluss eines Schlauchs wird im 90°-Winkel zur Muffe angebracht, um eine niedrige Gesamthöhe der Anlage zu wahren sowie eine Knickung des angeschlossenen Schlauchs zu vermeiden. Zur Vorwärmung des Substrats wird der Schlauch zwischen den Windungen des Kupferrohrwärmetauschers nach oben gewickelt und aus dem Doppelwandrohr ausgeführt. Um bei einer Wassertemperatur von 70 °C sowie beim Einsatz unterschiedlicher Substrate zu bestehen, sollte ein Schlauch auf Silikonbasis verwendet werden [23].

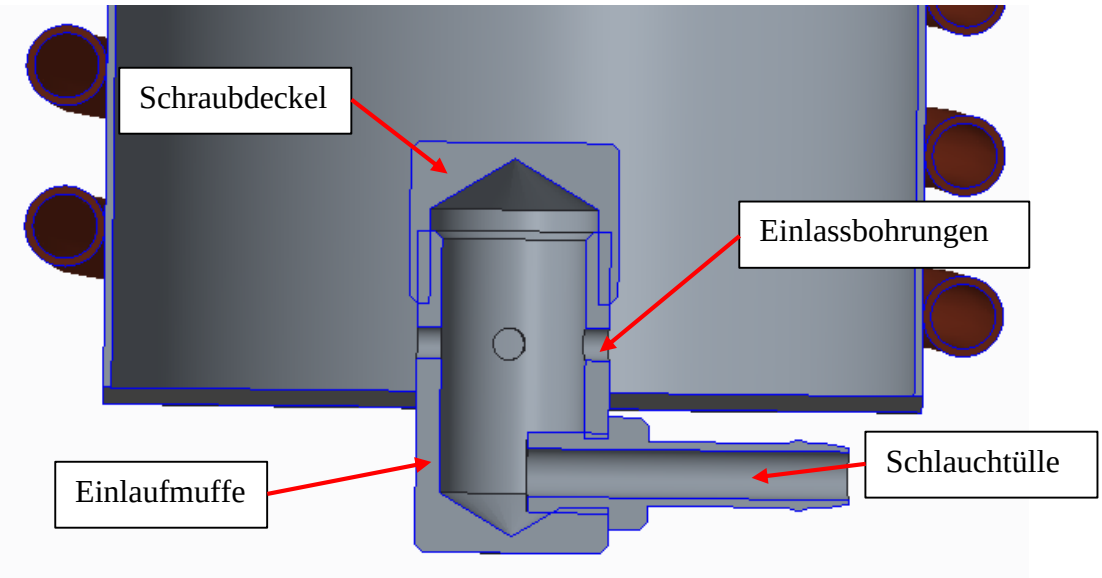


Abbildung 19: Schnitt durch das Einlaufsystem

5.5.4 Dreiphasenabscheider

Die Hauptbestandteile des Abscheidesystems bestehen aus einem Trichter, einer Gasabführung und zwei Auslässen. Der Neigungswinkel des Trichters zur Reaktorwand beträgt 45°, so können Gasblasen sauber nach oben abgeführt werden und an der Trichteraußenseite setzen sich keine Feststoffe ab. Eine Muffe mit Withworth-Rohrinnengewinde nach DIN ISO 228 wird in eine Bohrung im Deckel eingeschweißt. In diese kann nun ein passendes Rohr mit dem angeschweißten Abscheidetrichter eingeschraubt werden. Dabei muss mit geeigneten Hilfsstoffen (z.B. PTFE-Dichtband) auf eine Abdichtung des Gewindes geachtet werden. Da der Deckel abnehmbar ist, kann der Trichter zuerst an diesem montiert und anschließend von oben eingesetzt werden. Durch die leicht überstehende Befestigung eines Innen- und Außenrings am oberen Reaktorrand entsteht ein Spalt, in welchem eine Gummidichtung platziert wird. Diese sorgt durch den Anpressdruck des Deckelrands für einen gasdichten Verschluss. Mit vier radial an der äußeren Reaktorwand angeordneten einstellbaren Spannhaltern (als Zukaufteil erhältlich) wird der Deckel verschlossen. Eine preisgünstigere Alternative sind an der Reaktoraußenwand hängend befestigte Gewindestangen, die über ein Lochblech am Deckel mit einer Mutter verschraubt werden. Allerdings müssen dann bei jedem Schließvorgang die Muttern mit dem richtigen Drehmoment angezogen werden, während die Spannhalter ein schnelles Öffnen und Schließen ermöglichen.

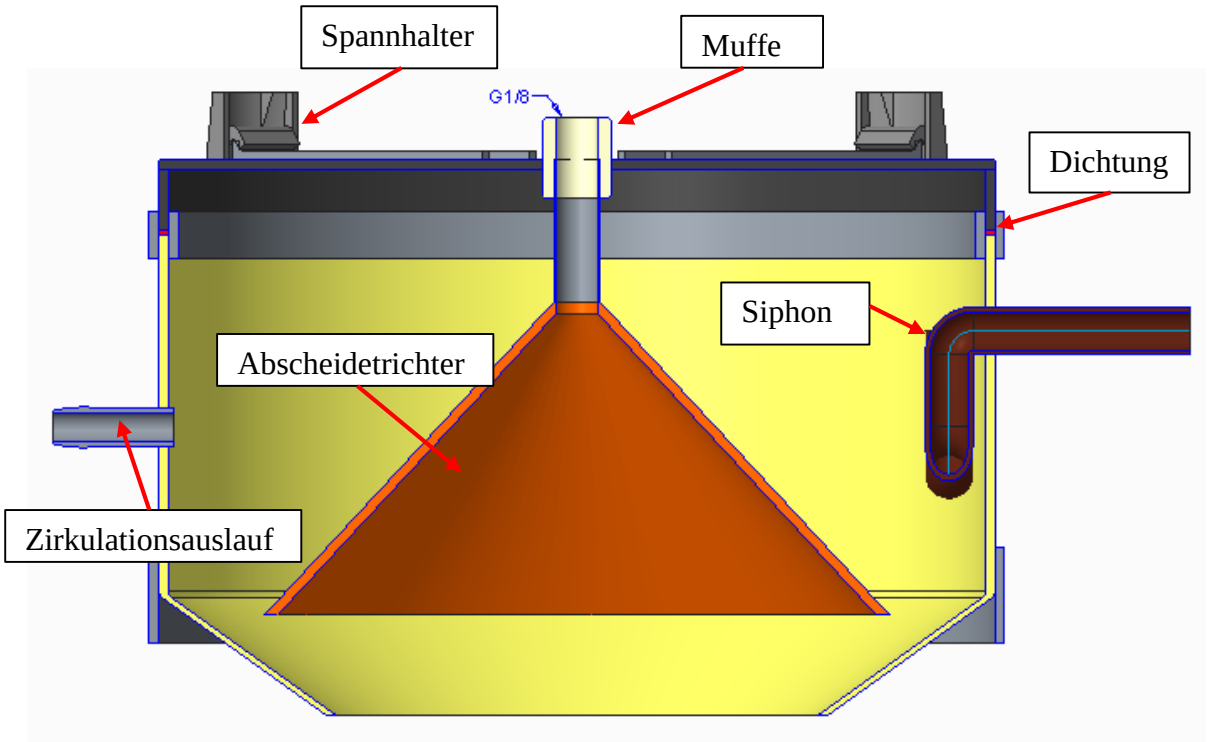


Abbildung 20: Schnitt durch den oberen Reaktorteil

Im oberen Reaktorteil befinden sich zwei Auslaufbohrungen, eine für die Zirkulation und eine für die Abfuhr behandelten Substrats. Bei der ersten Befüllung des Reaktors wird zunächst der Zirkulationskreislauf geschlossen, bis Flüssigkeit am oberen Auslauf austritt. Dadurch ist der korrekte Flüssigkeitsstand sichergestellt und das Substrat kann nun zirkulierend umgepumpt werden. Aus sicherheitstechnischen Gründen darf der obere Auslauf nie verschlossen werden, da sonst ein unkontrollierter Druckanstieg möglich wäre. Um dennoch einen Zugang von Außenluft in das System zu verhindern, besitzt der obere Auslauf ein mit Flüssigkeit gefülltes Siphonrohr. Dieses ist eng an der inneren Reaktorwand angebracht, um eine problemlose Montage des Abscheidetrichters zu gewährleisten.

5.5.5 Isolierung und Aufständerung

Bei einer Reaktorhöhe von über 640 mm auf kleinem Durchmesser von 174 mm muss ein fester Stand der Anlage sichergestellt werden. Mit Hilfe des Einsatzes von Multiplex-Plattenmaterial bleibt der Bau der Aufständerung kostengünstig und einfach herzustellen. In zwei rechteckig verkreuzten Standfüßen wird zunächst das Doppelwandrohr hineingestellt. Kreisförmig ausgeschnittene Holzscheiben stützen den Reaktor und gleichzeitig das Isolationsmaterial.

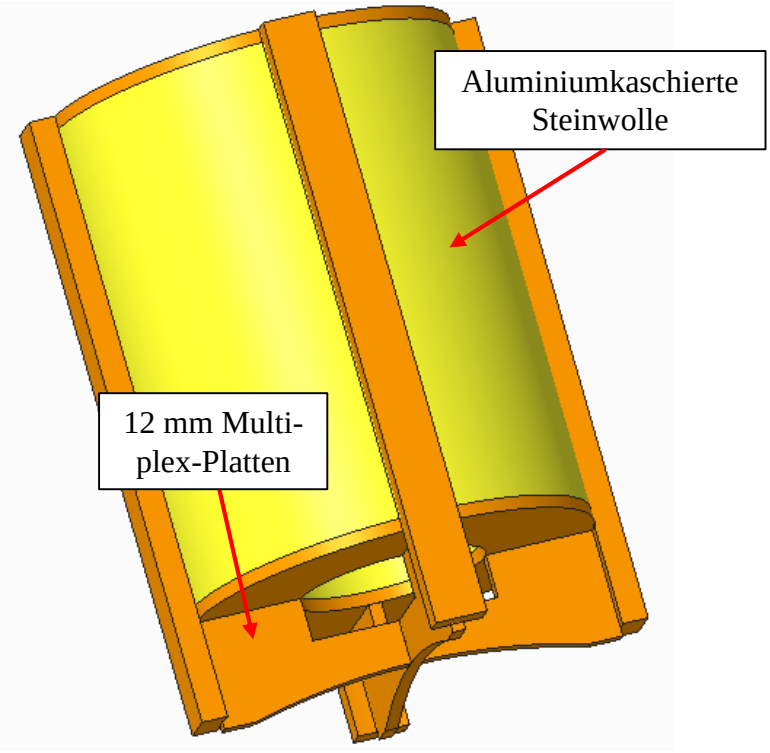


Abbildung 21: Aufständerung und Isolierung

Die Anlage kann mit aluminiumkaschierter Steinwolle isoliert werden, ähnlich wie es bereits in der Heizungsrohrisolation Verwendung findet. Die Wolle mit einer Stärke von 100 mm ist im Fachhandel erhältlich und wird zum Oberflächenschutz mit einer PVC-Hartfolie ummantelt. Alternativ kann eine umweltverträglichere Perlitschüttung verwendet werden. Dazu wird der Freiraum zwischen einer von außen verschlossenen Aufständerung und dem Reaktor mit dem Gesteinsmaterial aufgefüllt. Bei Wartungsarbeiten an der Anlage muss der Perlit jedoch stets abgesaugt und anschließend wieder eingebracht werden.

5.5.6 Gesamtübersicht

Die Explosionsansicht in Abbildung 22 zeigt zur besseren Übersicht alle benötigten Bauteile des Reaktors.

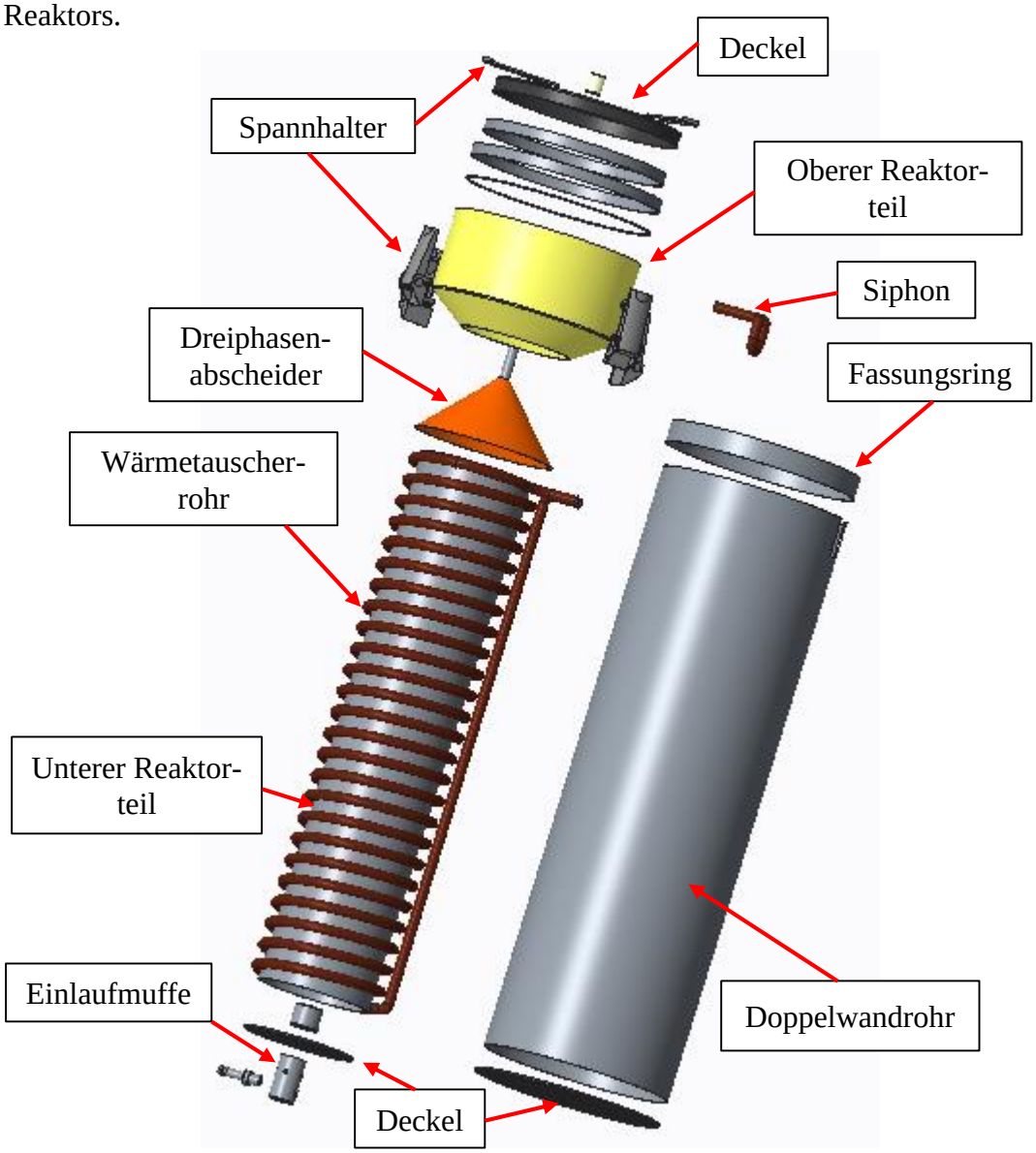


Abbildung 22: Explosionsansicht des Reaktors

5.6 Weitere betriebsnotwendige Anlagenteile

5.6.1 Pumpensystem

Das Substrat muss von einem Vorhaltekanister in den Zulaufschlauch des Reaktors gepumpt werden, danach wird auf Zirkulationsbetrieb umgeschaltet. Das behandelte Substrat fließt anschließend in einen zweiten Auffangkanister. Um die Anlage preisgünstig zu halten, ist nur eine Pumpe für die Flüssigkeitsförderung vorgesehen. Zur Auslegung des geforderten Volumenstroms wird die gewünschte Aufstiegsgeschwindigkeit des Flüssigkeitspegels sowie die Grundfläche im Fermenter benötigt. Die Aufstiegsgeschwindigkeit liegt laut Anforderungsliste zwischen 0,5-6 m/h; der Durchmesser der Grundfläche des Reaktors beträgt 0,1 m. Der minimale bzw. maximale Volumenstrom berechnet sich daher wie folgt:

$$Q = A \cdot v \qquad \text{(Gl. 11)}$$

$A = Reaktorfläche\ [m^2]$

$Q = Volumenstrom\ \left[\frac{m^3}{h}\right]$

$v = Aufstiegsgeschwindigkeit\ \left[\frac{m}{h}\right]$

$Minimaler\ Volumenstrom\colon\ \frac{\pi \cdot (0{,}1\ m)^2}{4} \cdot 0{,}5\,\frac{m}{h} = 3{,}93 \cdot 10^{-3}\,\frac{m^3}{h} = 3{,}93\,\frac{l}{h}$

$Maximaler\ Volumenstrom\colon\ \frac{\pi \cdot (0{,}1\ m)^2}{4} \cdot 6\,\frac{m}{h} = 0{,}047\,\frac{m^3}{h} = 47\,\frac{l}{h}$

Diese geringen Volumenströme erfordern Förderanlagen wie Kolben-, Membran-, oder Peristaltikpumpen. Aufgrund ihrer Fähigkeit, nur kleine Flüssigkeitsmengen zu bewegen, werden die genannten Pumpen zu Dosierzwecken, im Laborbetrieb oder als Kraftstoffpumpen eingesetzt.

Kolben- und Membranpumpen arbeiten hierbei beide nach dem Verdrängerprinzip. Mittels Volumenvergrößerung wird das Fluid angesaugt und anschließend durch eine Verkleinerung des Volumens wieder abgegeben. Wenn mehrere Kolben verwendet werden, wird der Volumenstrom annähernd pulsationsfrei. Bei Membranpumpen wird anstatt des Kolbens eine flexible Membran aus Gummi oder Kunststoff verwendet. Damit wird eine bessere Abdichtung der beweglichen Teile der Pumpe erzielt, sodass im Gegensatz zur Kolbenpumpe auch Flüssigkeiten mit gewissen Feststoffanteilen gefördert werden können [24].

Die Funktion der Peristaltikpumpe (oder Schlauchpumpe) beruht zwar auch auf der Verdrängung, jedoch wird dies durch die Quetschung eines Schlauchstücks erreicht. Durch mehrere rotierend gelagerte Rollen wird ein kreisförmig eingespanntes Schlauchstück umlaufend zusammengedrückt und somit die Flüssigkeit vorneweg geschoben. Mit dieser Technik ist eine hohe Dosiergenauigkeit möglich, allerdings verschleißt der eingesetzte Schlauch aufgrund der mechanischen Belastung und muss daher regelmäßig gewechselt werden [25].

Preisgünstige Kolben- und Membranpumpen (< 50 €) sind in Form von Kraftstoffpumpen mit Förderleistungen bis 100 l/h im Fachhandel zu erwerben, jedoch ist deren Volumenstrom meist nicht einstellbar und muss daher anderweitig (durch Ventile) begrenzt werden.

Eine Möglichkeit der günstigen Beschaffung von Peristaltikpumpen bietet sich im Aquarienzubehör (Dosierpumpen) oder in der Medizintechnik (Magensonde).

Für professionelle Laboranwendungen stellen Firmen wie Hitec Zang GmbH oder Sera GmbH Anlagenlösungen mit präzise einstellbarer Volumenstrommenge und zudem geeignetes Zubehör (Muffen, Schläuche, Ventile) her. Angebote für passende Pumpen wurden eingeholt und sind im Anhang einsehbar.

5.6.2 Gasfangsack

Der Gasfangsack muss das Produktgas mit den Hauptbestandteilen Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid zu Analysezwecken zwischenspeichern. Das erforderliche Speichervolumen des Foliensacks berechnet sich unter Normdruckbedingung von 101325 Pa und einer durchschnittlichen Raumtemperatur des Labors von 20 °C. Wird eine maximale Umsetzungsrate von Glucose zu Essigsäure zugrunde gelegt, bilden sich 2 mol CO_2 und 4 mol H_2 (siehe Gl. 2). Wenn eine Substratmenge von 5 l mit einem empfohlenen Glucosezusatz von 50 g (vgl. Rechtenbach [2]) eingesetzt wird, berechnet sich das entstehende Gasvolumen folgendermaßen:

Zuerst werden die produzierten Massen berechnet:

$$M = \frac{m}{n} \qquad \text{(Gl. 12)}$$

$M: Molmasse \left[{}^{g}/_{mol}\right]$

$m: Masse\ [g]$

$n: Stoffmenge\ [mol]$

Molmasse von $C_6H_{12}O_6$: 180,16 g / mol [26]

$$\Rightarrow n_{C_6H_{12}O_6} = \frac{m_{C_6H_{12}O_6}}{M_{C_6H_{12}O_6}} \Rightarrow n_{n_{C_6H_{12}O_6}} = \frac{50g}{180{,}16\ {}^{g}/_{mol}} = 0{,}278\ mol$$

Molmasse von CO_2: 44,01 g / mol [26] (2 mol gebildet)

$$\Rightarrow m_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot n_{C_6H_{12}O_6} = 2 \cdot 44{,}01\ {}^{g}/_{mol} \cdot 0{,}278\ mol = 24{,}47g$$

Molmasse von H_2: 2,016 g / mol [26] (4 mol gebildet)

$$\Rightarrow m_{H_2} = M_{H_2} \cdot n_{C_6H_{12}O_6} = 4 \cdot 2{,}016\ {}^{g}/_{mol} \cdot 0{,}278\ mol = 2{,}24\ g$$

Nun wird das Volumen mit der allgemeinen Gasgleichung abhängig der Laborbedingungen berechnet:

$$P \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \qquad \text{(Gl. 13)}$$

$P: Druck\ [Pa]$

$V: Volumen\ [m^3]$

$m: Masse\ [kg]$

$R_s: spezifische\ Gaskonstante\ \left[{}^{J}/_{kg \cdot K}\right]$

$T: Temperatur\ [K]$

Spezifische Gaskonstante von CO_2: 188,922 J / kg K [27]

$$\Rightarrow V_{CO_2} = \frac{m_{CO_2} \cdot R_{s_{CO_2}} \cdot T_{Labor}}{P_{Labor}} = \frac{0{,}02447\ kg \cdot 188{,}922\,{}^{J}/_{kg \cdot K} \cdot 293{,}15\ K}{101325\ Pa} = 0{,}01337\ m^3$$

Spezifische Gaskonstante von H_2: 4124,237 J / kg K [27]

$$\Rightarrow V_{H_2} = \frac{m_{H_2} \cdot R_{s_{H_2}} \cdot T_{Labor}}{P_{Labor}} = \frac{0{,}00224\ kg \cdot 4124{,}237\ {}^{J}/_{kg \cdot K} \cdot 293{,}15\ K}{101325\ Pa} = 0{,}02673\ m^3$$

$$V_{Ges} = V_{CO_2} + V_{H_2} = 40{,}1\ l$$

Das produzierte Gesamtvolumen bei 50 g Glucose beträgt unter optimalen Bedingungen also knapp über 40 Liter. Da nicht das gesamte Substrat in Essigsäure umgewandelt wird, kann vermutlich ein deutlich geringerer Betrag erwartet werden. Der Gasfangsack sollte aus Sicherheitsgründen dennoch dieses Maximalvolumen aufweisen.

5.6.3 Manometer

Zwar ist der Reaktorinnenraum selbst drucklos bzw. entweicht Gas bei ansteigendem Druck aus der Ablaufbohrung, jedoch muss zur Berechnung des Ertrags in Normbedingungen ein Manometer installiert sein. Dieses ist am Verbindungsrohr zwischen Gasabscheider und Gasfangsack zwischengeschaltet.

5.6.4 Temperatur

Die gesamte Anlage sollte über drei Thermometer zur Temperaturüberwachung verfügen. Eines am unteren Einlauf am Reaktor, im Wasserbecken des Wärmetauschers. Hier wird die richtige Temperatur in der Doppelwand überprüft. Weiterhin ein Thermometer im Reaktor auf Höhe des Dreiphasenabscheiders, welches die Temperatur des behandelten Substrats angibt. Ein letztes Thermometer befindet sich an der Gasentnahmestelle nahe des Gasfangsacks, um die gewonnenen Gasmengen auf Normbedingungen umrechnen zu können.

6 Analysemethoden

Um die Funktionsfähigkeit und Produktivität des Reaktors zu belegen, soll die CSB-Abbaurate, der Gehalt organischer Säuren sowie die Wasserstoff- und CO_2-Menge im Produktgas festgestellt werden. Für einen Teil der Tests kann auf das bereits im Energie- und Umwelttechniklabor vorhandene Spektralphotometer DR 3900 von Hach Lange zurückgegriffen werden (siehe Abb. 22).

Abbildung 23: Spektralphotometer DR 3900 Hach Lange

6.2 Chemischer Sauerstoffbedarf

Der chemische Sauerstoffbedarf gibt an, wieviel Sauerstoff zum vollständigen Abbau eines organischen Stoffes (Oxidation) in die Endprodukte CO_2 und H_2O notwendig wäre. Diese Messgröße wird meist bei der Abwasserbehandlung verwendet, da auf relativ einfache Weise die Abbauleistung z.B. einer Kläranlage überprüft werden kann [28].

Bei Versuchen mit dem UASB-Reaktor kann der CSB die Abbauleistung der Anlage quantifizieren, indem das Substrat vor und nach Behandlung analysiert wird. Wird Glucoselösung als Substrat eingesetzt, werden für ein Mol $C_6H_{12}O_6$ sechs Mol O_2 zur kompletten Oxidation benötigt (siehe Gl. 14) [28].

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O \qquad \text{(Gl. 14)}$$

Anhand des Spektralphotometers kann nun der tatsächliche CSB des behandelten Substrats ermittelt und somit Rückschlüsse auf die Effizienz der Fermentation gezogen werden.

6.3 organische Säuren

Der Anteil organischer Säuren im Substrat kann ebenfalls durch einen Küvettentest, erhältlich im Zubehörsortiment der Firma Hach Lange GmbH für das Spektralphotometer DR3900, bestimmt werden. Insbesondere die Menge an Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure und Milchsäure (vgl. Gl. 2 - 6) im behandelten Substrat informiert über die maximal mögliche Wasserstoffumsetzungsrate. Aber auch die Identifikation organischer Säuren im unbehandelten Substrat legt die Erfolgsaussichten für eine hohe Wasserstoffausbeute dar, vor allem bei Verwendung von Abwässern aus der hydrothermalen Karbonisierung mit unbekanntem Säuregehalt.

6.4 Wasserstoff

Der Wasserstoffgehalt eines Produktgases wird üblicherweise durch Wärmeleitfähigkeitsdetektoren bestimmt. Diese bestehen aus zwei Messzellen mit Heizdrähten. In einer Zelle wird das zu messende Gas eingeleitet, in der anderen befindet sich ein Reingas zur Referenzmessung. Die Einleitung unterschiedlicher Gaszusammensetzungen hat eine Veränderung des elektrischen Widerstands der Heizdrähte zur Folge, demnach kann über eine Spannungsvergleichsmessung der Drähte der Wasserstoffgehalt des Messgases analysiert werden [29, 30].

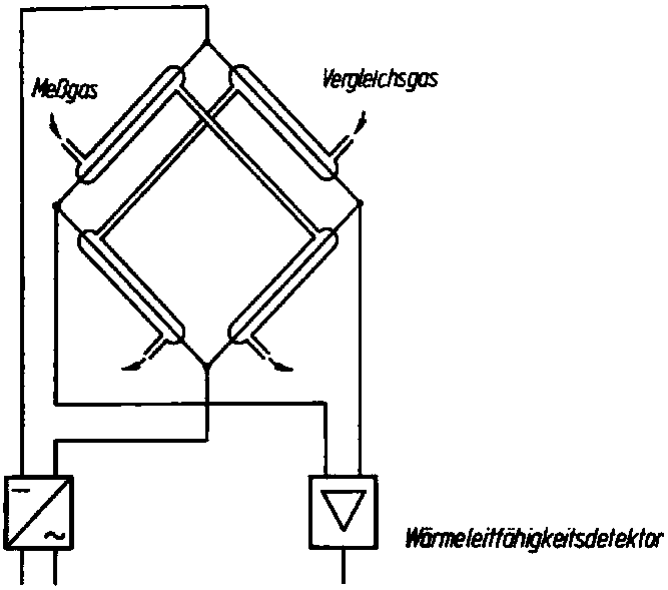


Abbildung 24: Funktionsprinzip des Wärmeleitfähigkeitsdetektors [30]

6.6 Kohlenstoffdioxid

Neben Wasserstoff ist Kohlenstoffdioxid der zweitgrößte Bestandteil des Produktgases. Stoffwechselbedingt kann es bei der Bildung von Butter- oder Propionsäure die Hälfte des erzeugten Gases ausmachen (siehe Gl. 3 - 4).

In Biogasanlagen wird der CO_2-Gehalt zwar meist über Infrarotsensoren ermittelt [1], jedoch kann auch hier der Wärmeleitfähigkeitsdetektor eingesetzt werden. Somit wird auf eine weitere Anlage verzichtet und es kommt eine vergleichsweise günstige Methode der Gasanalytik zum Einsatz [29].

7 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Konstruktion eines UASB-Reaktors im Labormaßstab, der durch Fermentation von Glucoselösung oder HTC-Abwasser Biowasserstoff gewinnt. Dafür wurde der biologische Prozess der Produktion gasförmigen Wasserstoffs beschrieben und die Unterschiede zur herkömmlichen Biogaserzeugung aufgezeigt. Um die dargestellte theoretische Wasserstoffausbeute zu erreichen, wurden Möglichkeiten zur Einflussnahme anhand verschiedener Parameter erläutert.

Weiterhin wurde die konventionelle UASB-Technik und heutige Weiterentwicklungen des Systems vorgestellt.

Anhand der Unterlagen der Tintschl-GmbH konnte analysiert werden, dass die hauptsächlichen Probleme im Betrieb durch eine Zweckentfremdung des Anlagentyps hervorgerufen wurden.

Im konstruktiven Teil konnte ein ideales Modell für einen UASB-Reaktor im Labormaßstab entworfen werden. Die Forderung einer kostengünstigen sowie störunauffälligen Betriebsweise und eines einfachen Aufbaus wurde bei jeder benötigten Komponente berücksichtigt. Verschiedene Möglichkeiten der Gestaltung und Instrumentierung wurden aufgeführt, verglichen und anschließend die geeignetsten Entwürfe gewählt. Dabei wurde darauf geachtet, verfügbare Technik der Hochschule Landshut zu nutzen sowie eine Fertigung durch die Hinneburg GmbH zu ermöglichen. Die weiteren betriebsnotwendigen Anlagenteile wurden beschrieben und für den Einsatz am Laborreaktor passend ausgelegt.

Zuletzt wurde die erforderliche Instrumentierung zur Analyse des Produktgases und der flüssigen Phase ermittelt und beschrieben. Zur Bestimmung der erzeugten Menge an H_2 und CO_2 kann ein Wärmeleitfähigkeitsdetektor, zur Bestimmung des CSB und der organischen Säuren ein Spektralphotometer, das bereits in der Hochschule vorhanden ist, verwendet werden.

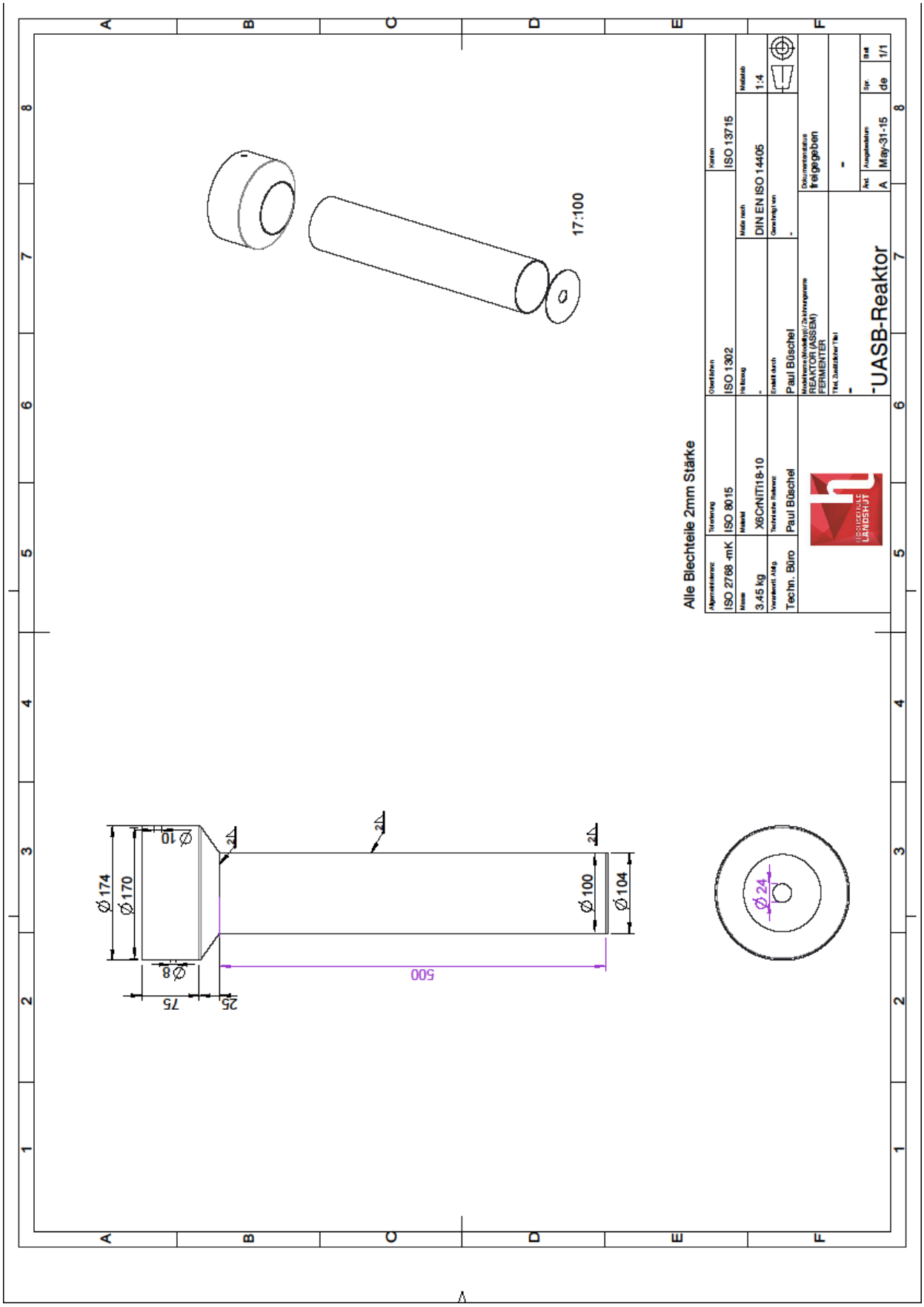
8 Fazit

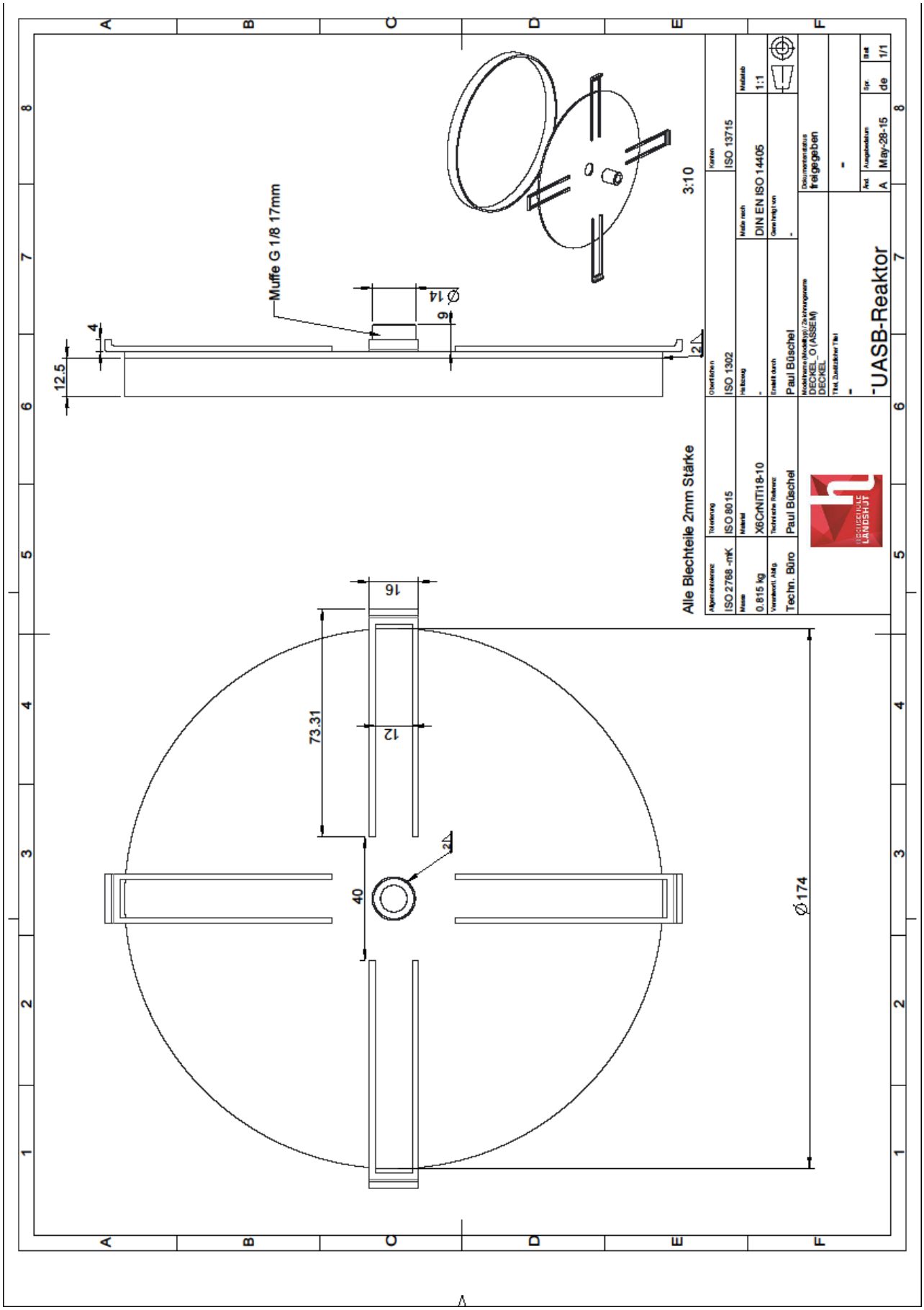
Bereits ein verschließbares Behältnis, etwas Komposterde, Rübenschnitzel und heißes Wasser sind ausreichend, um Wasserstoff auf fermentativen Weg herzustellen [31]. Diese geringe Anzahl benötigter Mittel zeigt, dass der Biowasserstoffproduktion ein einfacher Mechanismus zugrunde liegt.

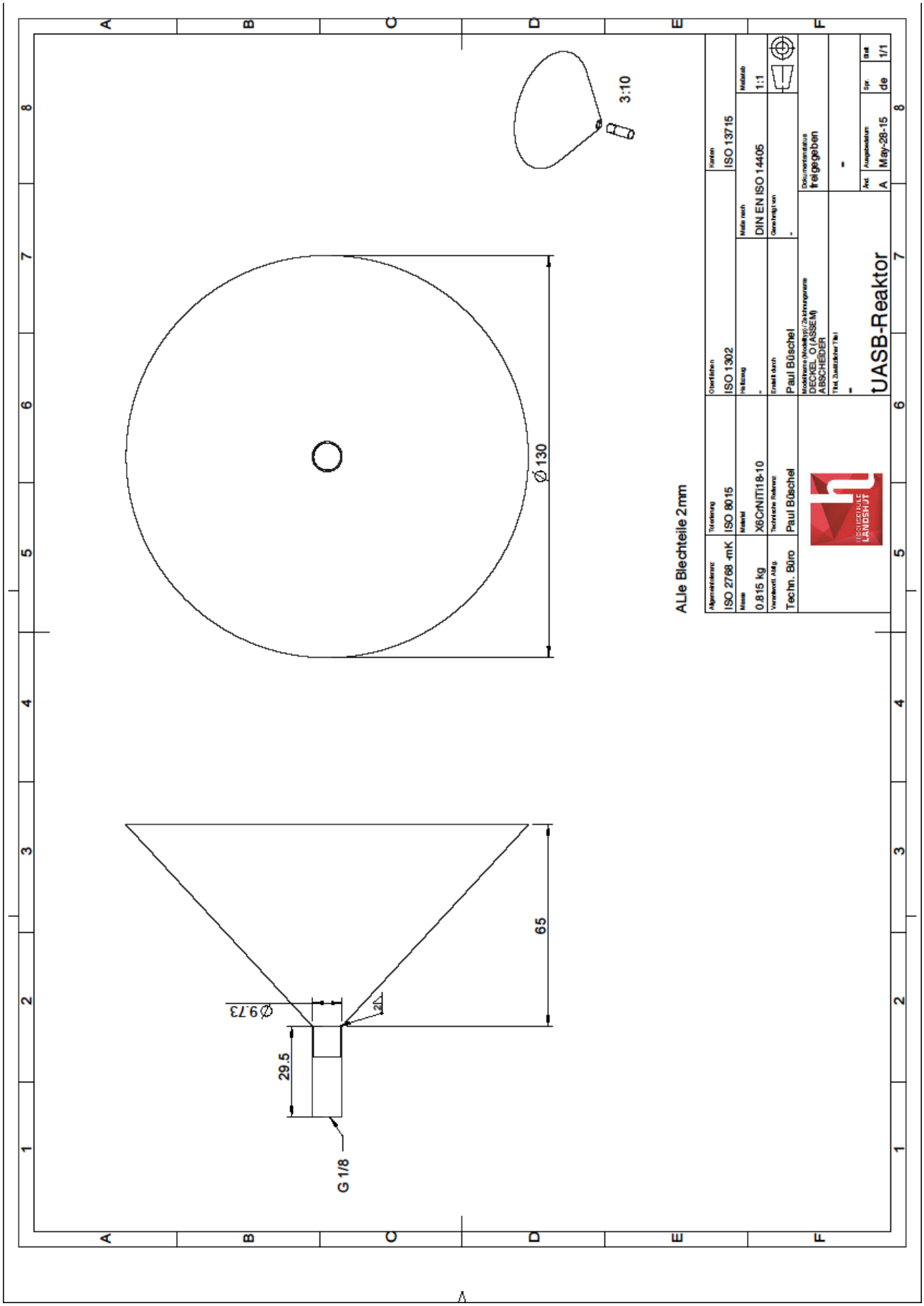
Die Schwierigkeit besteht an der Umsetzung einer stabilen Prozessführung mit reproduzierbaren Ergebnissen, wofür die UASB-Technologie besonders geeignet ist. Überall auf der Welt eingesetzt, überzeugen UASB-Reaktoren durch ihren simplen Aufbau und ihre zuverlässige Betriebsweise. Dieser Anlagentyp bietet daher die Möglichkeit, die optimalen Bedingungen für einen hohen Wasserstoffertrag zu erforschen, ohne sich mit technischen Problemen aufhalten zu müssen.

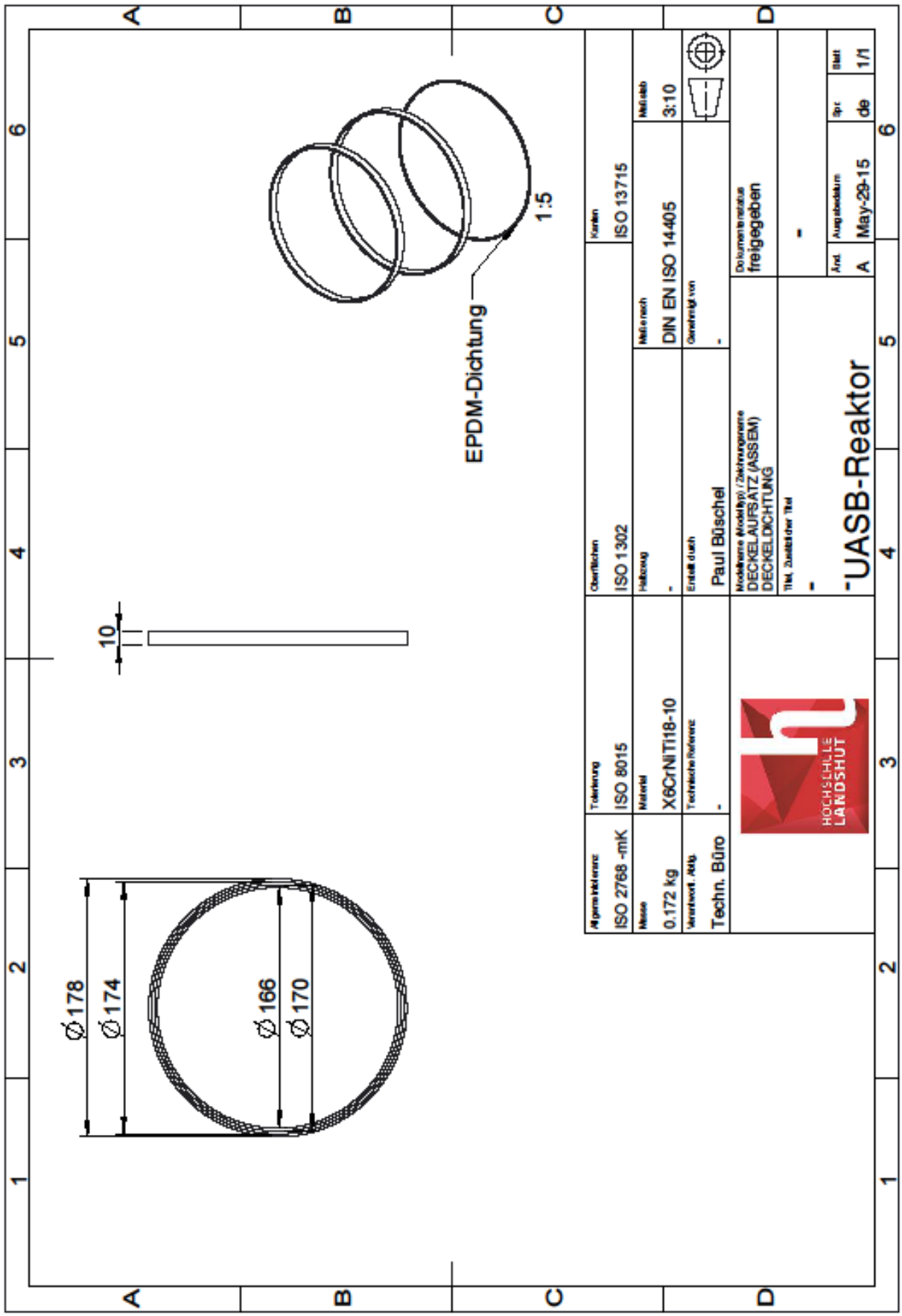
Wie in Kapitel 2.3.1 erwähnt, ist ein üblicherweise hoher Anteil organischer Säuren im Abwasser der hydrothermalen Karbonisierung problematisch für die bakterielle Umsetzung zu Wasserstoff. Daher muss im Interesse einer hohen Gasausbeute der Vorprozess möglichst so eingestellt werden, dass ein hoher Anteil an kurzkettigen Kohlenhydraten im Substrat vorliegt. Wenn es gelingt, die beiden Prozessstufen der „Bioraffinerie“ gut aufeinander abzustimmen, ist ein hocheffizienter Betrieb der Gesamtanlage möglich.

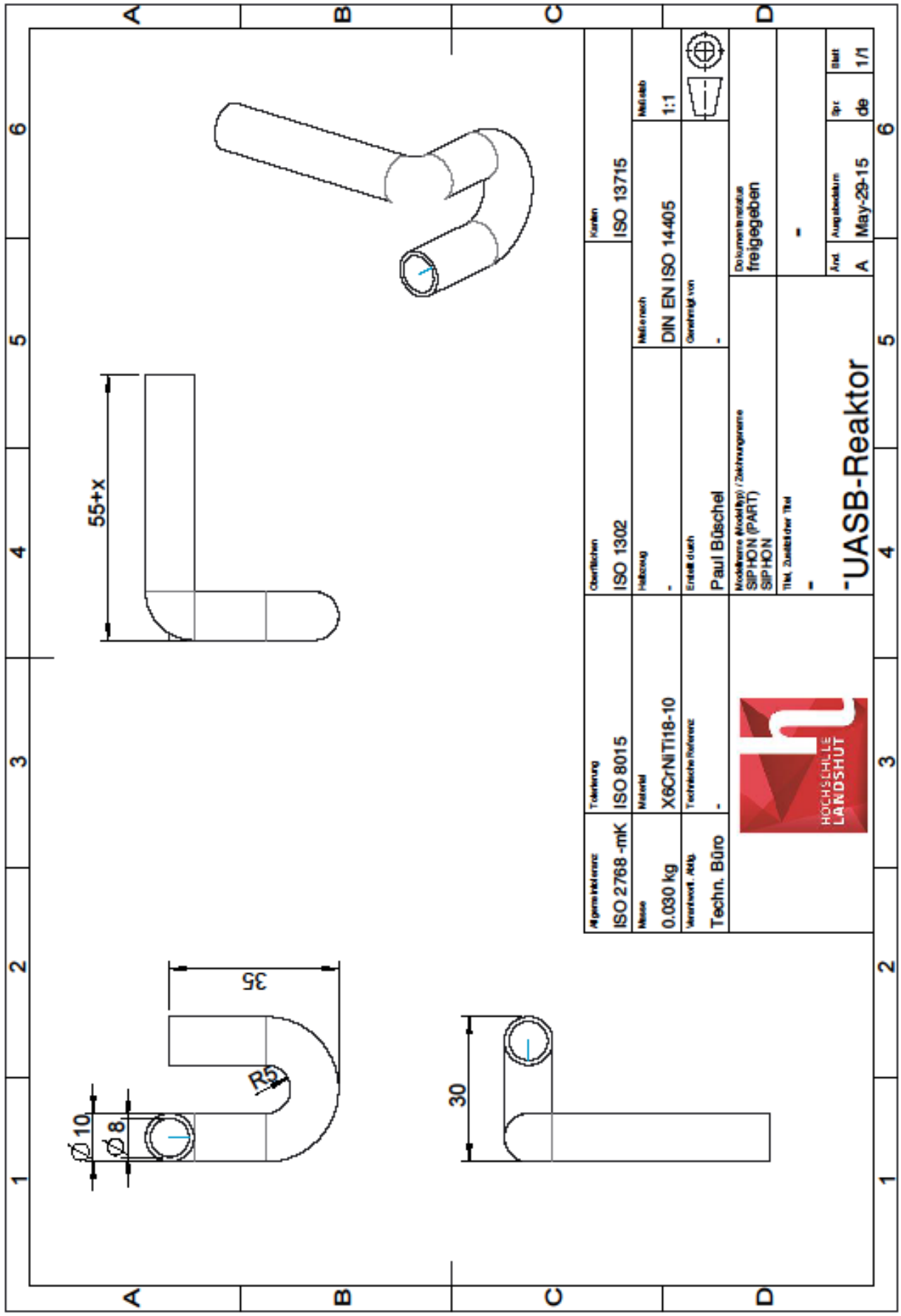
Anhang A: Konstruktionszeichnungen

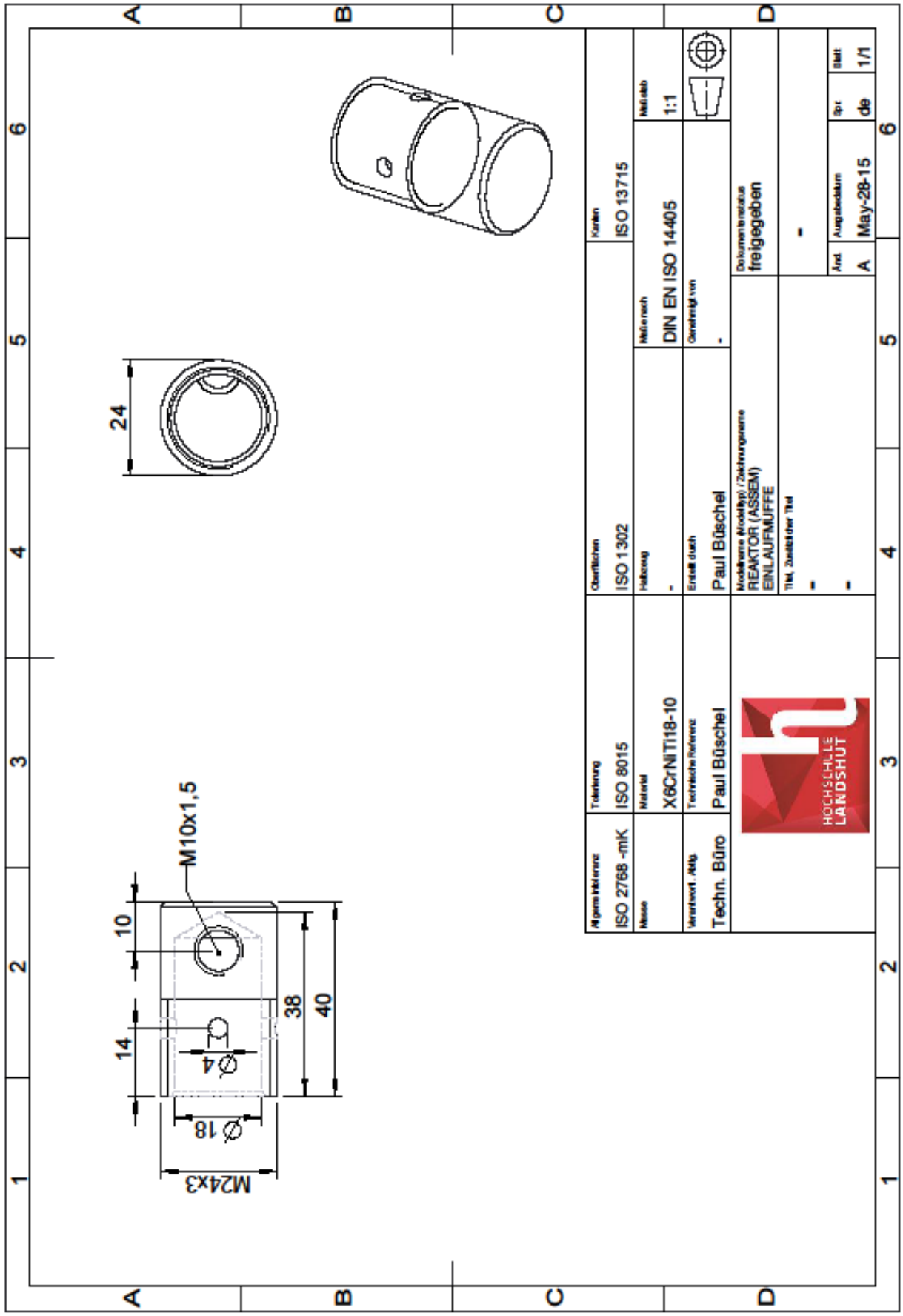


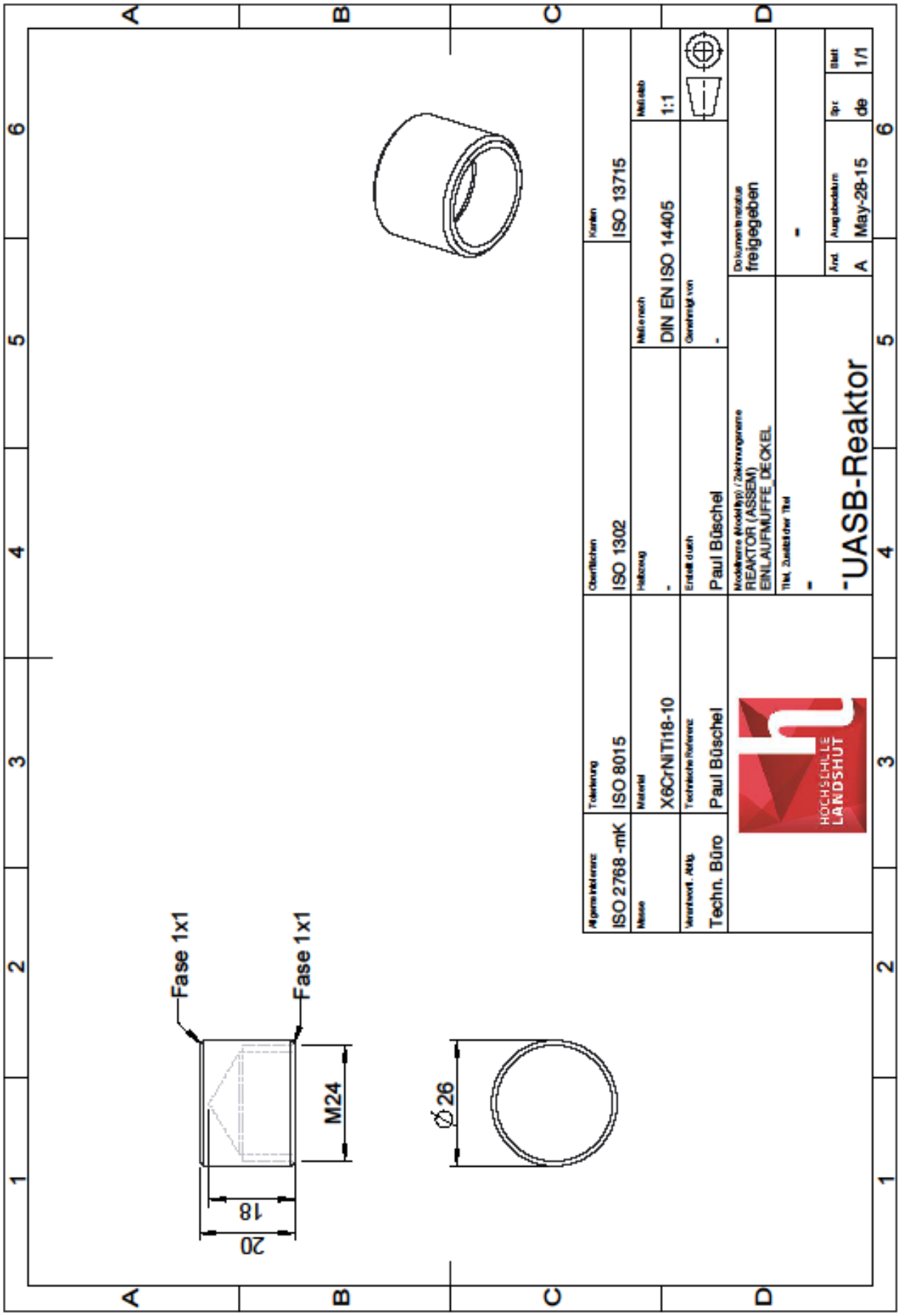

Muffe G 1/8 17mm
Ø14
6
4
12.5
2
3:10
16
73.31
12
40
2
Ø174
Alle Blechteile 2mm Stärke
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranzen
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
0.615 kg
Material
X6CrNiTi18-10
Härtung
-
Maße nach
DIN EN ISO 14405
Maßstab
1:1
Verantwortl. Abtg
Techn. Büro
Technische Referenz
Paul Büschel
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
-
Modellname/Modellnr./Zeichnungsname
DECKEL_O (ASSEM)
DECKEL
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusätzlicher Titel
-
-
UASB-Reaktor
Änd.
A
Ausgabedatum
May-28-15
Spr.
de
Blatt
1/1

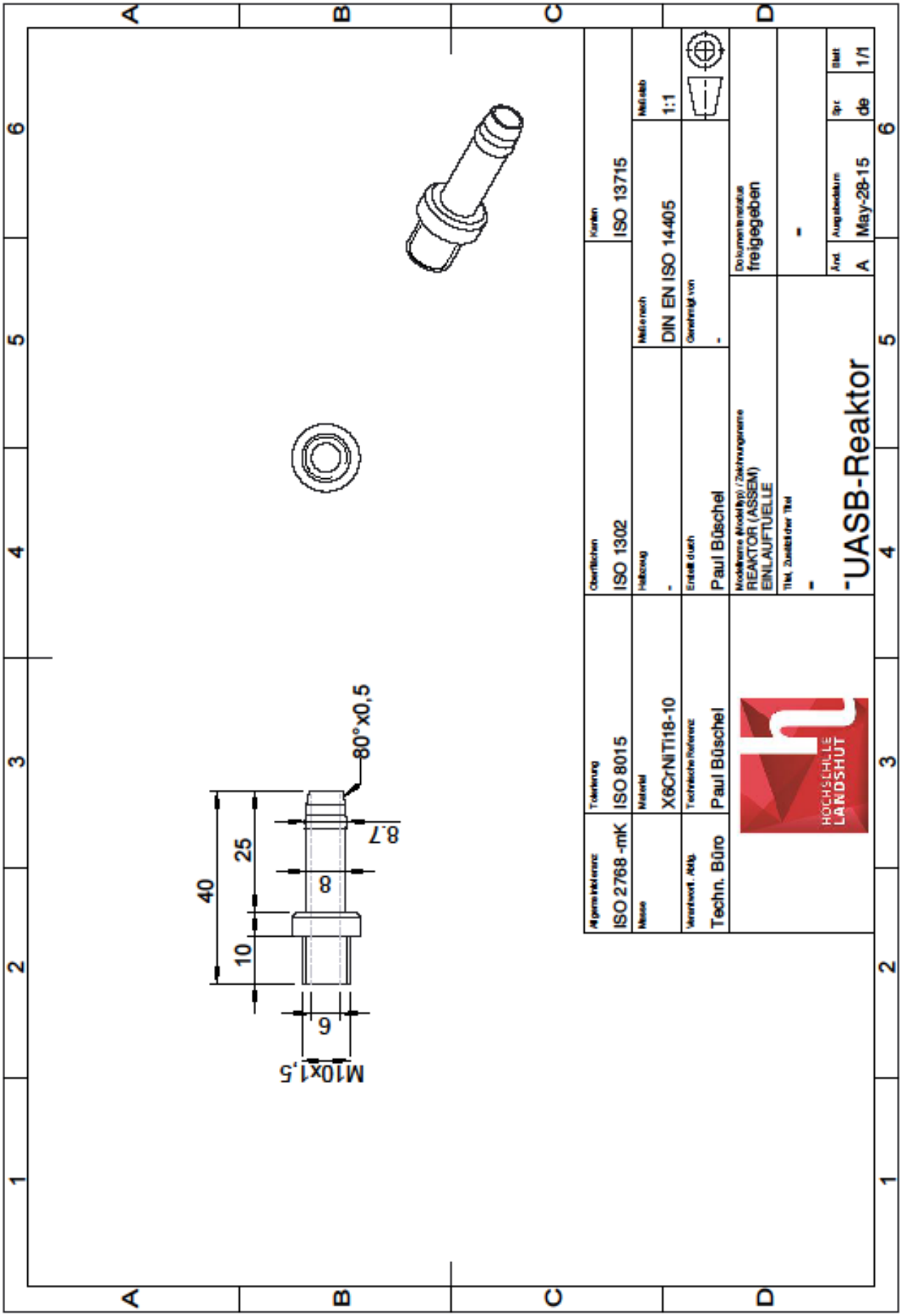

3:10
Ø130
65
Ø9.73
29.5
G 1/8
ALle Blechteile 2mm
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Tolerierung
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
0.815 kg
Material
X6CrNiTi18-10
Halbzeug
-
Maße nach
DIN EN ISO 14405
Maßstab
1:1
Verantwortl. Abtg.
Techn. Büro
Technische Referenz
Paul Büschel
Erstellt durch
Paul Büschel
Gewichtsgruppe
-
Modellname (Modellteil/ Zeichnungsname)
DECKEL (ASSEM)
ABSCHEIDER
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusätzlicher Titel
-
-
UASB-Reaktor
HOCHSCHULE LANDSHUT
Änd.
A
Ausgabedatum
May-28-15
Spr.
de
Blatt
1/1

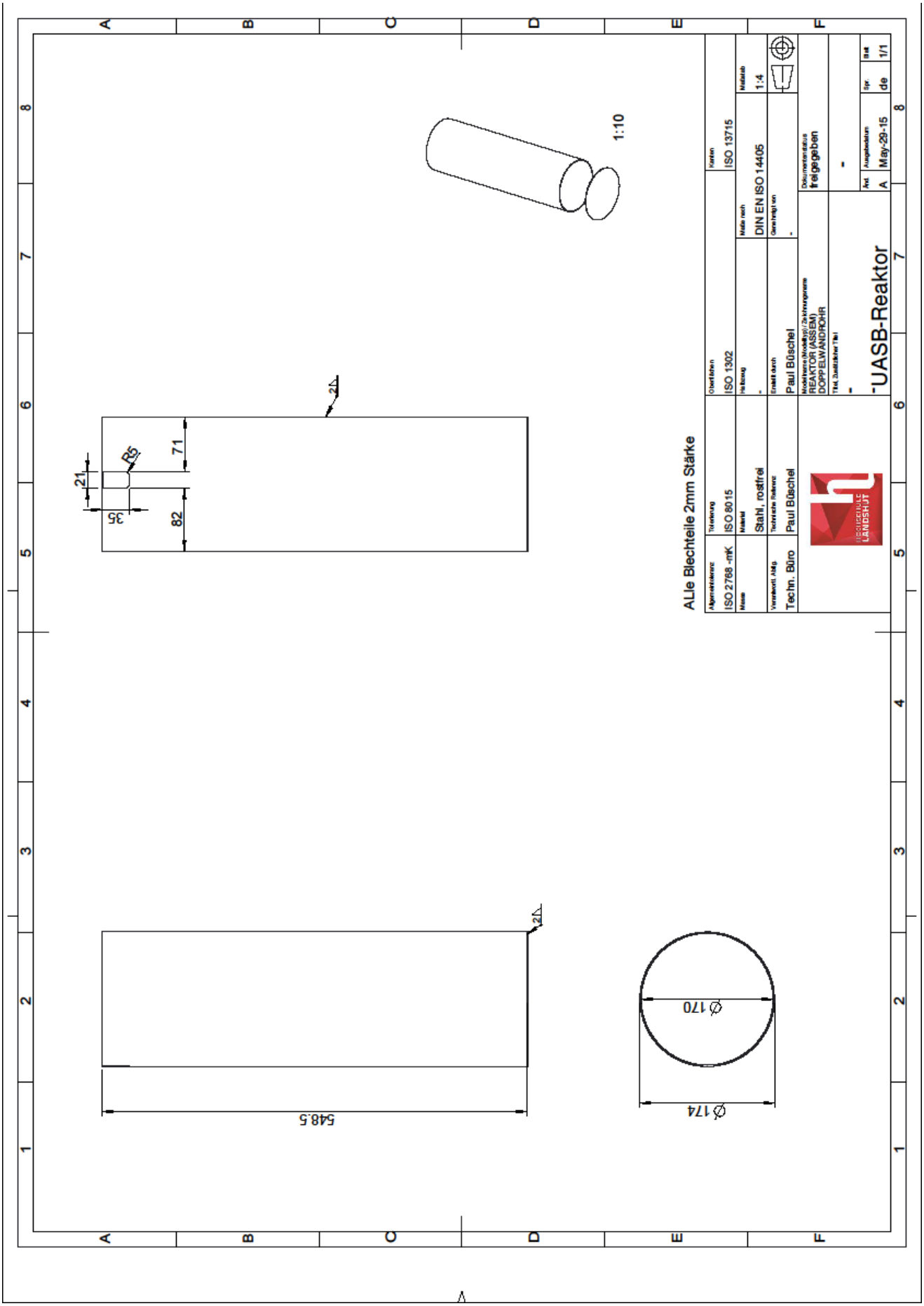

EPDM-Dichtung
1:5
10
Ø178
Ø174
Ø166
Ø170
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranz
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
0,172 kg
Material
X6CrNiTi18-10
Halbzeug
-
Maßnorm
DIN EN ISO 14405
Maßstab
3:10
Verantwortl. Abtlg.
Techn. Büro
Technische Referenz
-
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
-
Modellname Modelltyp / Zeichnungsname
DECKELAUFSATZ (ASSEM)
DECKELDICHTUNG
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusätzlicher Titel
-
-
UASB-Reaktor
Änd.
A
Ausgabedatum
May-29-15
Spr.
de
Blatt
1/1
HOCHSCHULE LANDSHUT

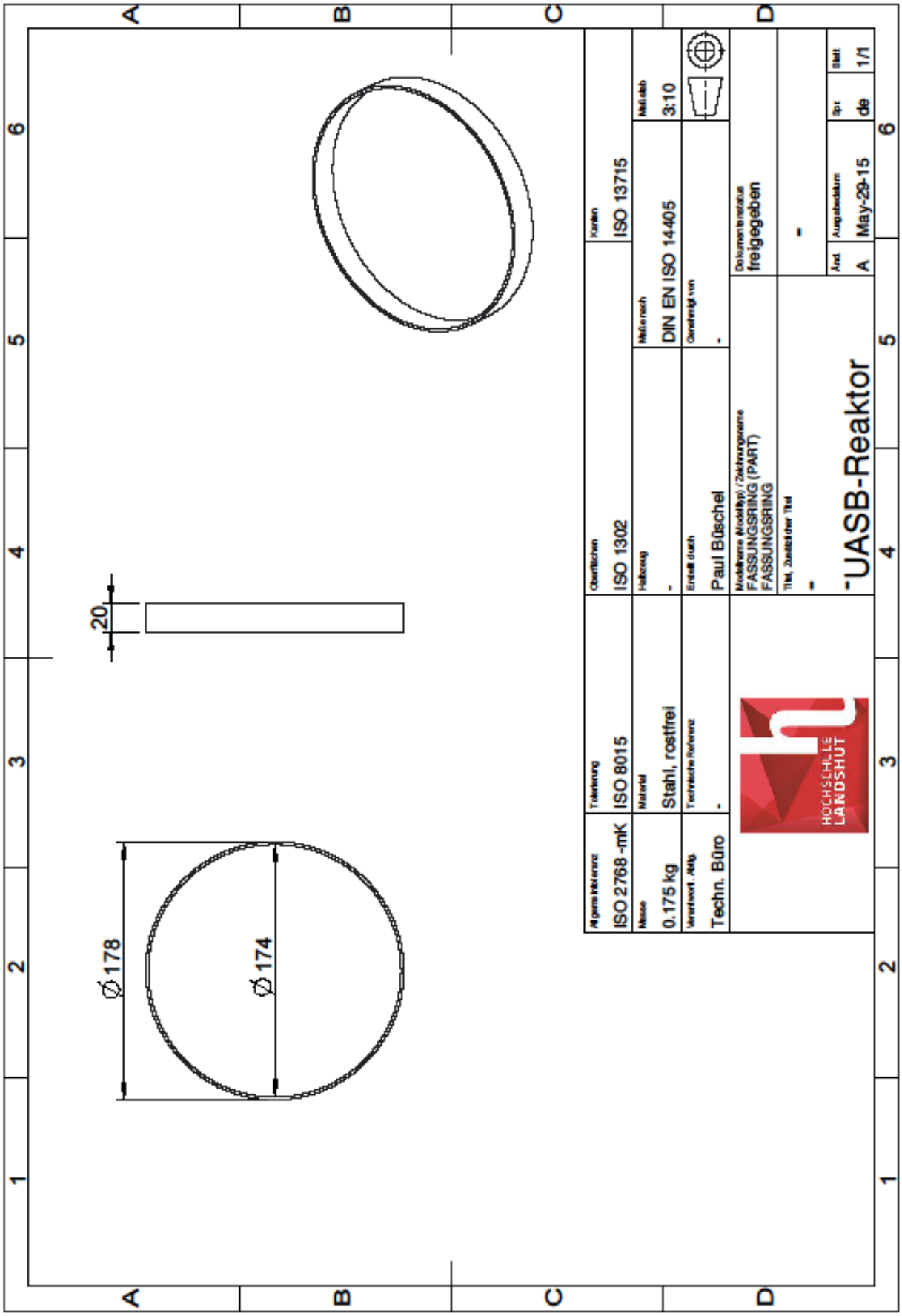

55+x
35
R5
Ø10
Ø8
30
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranzen
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
0.030 kg
Material
X6CrNiTi18-10
Halbzeug
-
Maßeinheit
DIN EN ISO 14405
Maßstab
1:1
Verantwort. Abtg.
Techn. Büro
Technische Referenz
-
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
-
Modellierte Modell(e) / Zeichnungsnr.
SIPHON (PART)
SIPHON
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusatz der Titel
-
-
UASB-Reaktor
Änd.
A
Ausgabedatum
May-29-15
Spr.
de
Blatt
1/1
HOCHSCHULE LANDSHUT

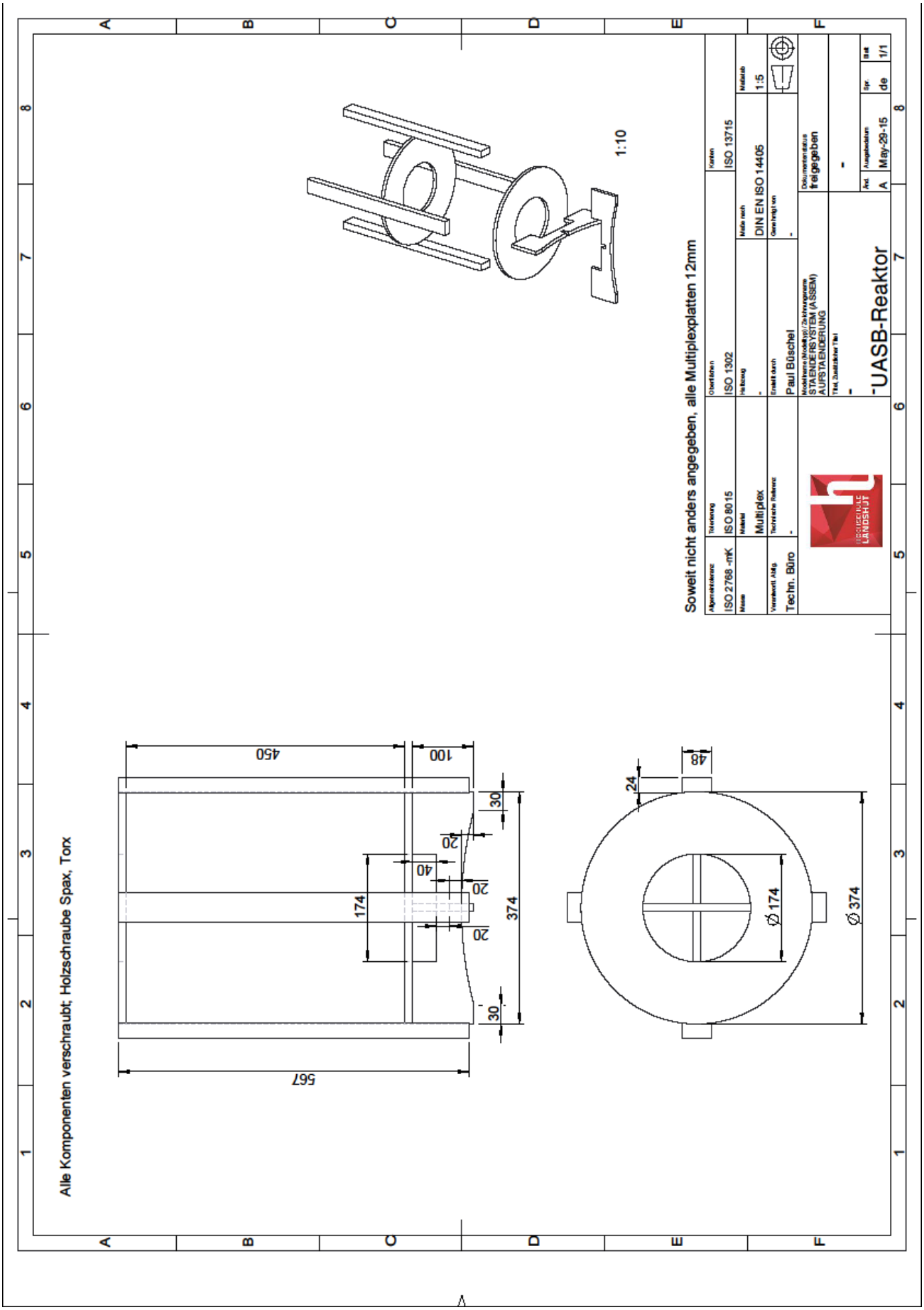

24
M10x1,5
10
14
Ø4
38
40
Ø18
M24x3
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranzen
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
Material
X6CrNiTi18-10
Halbzeug
-
Maßstab
1:1
Maßnormen
DIN EN ISO 14405
Verantwortl. Abtlg.
Techn. Büro
Technische Referenz
Paul Büschel
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
-
Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname
REAKTOR (ASSEM)
EINLAUFMUFFE
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusatz der Titel
-
-
-
Änd.
A
Ausgabedatum
May-28-15
Spr.
de
Blatt
1/1
HOCHSCHULE LANDSHUT


Fase 1x1
Fase 1x1
M24
18
20
Ø26
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranzen
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
Material
X6CrNiTi18-10
Halbzeug
-
Maßeinheit
DIN EN ISO 14405
Maßstab
1:1
Verantwortl. Abtg.
Techn. Büro
Technische Referenz
Paul Büschel
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
-
HOCHSCHULE LANDSHUT
Modellierung (Modelltyp) / Zeichnungsnummer
REAKTOR (ASSEM)
EINLAUFMUFFE_DECKEL
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusätzlicher Titel
-
-
UASB-Reaktor
Änd.
A
Ausgabedatum
May-28-15
Spr.
de
Blatt
1/1


M10x1,5
6
10
40
25
8
8,7
80°x0,5
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranz
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
Material
X6CrNiTi18-10
Halbzeug
-
Maßstab nach
DIN EN ISO 14405
Maßstab
1:1
Verantwortl. Abtlg.
Techn. Büro
Technische Referenz
Paul Büschel
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
-
Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname
REAKTOR (ASSEM)
EINLAUFTÜELLE
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusätzlicher Titel
-
-
-UASB-Reaktor
HOCHSCHULE LANDSHUT
Änd.
A
Ausgabedatum
May-28-15
Spr.
de
Blatt
1/1


1:10
2A
R5
71
21
35
82
548.5
Ø170
Ø174
ALle Blechteile 2mm Stärke
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Tolerierung
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
Material
Stahl, rostfrei
Halbzeug
Maße nach
DIN EN ISO 14405
Maßstab
1:4
Verantwortl. Abtlg.
Techn. Büro
Technische Referenz
Paul Büschel
Erstellt durch
Paul Büschel
Gemeinfrei von
Modellname (Modellty)/ Zeichnungsname
(REAKTOR (ASSEM)
DOPPELWANDROHR
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusätzlicher Titel
UASB-Reaktor
Rev.
A
Ausgabedatum
May-29-15
Spr.
de
Blatt
1/1


Ø178
Ø174
20
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranzen
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
0.175 kg
Material
Stahl, rostfrei
Halbzeug
-
Maße nach
DIN EN ISO 14405
Maßstab
3:10
Verantwort. Abtlg.
Techn. Büro
Technische Referenz
-
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
-
Modellname (Modelltyp) / Zeichnungsname
FASSUNGSRING (PART)
FASSUNGSRING
Dokumentenstatus
freigegeben
Titel, Zusatz der Titel
-
-
UASB-Reaktor
Änd.
A
Ausgabedatum
May-29-15
Spr.
de
Blatt
1/1
HOCHSCHULE LANDSHUT


Alle Komponenten verschraubt; Holzschraube Spax, Torx
Soweit nicht anders angegeben, alle Multiplexplatten 12mm
1:10
567
450
100
174
374
30
20
40
48
24
Ø 174
Ø 374
Allgemeintoleranz
ISO 2768 -mK
Toleranzen
ISO 8015
Oberflächen
ISO 1302
Kanten
ISO 13715
Masse
Material
Multiplex
Halbzeug
Maße nach
DIN EN ISO 14405
Maßstab
1:5
Veranlasst Abtg.
Techn. Büro
Technische Referenz
Erstellt durch
Paul Büschel
Genehmigt von
Dokumentenstatus
freigegeben
Modellname(Modelltyp)/Zeichnungsname
STAENDERSYSTEM (ASSEM)
AUFSTAENDERUNG
Titel, Zusätzlicher Titel
UASB-Reaktor
Ant.
A
Ausgabedatum
May-29-15
Spr.
de
Blatt
1/1

Anhang B: Stückliste

Pos.	Name	Material	Menge	Anmerkungen
1	Unterer Reaktorteil	X6CrNiTi18-10	1	
2	Oberer Reaktorteil	X6CrNiTi18-10	1	
3	Reaktordeckel unten	X6CrNiTi18-10	1	
4	Einlaufmuffe	X6CrNiTi18-10	1	auch über Fachhandel erhältlich
5	Einlaufmuffendeckel	X6CrNiTi18-10	1	auch über Fachhandel erhältlich
6	Einlaufmuffentülle	X6CrNiTi18-10	1	auch über Fachhandel erhältlich
7	Abscheidetrichter	X6CrNiTi18-10	1	
8	Abscheiderrohr	X6CrNiTi18-10	1	
9	Abscheidermuffe	X6CrNiTi18-10	1	
10	Reaktordeckel oben	X6CrNiTi18-10	1	
11	Reaktordeckelrand oben	X6CrNiTi18-10	1	
12	Deckeldichtungsring klein	X6CrNiTi18-10	1	
13	Deckeldichtungsring groß	X6CrNiTi18-10	1	
14	Siphonrohr	X6CrNiTi18-10	1	
15	Deckeldichtung	EPDM	1	
16	Spannhaken	Edelstahl	4	Im Fachhandel erhältlich
17	Spannhalter	Edelstahl	4	Im Fachhandel erhältlich
18	Fassungsring	Edelstahl	1	
19	Doppelwandrohr	Edelstahl	1	
20	Doppelwandrohrdeckel	Edelstahl	1	
21	Heizwendel	Kupfer	1	Im Fachhandel erhältlich
22	Substratschlauch	Silikon	1	Im Fachhandel erhältlich
23	Schlauchklammern	Edelstahl	5	Im Fachhandel erhältlich
24	Standfuss rechts	Multiplex	1	
25	Standfuss links	Multiplex	1	
26	Kreisplatte	Multiplex	2	
27	Isolierung	Steinwolle, Aluminiumkaschiert	1	Im Fachhandel erhältlich
28	PVC-Hartfolie	PVC	1	Im Fachhandel erhältlich

Anhang C: Angebote Pumpen

Betreff **AW: Ihre Anfrage**
Von Laura Mohr <L.Mohr@sera-web.com>
An Paul Büschel <s-pbuesc@haw-landshut.de>
Datum 2015-05-26 13:22

HOCHSCHULE LANDSHUT Webmail

- 10541_02_Multi_layer_diaphragm_pump_R409_2ML_DE_EN.pdf (591 KB)

Sehr geehrter Herr Büschel,

vielen Dank für Ihre Anfrage und Ihr Interesse an unseren Produkten.
Wir bieten Ihnen freibleibend und unverbindlich gemäß unseren allgemeinen Verkaufsbedingungen (zu finden unter: www.sera-web.com) wie folgt in Kurzform an:

Pos. 10 1 Stück R409.2-17ML Bestellnummer: 16018150

Mehrlagen-Membranpumpe	: R409.2-17ML
Nennförderstrom (QN)	: 1 x 0 - 17 l/h bei 50Hz
Saughöhe	: 3mWS
Gegendruck (p2max)	: 20bar
Nennhubfrequenz (nN)	: 150 pro Minute bei 50Hz
Pumpenkörper	: 1.4571
Doppelventile	: 1.4571/1.4581
Ventilkugeln	: 1.4401
Ventildichtungen	: FPM
Antriebsmembran	: PTFE/1.4571
Druckplatte	: 1.4571
Anschlüsse	: G3/4
Antrieb	: Drehstrommotor 0,37kW, 380-420V +/-5%, 50Hz IP55, Iso.Kl. F
Förderstromverstellung	: manuelle Hublängen-Verstellung
Membranbruchüberwachung	: optische Anzeige mit Manometer
Anstrich	: sera-Standard-Oberflächenschutz

Medium:
Glukoselösung, 1%-ig, Lösung ohne Feststoffe, Viskosität max. 100mPas
Temperatur: +5 bis max. 70°C, Innenaufstellung, vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, frostgeschützt
kein Ex-Bereich
Sicherheits-/Produktdatenblatt und sera-Betriebsanleitung sind zu beachten!

Preis/Stück: 2.137,00 €/Stk.
Preisstellung: ab Werk exkl. Verpackung
Zahlung: 14 Tage 2%, 30 Tage netto ab Rechnungsdatum
Preise sind 3 Monate gültig ab Erhalt dieser E-Mail
Lieferzeit: 2 Wochen nach kaufm. und technischer Klärung
Dokumentation: sofern nichts anderes angegeben gem. Maschinenrichtlinie 1-fach deutsch in Papier mit Warenlieferung
Alle genannten Preise exkl. gesetzlicher MwSt.

Bitte beachten Sie im Bestellfall unseren Mindestbestellwert von 125 € netto.

Wir hoffen unser Angebot sagt Ihnen zu und stehen Ihnen gern für weitere Fragen zur Verfügung.
Vertrauen Sie auf über 65 Jahre Erfahrung .... nähere Informationen erhalten Sie unter: www.sera-web.com
Wir sind zertifiziert nach DIN ISO 9001:2008, Fachbetriebsqualifikation nach Wasserrecht, Eignungsbestätigung zur Qualitätssicherung gemäß Regel KTA 1401 der VGB PowerTech.

Gern stehen wir Ihnen für Fragen zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

Laura Mohr
Sales Account Manager
Industry & Chemistry
---
sera ProDos GmbH
sera-Straße 1
34376 Immenhausen

HiTEC ZANG
Excellence in Lab Scale Technology

HiTec Zang GmbH | Ebertstraße 30-32 | 52134 Herzogenrath | Germany

Hochschule Landshut
Paul Büschel
Höhenbergstr. 26

82340 Feldafing

Datum : 27.05.2015
Ihre KundenNr. : D105195
Ihre USIDNr :
Ihr Zeichen :
Ihre BelegNr. :
Kaufm. Bearb. : NCR
Techn. Bearb. : NCR
Vorgang Nr. :

Angebot Nr.: 2015-30366

Sehr geehrter Herr Büschel,

herzlichen Dank für Ihr Interesse an unseren Produkten.

Wie angefordert, erhalten Sie ein Angebot über eine LabDos™-vario mit einem 4 Rollen-Peristaltik-Pumpenkopf.

Sie erhalten unseren Rabatt für Forschungseinrichtungen, der in diesem Angebot bereits berücksichtigt ist. Auf HiTec Zang Hardware 10% und auf unsere Software 50%.

***Bitte beachten Sie, dass "alternativ" und "optional" Positionen nicht in der Endsumme enthalten sind.

Pos.	Artikelnr.	Bezeichnung	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamt(EUR)

Telefon:	02407 / 910 - 100	Sparkasse Aachen, Konto Nr.:	17 28 682 (BLZ 390 500 00)
Telefax:	02407 / 910 - 1099	IBAN / IBIC-Code:	DE 03 390 500 00 000 17288 82
Email:	info@hitec-zang.de	SWIFT - Code:	AACS DE 33
Website:	www.hitec-zang.de		
Handelsregister:	Amtsgericht Aachen Nr. HRB 7492		
Geschäftsführer:	Andrea Zang	Commerzbank AG, Konto Nr.:	02 755 555 00(BLZ 390 800 05)
Zollnummer:	DE5113385	IBAN / IBIC-Code:	DE 62 390 800 05 027 55555 00
USt-IdNr.:	DE199647446	SWIFT - Code:	DRES DE FF 390

Angebot 2015-30366 Seite 2 von 6

H/TEC ZANG

Seite 2 von 6

Pos.	Artikelnr.	Bezeichnung	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamt(EUR)
1	00006754	**IP-P-LABDOS-P-VARIO**	1,00	Stck	1.170,00	1.170,00
				abzügl.	10,00 %	-117,00

LabDos™-vario, ohne Pumpenkopf, RS-232-Schnittstelle
Basiseinheit (ohne Pumpenkopf) für IP-P-LABDOS-P-VARIO-3 oder IP-P-LABDOS-P-VARIO-4 oder IP-P-LABDOS-P-MULTI-4-5
Drehzahlregelung: 0.. 300 U/min, einstellbar in 0,01%-Schritten (bitte max. Drehzahl des Pumpenkopfes beachten)
Drehzahlregelung: Lastunabhängig, Istwert über digitalen Aufnehmer
Schnittstellen: RS-232, optional RS-485 (Bus) und analog
Digital-Eingang (TTL-Pegel): Start/Stopp, Drehrichtung
Stromversorgung: 24V DC, 1A, Tischnetzteil
Schutzgrad: IP 20
Abmessungen (T x B x H): 250 x 150 x 95 mm
Gewicht: 1,9 kg
(Maße und Gewicht können bei der Sonderanfertigung abweichen, techn. Änderungen vorbehalten)

*** Optional erweiterbar mit:
- IP-P-LABDOS-AE Analogeingang 0...5 Volt und 4...20mA, Drehzahlsteuerung
- IP-P-LABDOS-RS485 Ansteuerung von bis zu 32 Pumpen

***** Schnittstellenkabel müssen separat bestellt werden! *****
- Bestellbezeichnung Spannung: ZK-P-HI36-OK-UP-Y-01
- Bestellbezeichnung Strom: ZK-P-HI36-OK-IP-Y-01
- Bestellbezeichnung RS-232: ZK-P-HI36-BS-R2-I-01
- Bestellbezeichnung RS-485: ZK-P-HI36-BS-R4-T-01

*** Die angegebenen Werte sind Maximalwerte und können abhängig von Schlauchmaterial, Druck und Viskosität variieren.

Übertrag 1.053,00

Telefon:	02407 / 910 - 100	Sparkasse Aachen, Konto Nr.:	17 28 682 (BLZ 390 500 00)
Telefax:	02407 / 910 - 1099	IBAN / IBIC-Code:	DE 03 390 500 00 000 17288 82
Email:	info@hitec-zang.de	SWIFT - Code:	AACS DE 33
Website:	www.hitec-zang.de		
Handelsregister:	Amtsgericht Aachen Nr. HRB 7492		
Geschäftsführer:	Andree Zang	Commerzbank AG, Konto Nr.:	02 755 555 00(BLZ 390 800 05)
Zollnummer:	DE5113385	IBAN / IBIC-Code:	DE 62 390 800 05 027 55555 00
USt-IdNr.:	DE199647446	SWIFT - Code:	DRES DE FF 390

Angebot 2015-30366 Seite 3 von 6

HITEC ZANG

Seite 3 von 6

Pos.	Artikelnr.	Bezeichnung		Menge	ME	Einzelpreis	Gesamt(EUR)	
2	00006757	**IP-P-LABDOS-P-VARIO-4**		1,00	Stck	219,30	219,30	
					abzügl.	10,00 %	-21,93	
		Peristaltik-Pumpenkopf, 4 Rollen, für LabDos™-vario Pumpenkopf: Vario 4, 4 Rollen Förderrate: 0,1 ml…1 l/min Schlauchdurchmesser innen: 0,5…4,8 mm Wandstärke: 1,6 mm Förderdruck (bei geign. Bed.): 0…2,5 bar Drehzahlbereich: 0,01…250 U/min Viskosität: 0…150 Pa s Schnittstellen: RS-232, optional RS-485 (Modbus oder CAN) und analoge Schnittstelle, 0…5 V, 0/4…20 mA RS-485 Modbus-Protokoll (opt.): Ansteuerung von bis zu 32 Pumpen über eine serielle Schnittstelle Digital-Eingänge (TTL-Pegel): Start/Stop, Drehrichtung Antrieb: Pulsationsarmer SoftDrive™ Präzisions-Antrieb Stromversorgung: 24 V DC, 1 A Steckernetzteil Schutzart: IP20 Abmessungen (B x H x T): 175 x 120 x 250 mm Gewicht: ca. 2 kg *** Optional erweiterbar mit: - IP-P-LABDOS-AE Analogeingang 0...5 Volt und 4...20mA, Drehzahlsteuerung - IP-P-LABDOS-RS485 Ansteuerung von bis zu 32 Pumpen ***** Schnittstellenkabel müssen separat bestellt werden! ***** - Bestellbezeichnung Spannung: ZK-P-HI36-OK-UP-Y-01 - Bestellbezeichnung Strom: ZK-P-HI36-OK-IP-Y-01 - Bestellbezeichnung RS-232: ZK-P-HI36-BS-R2-I-01 - Bestellbezeichnung RS-485: ZK-P-HI36-BS-R4-T-01 *** Die angegebenen Werte sind Maximalwerte und können abhängig von Schlauchmaterial, Druck und Viskosität variieren.						
optional:								
3	00006570	IP-P-HPT-CHEM-16-032-m Pumpenschlauch Chemical (Tygon® chemical), Innendurchmesser 3,1 mm, Wandstärke 1,6 mm Bedingt ketonbeständig, weichmacherfrei. Meterware.	15/22	1	m	14,30	14,30	1
optional:								
4	00006734	IP-P-LABDOS-AE Option Analoge-Schnittstelle, 0…5 V, 0/4…20 mA	15/22	1	Stck	180,00	180,00	1
			abzügl.			10,00 %	-18,00	
optional:								
5	00007938	ZK-P-HI36-BS-R2-I-01 RS-232-Kabel, D-Sub9/D-Sub9, 3 m, zum Anschluss an Lab-/MSR-PNK oder PC 1 x 9-pol.-D-Sub-Buchse geräteseitig auf 1 x 9-pol.-D-Sub-Buchse zum Anschluss an RS-232-Schnittstelle Länge: 3 m	15/22	1	Stck	77,50	77,50	1

Übertrag 1.250,37

Telefon:	02407 / 910 - 100	Sparkasse Aachen, Konto Nr.:	17 28 682 (BLZ 390 500 00)
Telefax:	02407 / 910 - 1099	IBAN / IBIC-Code:	DE 03 390 500 00 000 17288 82
Email:	info@hitec-zang.de	SWIFT - Code:	AACS DE 33
Website:	www.hitec-zang.de		
Handelsregister:	Amtsgericht Aachen Nr. HRB 7492		
Geschäftsführer:	Andrea Zang	Commerzbank AG, Konto Nr.:	02 755 555 00(BLZ 390 800 05)
Zollnummer:	DE5113385	IBAN / IBIC-Code:	DE 62 390 800 05 027 55555 00
USt-IdNr.:	DE199647446	SWIFT - Code:	DRES DE FF 390

Angebot 2015-30366 Seite 4 von 6

HITEC ZANG

Seite 4 von 6

Pos.	Artikelnr.	Bezeichnung	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamt(EUR)
6	00006131	DV-VERPAU2 Verpackungs- und Versandpauschale: Paketversand	1,00	Stck	15,30	15,30
Endsumme (netto)						1.265,67

Telefon:	02407 / 910 - 100	Sparkasse Aachen, Konto Nr.:	17 28 682 (BLZ 390 500 00)
Telefax:	02407 / 910 - 1099	IBAN / IBIC-Code:	DE 03 390 500 00 000 17286 82
Email:	info@hitec-zang.de	SWIFT - Code:	AACS DE 33
Website:	www.hitec-zang.de		
Handelsregister:	Amtsgericht Aachen Nr. HRB 7492		
Geschäftsführer:	Andreas Zang	Commerzbank AG, Konto Nr.:	02 755 555 00(BLZ 390 800 05)
Zollnummer:	DE5113385	IBAN / IBIC-Code:	DE 62 390 800 05 027 55555 00
USt-IdNr.:	DE199647446	SWIFT - Code:	DRES DE FF 390