



Diplomarbeit

Kompaktierung von Biomasse

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
der Studienrichtung Verfahrenstechnik an der
Technischen Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Jürgen Karl
Dipl.-Ing. Bernhard Gattermig

Autor:

Markus Josef Plank



Graz, am 28. September 2010

Deutsche Fassung:

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008 - Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Titel: Kompaktierung von Biomasse

Autor: Markus Josef Plank

1. Stichwort: Kompaktierung von Biomasse
2. Stichwort: Allotherme Wirbelschichtvergasung
3. Stichwort: druckdichte Förderung

Auf Grund der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Energieträger werden Alternativen technisch wie auch wirtschaftlich immer interessanter. Diese müssen einerseits den Rückgang fossiler Brennstoffe ausgleichen und andererseits den steigenden globalen Energiebedarf abdecken. Studien belegen, dass durch Biomasse ein nachhaltiger Energiehaushalt hergestellt werden könnte und sich dadurch außerdem die atmosphärische Umweltbelastung durch Treibhausgase signifikant reduzieren würde. Die Firma Agnion¹ hat aus diesen Gründen einen Wirbelschichtvergaser entworfen, um aus Biomasse – Wärme und ein Erdgassubstitut zu erzeugen. Die Aufbringung des Brennstoffes bietet Optimierungs- bzw. Innovationspotential, weshalb aus technischem und wirtschaftlichem Interesse eine neue Variante zur Beschickung des Vergasers entwickelt werden soll.

In dieser Arbeit wird ein Versuchsstand entwickelt, um Biomasse zu komprimieren. Es soll untersucht werden, ob mit Hilfe kompakter Biomasse ein gasdichter Abschluss erzeugt werden kann. Dieser Gasabschluss soll für die Beschickung des Wirbelschichtvergasers mit Hackschnitzel genutzt werden. Weitere Versuche sollen zeigen, ob eine Biomasseförderung möglich ist. Als Biomasse in den Versuchen dienen handelsübliche Hackschnitzel mit unterschiedlichen Korngrößen und Feuchtegehalt. Als Versuchseinrichtung wird eine hydraulische Stempelpresse mit einer kreisförmigen Arbeitsquerschnittsfläche zur Kompaktierung verwendet. Die Biomasse wird durch eine Matrize gepresst und erreicht dadurch die hohe Kompaktheit.

Es wurden Vorversuche durchgeführt, um einzelne Parameter wie Feuchte der Biomasse sowie Durchmesser und Länge der Matrize für den Versuchsaufbau zu optimieren.

Mit den ermittelten Daten der Vorversuche, wurde der Prototyp geplant, aufgebaut und getestet. Der Prototyp soll in der Lage sein, einen 500 kW Wirbelschichtvergaser mit Biomasse, ohne großen Energieaufwand und möglichst wartungsfrei versorgen zu können.

¹ www.agnion.de, 2010

Abstract

Title: Compaction of biomass

Author: Markus Plank

1. keyword: Compaction of biomass
2. keyword: fluidised bed gasification
3. keyword: pressure - tight transportation

Because the reserves of fossil fuels are getting less and less, people it is searched for alternatives, which can compensate the decline on the one hand and also cover the rising energy demand on the other hand.

Studies show that biomass could produce a sustainable energy balance and the environment would not be further polluted. For this reason, the company Agnion¹ has designed a fluidized bed gasifier to produce heat and a natural gas substitute out of biomass. The application of the fuel isn't fully explored yet, so a variant will be designed.

In this work a test station is developed to compress biomass. It is to be investigated, whether compressed biomass can be used for a gas tight closing off. This is used to charge the fluidized bed gasifier with wood chips. More tests will show whether a biomass conveying is possible. For the tests, commercially available wood chips with different grain sizes and moisture content are used as biomass. A hydraulic stamp with a circular cross sectional area will be used for compacting. The biomass will be pressed through a matrix and thereby the high compactness can be achieved.

Preliminary tests were necessary to find out the optimal humidity of the biomass and the optimal diameter and length of the matrix. Those findings are important to optimize the test preparation.

Secondary, the prototype was designed, built and tested, based on them. The prototype should be able, to supply a 500 kW fluidized bed gasifier with biomass. The compaction should have a low energy input and work maintenance-free as possible.

¹ www.agnion.de, 2010

Vorwort

Als ich vom Thema „Kompaktierung von Biomasse“ erfuhr, war mein Interesse bereits geweckt. Ein neues System von Anfang an mit zu betreuen und zu entwickeln ist eine sehr große Herausforderung, doch gerade diese machte das Thema für mich zu einem besonders interessanten.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing Bernhard Gatternig, der mich unterstützte und mir mit Rat und Tat zur Seite stand. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Jürgen Karl, der als Institutsvorstand mit Interesse die Arbeit verfolgte und mir wertvolle Tipps für das Gelingen meiner Diplomarbeit gab, bedanken.

Dipl.-Ing Dr.techn. Andreas Schweiger und DDipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Hochleitner haben mir immer wieder mit Ratschlägen weitergeholfen, auch dafür bedanke ich mich.

Ein Dank gilt auch den Mitarbeitern der Institutswerkstatt, die die Aufgaben mit großer Sorgfalt erfüllten.

Für die erfolgreiche Lernzeit während meines Studiums möchte ich mich bei meinen Wohnungskollegen und Studienkollegen recht herzlich bedanken.

Der wichtigste Dank gebührt meinen Eltern. Ohne ihre Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung, wäre mir der Abschluss meines Studiums sicher verwehrt geblieben.

Danke

Graz, am 28. September 2010

Markus Josef Plank

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1.	Energiebedarf der Weltbevölkerung	1
1.2.	Treibhauseffekt – CO ₂ - Problematik	2
1.3.	Biomasse	3
1.4.	Substitute Natural Gas – SNG.....	4
2	Stand der Technik	5
2.1.	Vergasung von Festbrennstoffen.....	5
2.1.1.	Stand der Technik	6
2.1.2.	Neuer Ansatz der Firma Agnion	6
2.2.	Heatpipe-Reformer.....	8
2.2.1.	Wärmeleitrohr – Heatpipe	9
2.2.2.	Kompaktierung von Biomasse.....	10
3	Vorversuche	11
3.1.	Aufgabenstellung	11
3.2.	Kompaktiermechanismen	12
3.2.1.	Kompaktierverfahren	12
3.2.2.	Betrachtung der Bindemechanismen.....	13
3.2.3.	Herstellung Biomassebriketts.....	14
3.2.4.	Verfahrensprinzipien Pressagglomeration.....	14
3.3.	Aufbau Vorversuchsstand	16
3.3.1.	Hydraulik.....	17
3.3.2.	Matrize	28
3.3.3.	Schneidvorrichtung	29
3.3.4.	Messtechnik	29
3.4.	Ergebnisse Vorversuche	31
3.4.1.	Versuchsprogramm zur Ermittlung der Einflussparameter.....	31
3.4.2.	Aufgabegut - Biomasse Hackgut	32
3.4.3.	Pressversuche mit unterschiedlichem Holzhackgut.....	32
3.4.4.	Ergebnisse	33
3.5.	Fazit Vorversuche	40

4	Prototyp.....	41
4.1.	Randbedingungen.....	41
4.2.	Konzept Prototyp.....	41
4.3.	Der Prototyp.....	43
4.3.1.	Bestimmung des Hackgutstromes.....	43
4.3.2.	Bestimmung des Hackgutstromes der Vorversuchsanlage.....	46
4.3.3.	Bestimmung des Biomassestroms mit optimierten Bedingungen.....	47
4.3.4.	Hydraulikanlage – Prototyp.....	49
4.3.5.	Hydraulik – Funktionsplan.....	51
4.3.6.	Aufbau Prototyp.....	52
4.3.7.	Regel – und Steuereinheit.....	53
4.4.	Versuchsauswertung - Kompaktierung.....	54
4.4.1.	Kompaktierversuch 1.....	54
4.4.2.	Kompaktierversuch 2.....	56
4.4.3.	Kompaktierversuch 3.....	59
4.4.4.	Kompaktierversuch 4.....	61
4.4.5.	Kompaktierversuch 5.....	62
4.4.6.	Kompaktierversuch 6.....	63
4.4.7.	Kompaktierversuch 7.....	64
4.4.8.	Kompaktierversuch 8.....	65
4.4.9.	Kompaktierversuch 9.....	66
4.4.10.	Kompaktierversuch 10.....	67
4.4.11.	Kompaktierversuch 11.....	67
4.4.12.	Kompaktierversuch 12.....	68
4.4.13.	Kompaktierversuch 13.....	68
4.4.14.	Kompaktierversuch 14.....	69
4.4.15.	Kompaktierversuch 15.....	70
4.4.16.	Fazit Kompaktierversuche.....	70
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	72
6	Literaturverzeichnis.....	74

Abbildungen:

Abbildung 1-1 Prognose Weltenergiebedarf	2
Abbildung 1-2 SNG-Produktion	4
Abbildung 2-1 dezentrale Wirbelschichtvergasung	7
Abbildung 2-2 Wirkungsgrad – Übersicht	7
Abbildung 2-3 Heatpipe – Reformer	8
Abbildung 2-4 Funktionsprinzip Heatpipe	10
Abbildung 2-5 Biomassezufuhr Heatpipe-Reformer	10
Abbildung 3-1 Agglomerationsverfahren.....	12
Abbildung 3-2 Agglomeration-Bindemechanismen	13
Abbildung 3-3 Walzenpressen.....	14
Abbildung 3-4 offener Formkanal	15
Abbildung 3-5 geschlossene Form	15
Abbildung 3-6 Vorversuchsaufbau.....	16
Abbildung 3-7 charakteristischen Größen ein Hydrauliksystems	17
Abbildung 3-8 Zylinderabmessung Vorversuchsstand	18
Abbildung 3-9 Kräftebilanz am reibungsfreien Arbeitszylinder	19
Abbildung 3-10 Arbeitszylinder - Ausfahren.....	20
Abbildung 3-11 Arbeitszylinder - Einfahren.....	20
Abbildung 3-12 Strömung durch eine Leitung.....	21
Abbildung 3-13 Auflistung der Hydraulikpumpenarten	24
Abbildung 3-14 Schema der Hubverdrängermaschine.....	25
Abbildung 3-15 Schema einer Außenzahnpumpe	25
Abbildung 3-16 Matrize.....	28
Abbildung 3-17 Schneidvorrichtung	29
Abbildung 3-18 Kraftaufnehmer.....	30
Abbildung 3-19 Messumformer.....	30
Abbildung 3-20 Druckmessumformer	30
Abbildung 3-21 Netz- und Stromversorgungsanalysator - Fluke 434	30
Abbildung 3-22 Einflussgrößen auf den Kompaktierprozess.....	31
Abbildung 3-23 Wassergehaltbestimmung	32
Abbildung 3-24 Verwendete Holzhackgut – Wassergehälter	33
Abbildung 3-25 Brikett $w = 8\%$	33
Abbildung 3-26 Brikett $w = 15\%$	33

Abbildung 3-27 Brikett $w = 18\%$	33
Abbildung 3-28 Pressversuche mit Hackgut $w = 56\%$	34
Abbildung 3-29 <i>Förderungsversuchsanlage</i>	34
Abbildung 3-30 Presskraft-Weg – Verhalten 1 ($w = 18\%$ und $t = 72$ mm)	35
Abbildung 3-31 Presskraft-Weg – Verhalten 2 ($w=15\%$ und $t=72$ mm)	36
Abbildung 3-32 Kraft - Dichte - Verhalten ($w=14,71\%$ und $t=72$ mm).....	37
Abbildung 3-33 Versuchsaufbau Druckdichtheit	38
Abbildung 3-34 Druckabfall	38
Abbildung 3-35 Leistung Vorversuchsanlage.....	39
Abbildung 4-1 Konzept Prototyp	42
Abbildung 4-2 schematischer Aufbau des Prototyps.....	43
Abbildung 4-3 Hydraulikzylinder Prototyp	49
Abbildung 4-4 Hydraulikaggregat	51
Abbildung 4-5 Hydraulikfunktionsschaltplan	52
Abbildung 4-6 Zeichnung Prototyp	52
Abbildung 4-7 Schaltschrank.....	53
Abbildung 4-8 Matrize Versuch 1.....	54
Abbildung 4-9 Versuchsaufbau 1.....	54
Abbildung 4-10 Anlagerung Hackgut	54
Abbildung 4-11 verdrückte Schneidvorrichtung	55
Abbildung 4-12 zerstörte Gewindeverbindung	55
Abbildung 4-13 verschleißte Schneidvorrichtung.....	55
Abbildung 4-14 Hackgut Kanalbildung.....	55
Abbildung 4-15 neue Schneidvorrichtungsbefestigung.....	55
Abbildung 4-16 Abstreifring	56
Abbildung 4-17 Matrize mit Einlaufkonus.....	56
Abbildung 4-18 Matrize mit Schneidring	56
Abbildung 4-19 Matrize mit Schneidring	57
Abbildung 4-20 zerstörte Presshülse.....	57
Abbildung 4-21 Matrize 1 mit Schneidring	58
Abbildung 4-22 Matrize 2 mit Einlaufkonus.....	59
Abbildung 4-23 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktiersuch 3	59
Abbildung 4-24 Briketts – Kompaktiersuch 3	60
Abbildung 4-25 Matrize nach Kompaktiersuch 3.....	60
Abbildung 4-26 Schneidvorrichtung nach Kompaktiersuch 3	60
Abbildung 4-27 verringerte Eintauchtiefe.....	60
Abbildung 4-28 Aufbau der Abweichungsüberprüfung.....	61

Abbildung 4-29 Auswertung der Abweichungsmessung	61
Abbildung 4-31 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktiersuch 5	62
Abbildung 4-30 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktiersuch 4	62
Abbildung 4-33 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktiersuch 6	63
Abbildung 4-32 abgenutzte Schneidvorrichtung	63
Abbildung 4-36 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktiersuch 7	64
Abbildung 4-34 Matrize nach dem Kompaktiersuch 6 ohne Klemmflansch	64
Abbildung 4-35 Matrize nach dem Kompaktiersuch 6 mit Klemmflansch	64
Abbildung 4-37 Braunkohle – Powersplit LIN 1361	65
Abbildung 4-38 kompakt gefüllte Matrize	65
Abbildung 4-39 Kompaktierprodukt Kohle.....	65
Abbildung 4-40 Braunkohle Kompaktiersuch	65
Abbildung 4-41 Kompaktiersuch 8	66
Abbildung 4-42 kompaktiert Braunkohle	66
Abbildung 4-43 Brikettherstellung mit feuchter Braunkohle.....	66
Abbildung 4-44 Briketts – Kompaktiersuch 9	66
Abbildung 4-45 Briketts – Kompaktiersuch 10	67
Abbildung 4-46 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktiersuch 11	67
Abbildung 4-47 Kompaktiersuch 11	67
Abbildung 4-48 Kompaktierprodukt – Kompaktiersuch 11	67
Abbildung 4-50 Matrize 2 – gekürzt	68
Abbildung 4-49 Briketts - Kompaktiersuch 12	68
Abbildung 4-51 Hackgut nach Kompaktiersuch 12	69
Abbildung 4-52 vereinzelt Brikettherstellung.....	69
Abbildung 4-53 Kompaktiersuch 15	70

Tabellen:

Tabelle 3-1 Beschreibung Teile Vorversuchsanlage.....	16
Tabelle 3-2 charakteristischen Größen ein Hydrauliksystems.....	17
Tabelle 3-3 Zylinderabmessungen Vorversuchsstand	18
Tabelle 3-4 Berechnungsgleichungen - Hubkraft doppelwirkender Hydraulikzylinder	20
Tabelle 3-5 Ausfahrkraft des Zylinders	21
Tabelle 3-6 Weg / Zeit Messung - Vorversuchszylinder	23
Tabelle 3-7 Teile einer Außenzahnradpumpe.....	26
Tabelle 3-8 Volumenstrom Hydraulikpumpe	27
Tabelle 3-9 Antriebsleitung Pumpe.....	27
Tabelle 3-10 Einflussgrößen auf den Kompaktierprozess.....	31
Tabelle 3-11 Beschreibung <i>Förderungsversuchsanlage</i>	35
Tabelle 3-12 Messergebnisse Kraft - Dichte - Verhalten ($w = 15\%$ und $t = 72\text{ mm}$)	37
Tabelle 3-13 Hydraulikdaten - Vorversuche.....	40
Tabelle 4-1 Heizwert	44
Tabelle 4-2 Werte für die Ermittlung des Biomassevolumenstroms	45
Tabelle 4-3 Werte für die Ermittlung des Massenstroms.....	45
Tabelle 4-4 Angaben zur Massenstromermittlung Vorversuchsanlage	46
Tabelle 4-5 Zeit für einen Pressvorgang Vorversuchstand	46
Tabelle 4-6 Biomassevolumenstrom in Abhängigkeit der Presstiefe – Vorversuchstand	47
Tabelle 4-7 Angaben zur Biomassestromermittlung – Prototyp	48
Tabelle 4-8 Zeit für einen Pressvorgang – Prototyp.....	48
Tabelle 4-9 Biomassevolumenstrom in Abhängigkeit von der Presstiefe – Prototyp.....	48
Tabelle 4-10 Vergleich Hydraulikzylinder Vorversuchsstand – Prototyp	50
Tabelle 4-11 Vergleich Hydraulikaggregat Vorversuchsstand – Prototyp.....	51

Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes und Definitionen:

Lateinische Buchstaben

p	Druck [bar, Pa, mbar]
F_S	Lastkraft [kN, N]
F_R	Reibkraft [kN, N]
F_B	Trägheitskraft [kN, N]
F_Z	Zylinderkraft [kN, N]
A	Fläche [m ²]
F_{ZA}	Zylinderkraft beim Ausfahren [kN, N]
F_{ZR}	Zylinderkraft beim Rückfahren [kN, N]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]
m	Masse [kg]
t	Zeit [s]
ρ	Dichte [kg/m ³]
V	Volumen [m ³]
v	Fließgeschwindigkeit [m/s]
\dot{V} und Q	Volumenstrom [m ³ /s, l/s]
s	Weg [m]
n	Drehzahl [s ⁻¹]
V_v	Verdrängungsvolumen [m ³]
\dot{V}_p	Volumenstrom der Pumpe [l/min]
P	Antriebsleistung [kW]
w	Wassergehalt [%]
u	Holzfeuchte [%]
t	Presstiefe [mm]
H_u	Heizwert [MJ/kgFS]
H_o	Brennwert [MJ/kgFS]
M_{ar}	Wassergehalt des Brennstoffes [Gew% d. FS]
h	Wasserstoffgehalt des Brennstoffes [Gew% d. TS]
P_K	Reformerleistung [kW]
P_M	Drehstrommotorleistung [kW]
d_B	Brikettdurchmesser

Griechische Buchstaben

η_{Pvol}	volumetrischer Wirkungsgrad [-]
η_{Pm}	mechanischer Wirkungsgrad der Pumpe [-]

Chemische Formeln

H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
CO ₂	Kohlendioxid
CO	Kohlenmonoxid
CH _n O _m	Biomasse allgemein
CH ₄	Methan
C	Kohlenstoff
H	Wasserstoff

Abkürzungen

SNG	substitute natural gas (Erdgassubstitut)
GuD	Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung

Tiefgestellte Indizes

A	ausfahren
E	einfahren
max	maximal
th	theoretisch
mech	mechanisch

Hochgestellte Indizes

®	Warenzeichen, Firmenname
---	--------------------------

Einleitung

Nachwachsende Rohstoffe rücken immer mehr in den Vordergrund bei der Diskussion über zukünftige Energieträger, weil die Abnahme der herkömmlichen fossilen Ressourcen stark fortschreitet. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Entscheidung für einen bestimmten Energieträger ist deren Einfluss auf die Umwelt. Nachwachsende Rohstoffe haben den Vorteil, dass sie nur die Menge an Kohlendioxid bei ihrer Nutzung abgeben, die sie während ihres Wachstums der Umgebung entzogen haben. Um den Treibhauseffekt nicht weiter zu verstärken, wäre mit der Wahl von nachwachsenden Rohstoffen ein wichtiger Schritt in Richtung einer nachhaltigen Energieversorgung getan. Es gibt neben den nachwachsenden Rohstoffen eine Vielzahl von regenerativen Energieträgern – wie Solarenergie, Windenergie oder Wasserkraft – welche ebenfalls sehr umweltschonend realisiert werden können. Sie bedürfen jedoch bestimmter Voraussetzungen, die nicht überall erfüllt werden können.

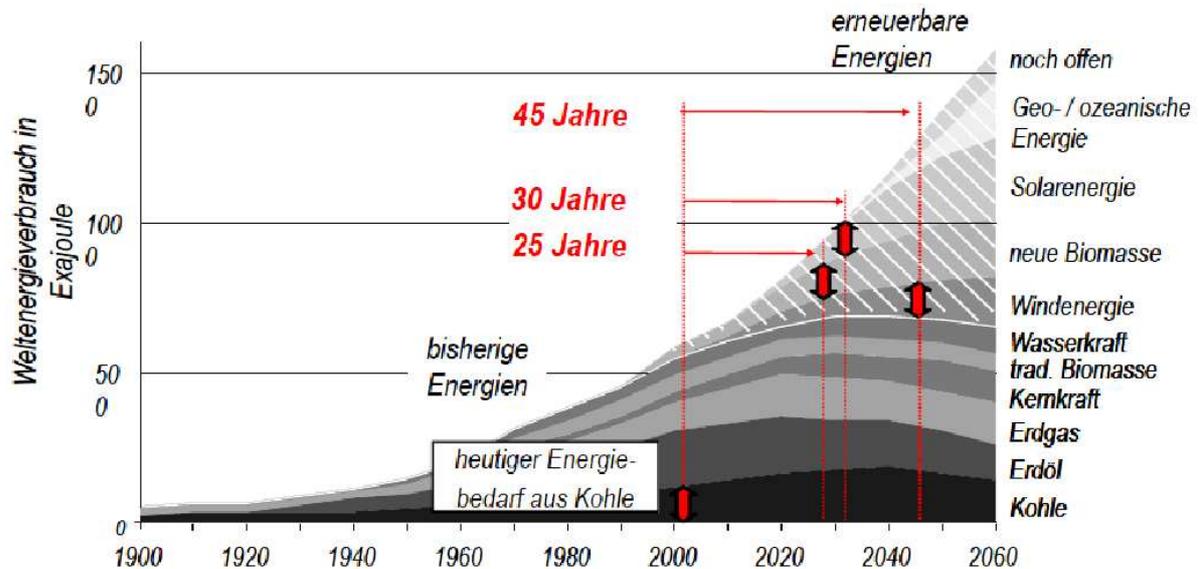
Pflanzliche Biomasse kann jedoch fast überall eingesetzt werden und stellt daher eine interessante Alternative bei der Energieaufbringung dar. Holz oder halmgutartige Brennstoffe finden heutzutage ihren Nutzen in Festbrennstoffreaktoren. Dieses Gebiet wurde in den letzten Jahrzehnten sehr gut erforscht und weiterentwickelt. Geeignete Aufbereitungsverfahren für holzartige Energieträger gehören zum Stand der Technik, die Brennstofflogistik ist in den meisten Fällen geklärt. Die Kesselanlagen sind für die entsprechenden Anforderungen konzipiert und kommerziell bereits in vielen Variationen erhältlich.

1.1. Energiebedarf der Weltbevölkerung

Der weltweite Energieverbrauch wird laut Prognosen - wie in Abbildung 1-1 dargestellt - rasch weiter ansteigen. Der in den letzten Jahrzehnten weltweit angestiegene Lebensstandard spiegelt sich im Energieverbrauch wieder und wird diesen wohl auch noch weiter anheben. Laut einigen Studien muss damit gerechnet werden, dass sich der Weltenergiebedarf bis zum Jahr 2060 sogar verdoppelt. Diese Studien zeigen auch, dass der Zuwachs mit regenerativen Energien wie Wind, Sonne und Biomasse gedeckt werden könnte.

Mit Hilfe der erneuerbaren Energie kann nicht nur der Energiebedarf gedeckt werden, es wird auch ein wichtiger Beitrag zum Umweltschutz geleistet.

Einen sehr wichtigen Beitrag zur positiven Umweltpolitik wird Biomasse leisten. Sie kann fast überall eingesetzt werden und speziell bei einem regionalen Einsatz könnte die politische und ökonomische Abhängigkeit gesenkt werden. Anderen Energielieferanten – z.B. Erdöl, Erdgas – könnten mit Hilfe von Biomasse geschont werden, aber der wichtigste Grund für den vermehrten Einsatz von Biomasse in naher Zukunft, ist die Schonung unserer Umwelt.



vgl. (Karl J. , 2006, S. 5)

Abbildung 1-1 Prognose Weltenergiebedarf

1.2. Treibhauseffekt – CO₂ - Problematik

Die Veränderung des Klimas in den letzten Jahren ist nicht mehr zu übersehen. Der anthropogene Treibhauseffekt, der bereits Anfang des 20. Jahrhunderts erkannt wurde, ist ein möglicher Verursacher für die Klimaveränderung. Der vermehrte Ausstoß an Schadstoffen führt dazu, dass die eingestrahelte Energie nicht mehr ungehindert in das Weltall abgeführt werden kann. Einen sehr großen Einfluss auf die Temperaturerhöhung hat der CO₂ - Gehalt in der Atmosphäre. Studien belegen, dass der Verlauf der Oberflächentemperatur mit dem CO₂ - Gehalt korreliert. Zu erwähnen ist, dass die CO₂ - Konzentration in den letzten 200 Jahren um 35 % [vgl. (Karl J. , Vorlesungsskriptum Wärmetechnik 1, 2009, S. 34 - Teil1)] angestiegen ist. Diese Veränderung des Klimas kann fatale Folgen für die Menschheit haben. Das Eisschild und die Meeresströmungen könnten sich verändern, die Klimazonen sich verschieben und eine Zunahme der Wetter Extreme wird ebenfalls zu erwarten sein. Daher ist es sehr wichtig Emissionen einzusparen, um den Klimawandel stoppen zu können.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Minderung der Emissionen. Bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen wie z.B. Kohle, gelangen sehr viele Schadstoffe in die Umwelt. Ersetzt man die fossilen Brennstoffe durch CO₂-neutrale wie z.B. Biomasse, könnte eine nachhaltige Umweltpolitik betrieben werden.

Eine Verringerung des Emissionsausstoßes könnte auch durch die Verwendung CO₂-armer Brennstoffe wie z.B. Erdgas oder durch Effizienzsteigerung der Anlagen erzielt werden. In letzter Zeit wurden auch immer mehr Projekte in Angriff genommen bei denen CO₂ gespeichert und so dessen Entweichen in die Atmosphäre verhindert wird.

1.3. Biomasse

Wie bereits in Kapitel 1.1 und 1.2 erwähnt, kann Biomasse einen Teil des steigenden Weltenergiebedarfs decken und eine Lösung sein um den CO₂ Ausstoß der Energieproduktion zu reduzieren. Als Biomasse wird die gesamte organische Substanz bezeichnet. Sie findet ihre Verwendung in Form von Nahrung, Futtermittel und als nachwachsender Energieträger. Durch die Photosynthese wird das Sonnenlicht aufgenommen und in Form von „Biomasse“ gespeichert. Dazu werden Kohlendioxid, Wasser und andere Mineralstoffe aufgenommen und als Kohlenhydrate in der Struktur der Pflanze gespeichert. Die Anlagen bzw. die Technik zur Biomassenutzung haben sich in den letzten Jahren stark verbessert. Der geschlossene CO₂-Kreislauf und eine emissionsarme Verbrennung durch den Einsatz moderner Feuerungs- und Regelungstechnik wirken sich positiv auf die Umweltverträglichkeit dieser Anlagen aus.

Trotz der aufgezeigten Vorteile nimmt Biomasse als Energieträger noch einen eher geringen Anteil am europäischen Energiemarkt ein. Grund hierfür ist der relativ günstige Preis für fossile Brennstoffe und die im Vergleich zu flüssigen und gasförmigen Brennstoffen wesentlich teurere Anlagentechnik zur thermischen Biomassenutzung. Soll aus Biomasse produzierte Wärme bzw. Strom dennoch konkurrenzfähig bleiben, so müssen entweder die Investitionskosten einer Biomasseanlage oder der Brennstoffpreis von Biomasse gesenkt werden. Auch eine entsprechende Förderung dieser Anlagen, bzw. Energie- und CO₂-Steuern für fossile Brennstoffe könnten die Nutzung von Biomasse weiter ankurbeln.

Biomasse findet dennoch bereits in sehr vielen Sparten Anwendung. In der papierverarbeitenden Industrie, in dezentralen Heizwerken und Heizkraftwerken, in Kleinfeuerungsanlagen und für die Erzeugung von Strom und Gas, um hier nur einige zu nennen. Im folgenden Kapitel 1.4 wird die Gaserzeugung aus Biomasse näher erklärt. Anschließend wird im Kapitel 2 ein Wirbelschichtvergaser vorgestellt, der im kleinen Leitungsbereich für die Gaserzeugung eingesetzt wird.

1.4. Substitute Natural Gas – SNG

Erdgas spielt in der Strom- und Wärmeversorgung eine wichtige Rolle. Durch den Anstieg des Weltenergiebedarfs wird auch der Verbrauch an Erdgas weiter ansteigen und mittelfristig zu einer Verknappung führen, welche wiederum einen Preisanstieg mit sich bringt.

Weiters gibt es auch politische und geographische Probleme in Bezug auf die Struktur der Produzenten und Abnehmer. All diesen Punkten könnte durch ein Erdgas-Substitut aus Biomasse entgegengewirkt werden. Die thermische Vergasung von Biomasse kann diesen Rohstoff dezentral in Substitute Natural Gas, kurz SNG, umwandeln. Um SNG zu erzeugen, müssen einige Verfahrensschritte realisiert werden, diese sind in Abbildung 1-2 ersichtlich. Biomasse wird im Reaktor vergast, danach wird das entstandene Gas einer Reinigung unterzogen und anschließend im Methanierungsschritt zu Erdgas verwandelt. Das entstandene Erdgas ist sehr reich an Kohlendioxid, dieses muss im letzten Arbeitsschritt entfernt werden. Das aufbereitete Gas bildet nun den Ausgangspunkt für eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten.

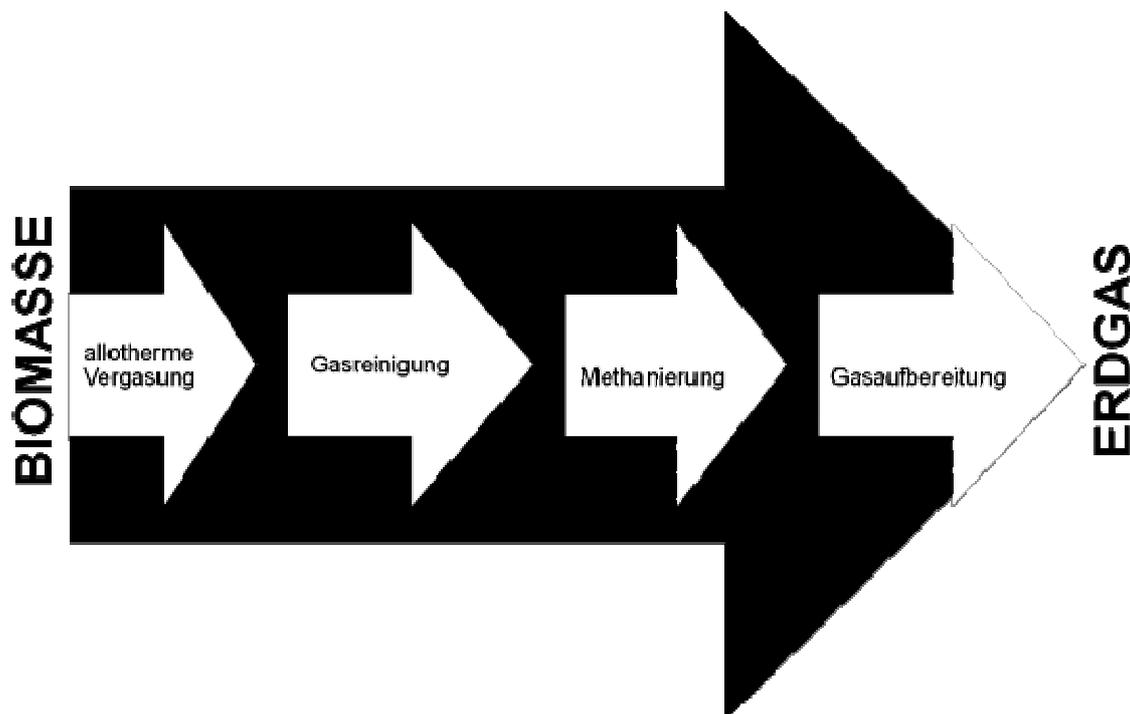


Abbildung 1-2 SNG-Produktion

Eine Variante um SNG zu erzeugen, ist der Heatpipe-Reformer der Firma Agnion. In den nächsten Kapiteln wird dieser vorgestellt und darauf eingegangen, warum Biomasse kompaktiert werden muss und welche Vorteile daraus entstehen.

Stand der Technik

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine optimierte Brennstoffzufuhr für einen Reaktor zur SNG Erzeugung entwickelt. Im Folgenden soll die Vergasung von Festbrennstoffen erklärt und der Reaktor für die Vergasung näher beschrieben werden.

2.1. Vergasung von Festbrennstoffen

Es gibt drei verschiedene Methoden aus Festbrennstoffen Flüssig-, oder Gasbrennstoffe zu erzeugen – die Vergärung, die Pyrolyse und die thermische Vergasung.

Am weitesten verbreitet ist der Prozess der Vergärung in Biogasanlagen. Die landwirtschaftlichen Reststoffe werden durch Mikroorganismen in ein methanreiches Gas umgewandelt. Um die Gasqualität zu steigern, können auch Fette oder Küchenabfälle zugemischt werden. Kommen holzartige Brennstoffe zum Einsatz, so können diese nicht vergärt werden sondern müssen in thermischen Prozessen vergast werden.

Mit Hilfe der Pyrolyse kann flüssiger, lagerfähiger Brennstoff erzeugt werden. Die Pyrolyseöle entstehen bei der Zersetzung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe bei Temperaturen um 500°C.

Die thermische Vergasung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe beginnt bei Temperaturen oberhalb 700°C. Es wird dabei die autotherme und allotherme Vergasung unterschieden. Dem Vergaser muss in beiden Fällen Wärme auf einem hohen Temperaturniveau zugeführt werden. Bei autothermen Vergasern wird die Reaktionswärme durch eine partielle Oxidation der Kohlenwasserstoffe mit Luft im Inneren des Vergasers bereitgestellt. Der wesentliche Nachteil dieses Konzeptes resultiert daraus, dass bei der partiellen Oxidation auch Rauchgas entsteht, das aufgrund des hohen CO₂- und H₂O-Anteils, und eines hohen Stickstoffanteils das Produktgas verdünnt. Der Heizwert des entstandenen Gases reduziert sich entsprechend und das Gas kann nur in Arbeitsmaschinen verwertet werden, die auch bei niedrigen Heizwerten noch arbeiten. Bei der allothermen Vergasung wird die Reaktionswärme ganz oder teilweise aus einer externen Wärmequelle gedeckt. Dadurch wird die Verdünnung des Produktgases vermieden und es entstehen Brenngase mit wesentlichen höheren Heizwerten.

Um Festbrennstoffe zu vergasen stehen sehr unterschiedliche Verfahren zur Auswahl.

Im unteren Leistungsbereich kommen Festbettvergaser zum Einsatz und bei Großanlagen findet man Flugstromvergaser und Wirbelschichtvergaser. Die Vergasertypen werden in den folgenden Kapiteln noch näher erklärt.

vgl.(Karl J. , 2006, S. 176-188)

2.1.1. Stand der Technik

Der aktuellste Stand der Technik, um aus Biomasse in Kleinanlagen effizient Biogas zu erzeugen, ist der Einsatz von Festbettvergäsern. Die Festbettvergaser werden in drei Bauformen eingeteilt: den Gleichstrom-, den Gegenstrom und den Querstromvergaser.

Die einfachste Bauform ist der Gegenstromvergaser. Die Vergasungsluft wird unter dem Festbett zugegeben und strömt zuerst durch die Verbrennungszone. Das entstehende heiße Rauchgas strömt anschließend durch die Reduktionszone und die Trocknungszone, in der das Holz erwärmt wird. Mit zunehmendem Sauerstoffmangel reduziert sich die Temperatur im Festbett, die Biomasse wird vom Produktgas zunächst vergast, dann pyrolysiert und getrocknet. Durch die Strömungsführung durchströmt das Produktgas unmittelbar vor dem Austritt aus dem Reaktor die Pyrolyse- und Trocknungszone und reichert sich dabei mit Schwelgasen und Teeren an. Gleichstrom- und Querstromvergaser liefern dagegen Produktgase mit niedrigen Teergehalten. Die Luft passiert zunächst gemeinsam mit dem Brennstoff eine Trocknungszone, wird deshalb nur langsam erwärmt und durchströmt anschließend die Pyrolysezone und dann erst die Oxidationszone.

Die Festbettvergaser können nur autotherm betrieben werden und liefern daher nur Schwachgas, welches anschließend in Mikroturbinen oder Gasmotoren in Strom umgewandelt wird.

vgl.(Karl J. , 2006, S. 189-192)

2.1.2. Neuer Ansatz der Firma Agnion

Die Firma Agnion hat einen neuen Ansatz gewählt, um aus Biomasse Gas zu erzeugen. Es kommt ein allothermer Wirbelschichtvergaser – der Heatpipe-Reformer – zum Einsatz.

Der Wirbelschichtvergaser ist besonders interessant, weil nur damit eine allotherme Vergasung erzielt werden kann. Hauptproblem bei der Realisierung dieser Vergasung ist der Wärmeeintrag in den Vergaser. Um die gewünschten hohen Heizwerte zu realisieren, muss die für die endothermen Vergasungsreaktionen notwendige Wärme also aus externen Wärmequellen in den Vergasungsreaktor eingebracht werden. Wichtig dabei ist, dass das entstehende Brenngas nicht mit Rauchgas verdünnt wird.

Bei Festbettvergäsern ist durch die schlechten Wärmeleiteigenschaften des Festbettes eine Übertragung der erforderlichen hohen Wärmeströme in den Reaktor technisch nicht möglich.

Mit Wirbelschichten kann die erforderliche Wärme dagegen durch die ideale Vermischung im Wirbelbett vergleichsweise gut in den Reaktor eingebracht und optimal verteilt werden. Dadurch erzeugt man ein Synthesegas, das einen höheren Heizwert aufweist als die des Festbettvergasers. Die allotherme Wirbelschichtvergasung könnte dezentral für die



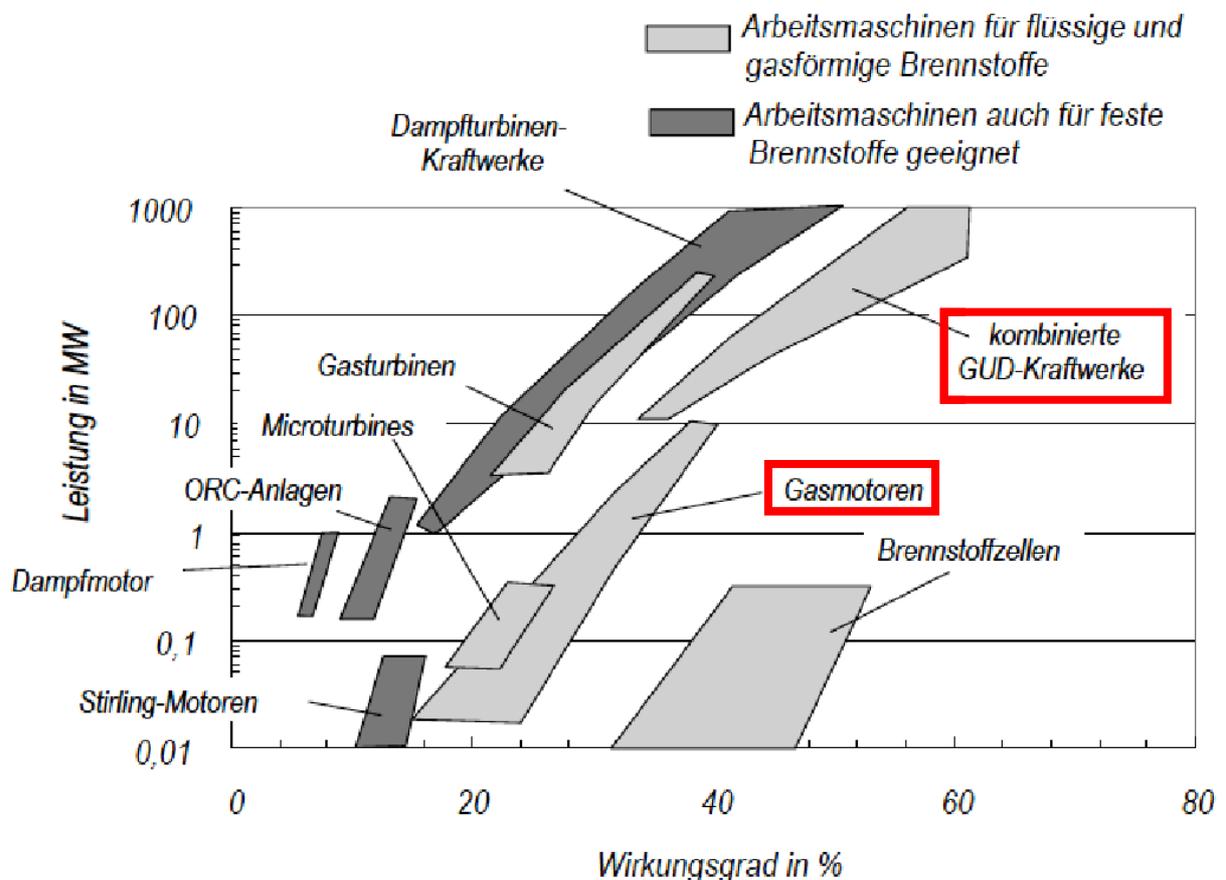
Herstellung eines Synthesegases mit einem hohen Heizwert eingesetzt werden. Das Synthesegas könnte in ein Gasnetz eingespeist und in zentralen kombinierten Gas- und Dampfkraftwerken (Abkürzung: GuD-Kraftwerken) sehr effizient verarbeitet werden - Abbildung 2-1.

vgl. (www.agnion.de, 2010)

Abbildung 2-1 dezentrale Wirbelschichtvergasung

Der Ansatz der Firma Agnion (Wirbelschichtvergasung und GuD Kraftwerk) könnte im Vergleich zum Stand der Technik mit dem Gasmotor einen höheren Wirkungsgrad erzielen, siehe rote Markierung in Abbildung 2-2.

vgl.(Karl J. , 2006, S. 192-194)



vgl.(Karl J. , 2006, S. 14)

Abbildung 2-2 Wirkungsgrad – Übersicht

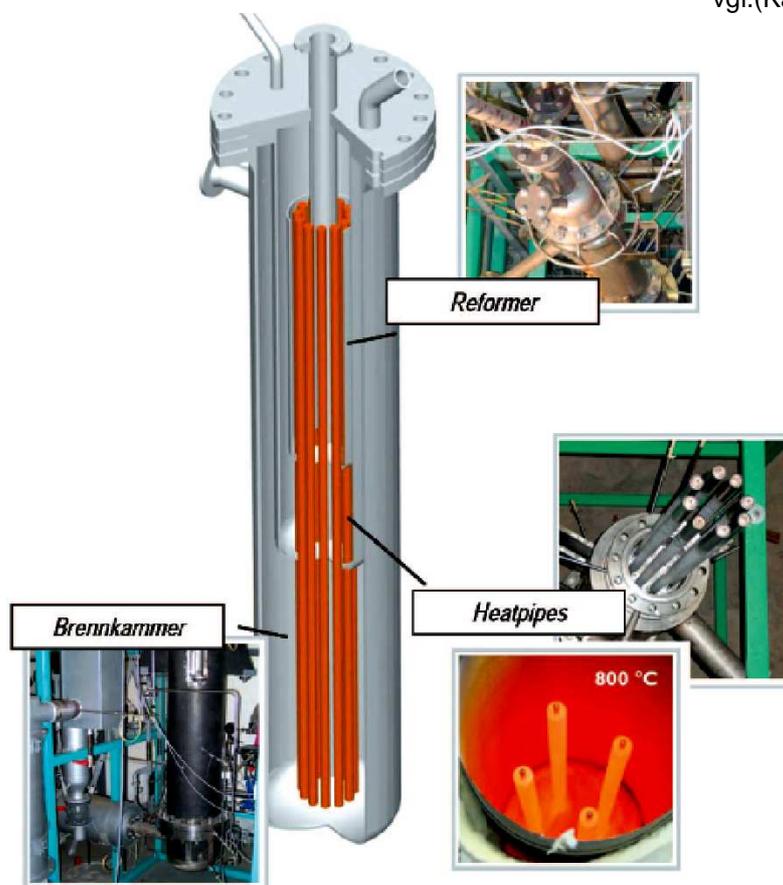
2.2. Heatpipe-Reformer

Der Heatpipe-Reformer nutzt das Prinzip der thermischen Vergasung und wird der allothermen Reformierung untergeordnet. Es können holzartige und andere kohlenstoffhaltige Brennstoffe zur Vergasung herangezogen werden.

Die drei wichtigsten Bauteile eines Heatpipe-Reformers – siehe Abbildung 2-3 – sind der Wirbelschicht-Reformer, die Wirbelschicht-Brennkammer und die Heatpipes, welche zur Wärmeübertragung zwischen den beiden erst genannten eingesetzt werden.

Der Biomassebrennstoff wird in den Wirbelschichtvergaser eingetragen. Als Wirbelschicht dient ein Sandbett, welches durch einen Gasstrom (Dampf im Reformer bzw. Luft in der Brennkammer) in Schwebelage gehalten wird. Im speziellen Fall des Heatpipe-Reformers wird dazu Wasserdampf verwendet. Im fluidisierten, hochturbulenten Sandbett vermischt sich der Brennstoff ideal und wird zu einem Gasgemisch umgesetzt. Im ersten Schritt wird die Biomasse thermisch getrocknet und mit steigenden Temperaturen setzen die Abschnitte der Pyrolyse und der Koksvergasung ein. Bei einer Temperatur von rund 800°C beginnt der Schritt der Reformierung, dabei entsteht ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid.

vgl.(Karl J. , 2005, S. 67)

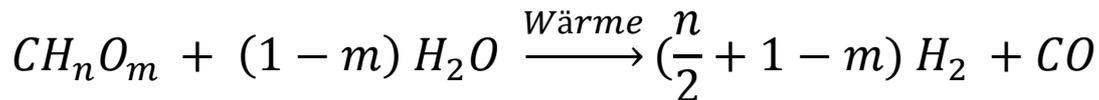


vgl.(Karl J. , 2005, S. 67)

Abbildung 2-3 Heatpipe – Reformer

Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist, dass der Brennstoff nicht vollständig vergast werden muss, sondern der unreaktierte Teil als Restkoks bzw. Holzkohle nach unten in die Wirbelschichtbrennkammer gefördert wird. Diese wird mit Luft fluidisiert, sodass der Restkoks bei einer Temperatur von 900°C verbrennt und so die zur Vergasung benötigte Wärme bereitstellt, die über Heatpipes an den Reformier überträgt wird.

Die zu vergasenden Festbrennstoffe werden über einen Fallschacht in den Vergaser eingebracht. Dort wird der Brennstoff in CO und H₂ umgesetzt.



vgl.(Karl J. , 2005, S. 67)

Gleichung 2-1 Reaktionsgleichung Wasserdampfvergasung

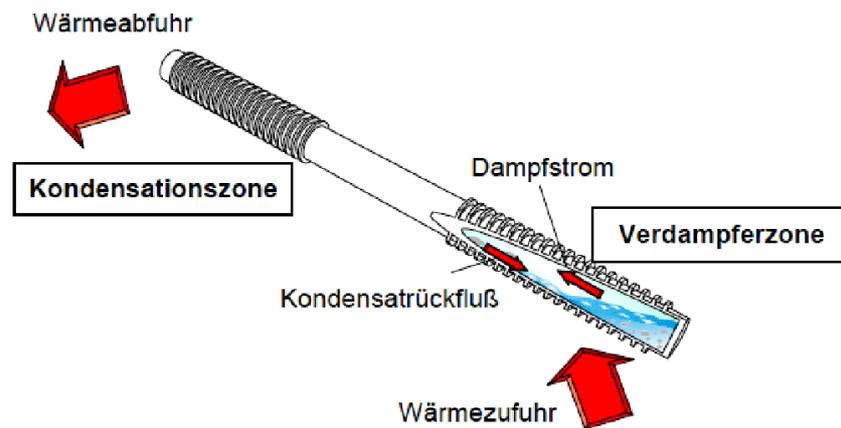
In Gleichung 2-1 ist die Reaktion für die allotherme Wasserdampfvergasung abgebildet. Aus Biomasse CH_nO_m und Wasserdampf H₂O wird ein Synthesegas – mit ca. 30-40% Wasserstoff H₂ und 20-30% Kohlenmonoxid CO – erzeugt.

Durch parallel ablaufende Reaktionen entstehen zusätzlich 10-20% Kohlendioxid CO₂, 5-10% Methan CH₄, 20-50% Wasserdampf und kleine Mengen höherer Kohlenwasserstoffe (Teere). Aufgrund dieses günstigen H₂:CO Verhältnisses (optimal = 3) eignet sich dieses Gas optimal zur Umsetzung in ein synthetisches Erdgas (SNG) oder aber auch zur Nutzung in Gasmotoren, Mikrogasturbinen oder Brennstoffzellen.

vgl.(Karl J. , 2005, S. 67)

2.2.1. Wärmeleitrohr – Heatpipe

Wärmeleitrohre (Heatpipes) bieten die Möglichkeit, hohe Wärmestromdichten zu übertragen. Sie sind abgeschlossene Systeme ohne bewegte Teile und arbeiten nahezu störungsfrei. Im geschlossenen Behälter befindet sich eine Flüssigkeit im thermodynamischen Gleichgewicht mit ihrem eigenen Dampf. Da sich im gesamten System flüssige und gasförmige Phasen im Gleichgewicht befinden, herrscht überall die gleiche Temperatur. Wird dieses System nun äußerlich mit einem Temperaturgradienten beaufschlagt, so bildet sich am heißen Ende eine Verdampfungszone und am kalten Ende die Kondensationszone aus. Das Kühlmedium nimmt also am einen Ende Wärme auf, strömt zum anderen Ende und gibt die aufgenommene Wärme wieder ab. Energie kann nicht verloren gehen, somit muss der in der Verdampfungszone eingebrachte Wärmestrom dem in der Kühlerzone abgeführten Wärmestrom entsprechen. Für die Zirkulation des Mediums in den Heatpipes ist die Schwerkraft oder eine Kapillarstruktur verantwortlich. Abbildung 2-4 zeigt das Funktionsprinzip einer Heatpipe-Wärmeübertragung.

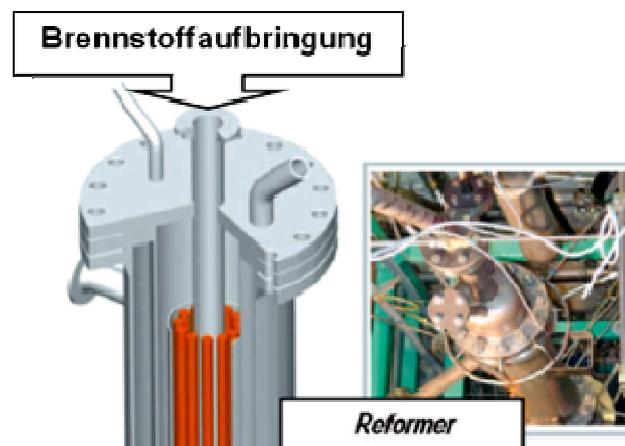


vgl.(Karl J. , 2005, S. 66)

Abbildung 2-4 Funktionsprinzip Heatpipe

2.2.2. Kompaktierung von Biomasse

Der Reformer wird mit einem Überdruck von 5 bar betrieben. Mit Hilfe kompakter Biomasse soll ein druckdichter Abschluss erzeugt werden. Ein weiterer Vorteil der Kompaktieranlage ist die Brennstoffvariabilität. Es ist möglich den Reformer mit verschiedenen Arten Brennstoff zu versorgen, z. B. Holz und Kohle. Es wird auch die Verweilzeit durch die kompakten Briketts erhöht.



vgl.(Karl J. , 2005, S. 67)

Abbildung 2-5 Biomassezufuhr Heatpipe-Reformer

Zurzeit wird die Biomasse über ein Schlenksystem in den Reformer eingebracht. Das System besteht aus zwei sequentiell angeordneten, pneumatisch angetriebenen Quetschventilen. Sie werden nacheinander geöffnet, um so den Reformer diskontinuierlich beschicken zu können. In der Arbeit soll ein neues System entwickelt werden, um den Biomasseeintrag zu verbessern. Die Biomasse wird über eine Matrize in den Reformer eingetragen. In der Matrize wird die Biomasse hochkomprimiert und erreicht eine hohe Dichte. Es könnte damit ein gasdichter Abschluss erzeugt werden und dadurch ein aufwendiges Druckschlenksystem entfallen.

Vorversuche

In dieser Arbeit sollen unterschiedliche Biomassefraktionen hoher Heterogenität in einem mechanischen Verfahren kompaktiert werden. Dazu soll ein Prototyp entwickelt und gebaut werden, mit welchem unterschiedliche Geometrien auf deren Eignung zur Kompaktierung hin untersucht werden. Um für die Planung des Prototyps Daten zur Verfügung zu haben, wurden Vorversuche durchgeführt – Kapitel 3.

3.1. Aufgabenstellung

Um das Verhalten von Hackgut in einem Pressverfahren näher betrachten zu können, wurde ein Vorversuchsstand aufgebaut. Dieser besteht aus einem Hydraulikzylinder, dem Hydraulikaggregat und der Schneidvorrichtung mit der dazugehörigen Matrize.

Feuchtegehalt des Hackgutes, die Geometrie der Matrize aber auch die Hublänge des Zylinders haben einen sehr großen Einfluss auf den Pressvorgang. Diese Faktoren sollen aufeinander abgestimmt werden, um kompakte Presslinge erzeugen zu können. Aufgabe dieser Presslinge ist es, ein Entweichen des Produktgases zu verhindern.

Bei weiteren Versuchen soll das Augenmerk auf das Fördern der Presslinge gelegt werden. Dabei sollen die Briketts durch ein Rohr befördert werden.

Als Rohstoff für die Presslinge soll handelsübliches Hackgut dienen. Der Feuchtegehalt soll von Versuch zu Versuch verändert werden, um so den Einfluss auf die Dichte der Presslinge erkennen zu können.

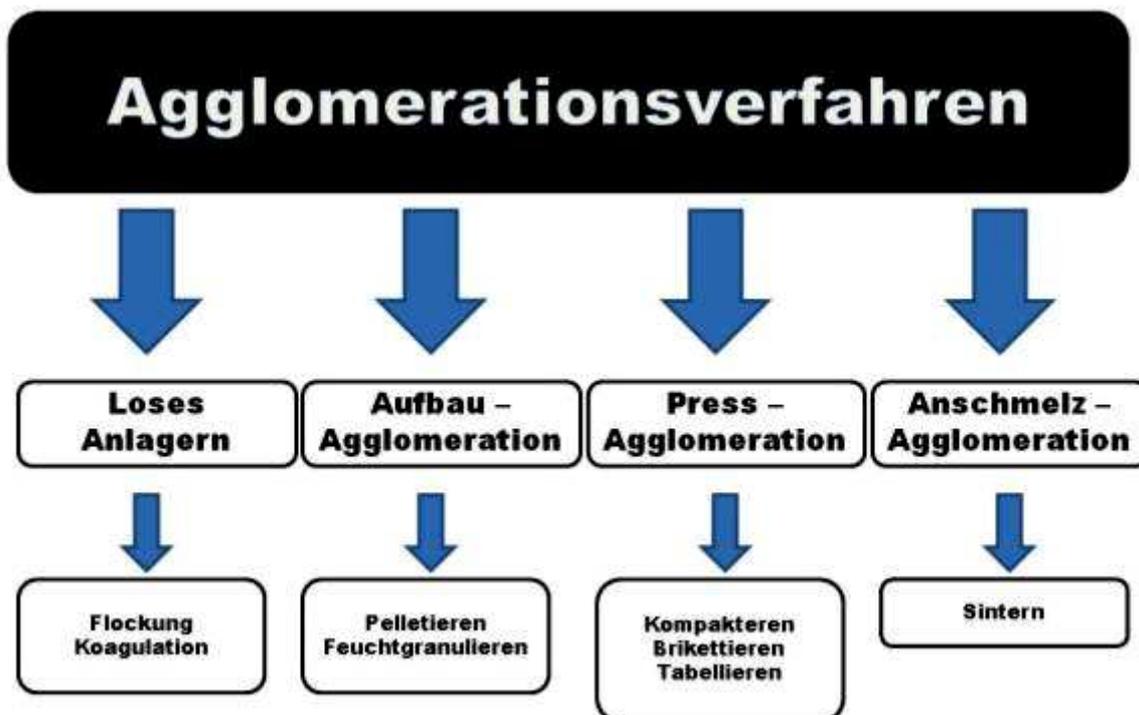
Mit den Daten soll nicht nur das Pressverhalten bestimmt, sondern auch die Parameter für die Planung des Prototyps gefunden werden. Für die Auslegung des Prototyps sind die Presskraft des Zylinders und die Leistungsaufnahme der Anlage wichtig, daher wurde eine Kraft- und Leistungsmessung im Vorversuchsstand installiert. Im Kapitel 3.3 werden der Vorversuchsstand vorgestellt und die gefundenen Ergebnisse erklärt.

Zuvor – im Kapitel 3.2 – wird ein kurzer Kompaktierüberblick gegeben, um über das Zusammenlagern von Teilchen einen Überblick zu gewinnen.

3.2. Kompaktiermechanismen

3.2.1. Kompaktierverfahren

Unter Kompaktiermechanismen soll das Zusammenlagern und Haftenbleiben von Teilchen verstanden werden. Es kann auch von Agglomeration gesprochen werden. Durch die Zusammenführung von Partikeln werden die Stoffeigenschaften wie z.B. Dichte, oder Heizwert verändert. In der folgenden Abbildung 3-1 sind die verschiedenen Agglomerationsverfahren aufgelistet:



vgl.(Stieß, 1994, S. 182)

Abbildung 3-1 Agglomerationsverfahren

Im Falle der Kompaktierung von Biomasse kommt das Verfahren der Aufbau- oder Press-Agglomeration zur Anwendung. Aufgrund der großen Teilchen der Biomasse kann durch „Loses Anlagern“ und „Anschmelz-Agglomeration“ kein kompakter Pressling erzeugt werden.

3.2.1.1. Aufbauagglomeration

Die Agglomeration kommt durch Abrollen oder Mischen der Partikel zu Stande. Die Teilchengröße und der Feuchtegehalt müssen in einem definierten Bereich liegen, um die Agglomeration durchführen zu können. Das Gut muss mit der geeigneten Flüssigkeitsmenge so gemischt werden, dass sich kapillare Bindungen zwischen den Teilchen bilden können.

Im Verfahren der Aufbauagglomeration wechseln sich, aufgrund des Mischvorganges, Auf- und Abbauschritte ab. Wenn der Bereich von Feuchte und Größe nicht eingehalten wird, steht der Abbauschritt im Vordergrund und die Agglomeration kommt nicht zu Stande.

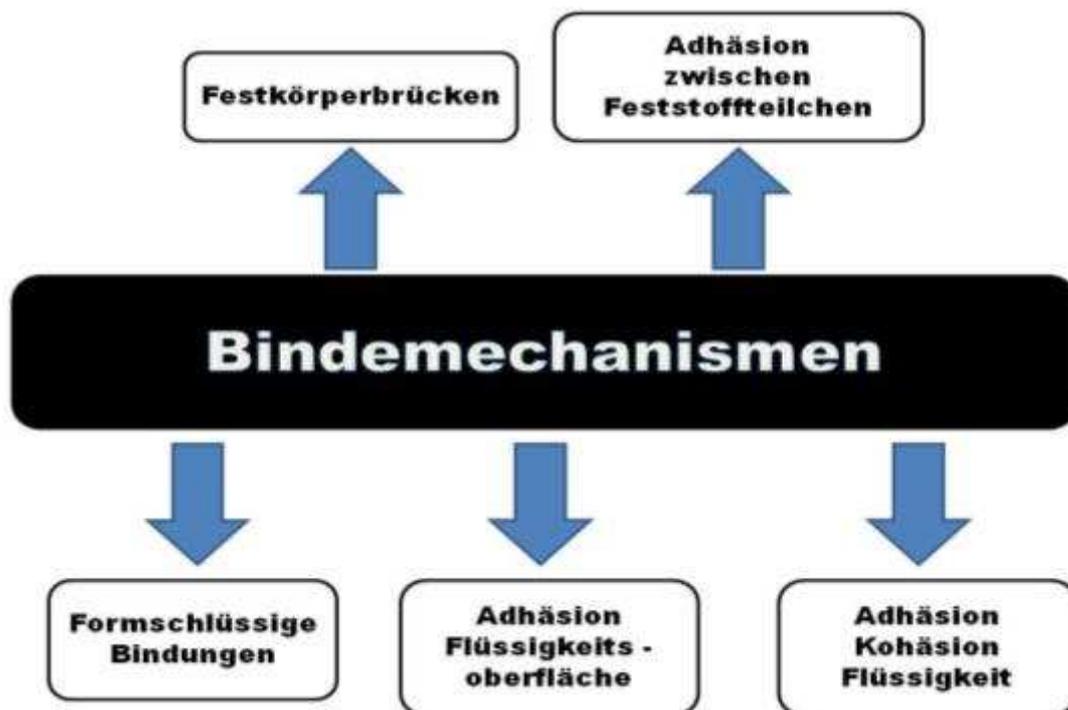
3.2.1.2. Pressagglomeration

Die Teilchen eines Feststoffes werden durch eine äußere Kraft so nahe aneinander gebracht, dass sie aneinander haften bleiben.

Die Pressagglomeration wird in Kompression und Extrusion unterteilt: Die Kompression beinhaltet das Verpressen von Schüttgütern mit speziellen Presswerkzeugen. Die Extrusion dagegen, nutzt das Prinzip der Lochpresse. Bei beiden Verfahrenstypen erhöhen sich die Bindekräfte der Teilchen, je höher der ausgeübte Druck ist.

3.2.2. Betrachtung der Bindemechanismen

Man unterscheidet fünf verschiedene Bindemechanismen, diese sind in Abbildung 3-2 dargestellt:



vgl. (Stieß, 1994, S. 191)

Abbildung 3-2 Agglomeration-Bindemechanismen

In den folgenden Aufzählungspunkten werden die Agglomeration-Bindemechanismen – die in Abbildung 3-2 zu sehen sind – näher erklärt:

➤ Festkörperbrücken

Festkörperbrücken entstehen beim Sintern, beim Auflösen und nachfolgendem Kristallisieren oder durch die Zugabe eines aushärtenden Bindemittels.

- Adhäsion zwischen Feststoffteilchen
Binden sich Partikel aufgrund von Dipol-Wechselwirkungen oder den Van-der-Waals-Kräften aneinander, so spricht man von Adhäsion zwischen Feststoffteilchen. Auch elektrostatische Anziehungskräfte können eine Agglomeration hervorrufen.
- Formschlüssige Bindungen
Diese Form der Bindung tritt bei faserigen oder plättchenförmigen Teilchen auf. Die Partikeln verhaken oder verfilzen sich, dadurch kommt die Bindung zustande.
- Adhäsion Flüssigkeitsoberfläche
Diese Bindung benötigt eine Flüssigkeit, mit einer frei beweglichen Oberfläche. Ein gutes Beispiel dafür ist Wasser, das eine sehr wichtige Rolle in der Agglomerationstechnik spielt. Es übernimmt in sehr vielen Fällen die Rolle des Bindemittels.
- Adhäsion – Kohäsion – Flüssigkeit
Diese Art der Bindung benötigt eine Flüssigkeit, welche zähflüssig ist. Wird durch die Überlastung die Brückenverbindung getrennt, entsteht ein sich einschnürender Teil, welcher am Partikel verbleibt.

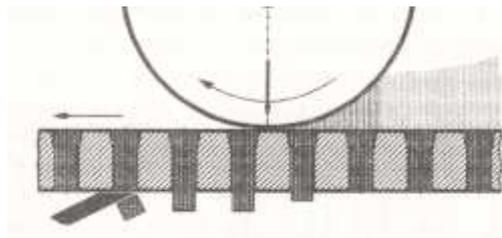
3.2.3. Herstellung Biomassebriketts

In Kapitel 3.2.2 wurden die einzelnen Bindemechanismen beschrieben. Für die Erzeugung kompakter Briketts aus Biomasse ist die formschlüssige Bindung verantwortlich. Die unterschiedlichen Verfahren um Agglomerate zu erzeugen, wurden in Kapitel 3.2.1 vorgestellt. Aufgrund der formschlüssigen Bindemechanismen und der Partikelgröße von Biomassehackgut wird die Pressagglomeration eingesetzt. Das Verfahren wird im folgenden Kapitel 3.2.4 noch genauer beschrieben.

3.2.4. Verfahrensprinzipien Pressagglomeration

Die Pressagglomeration wird durch verschiedene Wirkprinzipien realisiert. Die Einteilung wird nach der Pressgeometrie und der Verdichtungsbegrenzung vorgenommen:

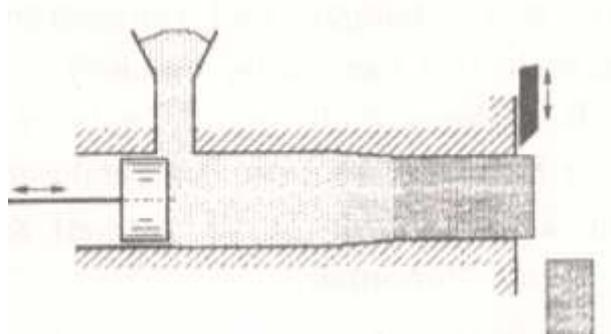
- a.) Pressagglomeration durch Walzenpressen – Abbildung 3-3



vgl. (Stieß, 1994, S. 212)

Abbildung 3-3 Walzenpressen

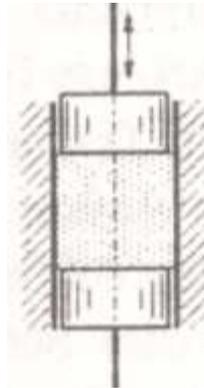
- b.) Pressagglomeration im offenen Formkanal wie z.B. Formkanal- Stempel- und Lochpressen - Abbildung 3-4



vgl. (Stieß, 1994, S. 212)

Abbildung 3-4 offener Formkanal

- c.) Pressagglomeration in geschlossener Form mit geometrisch begrenzter Verdichtung wie z.B. bei Stempelpressen und Tablettenpressen - Abbildung 3-5



vgl. (Stieß, 1994, S. 211-212)

Abbildung 3-5 geschlossene Form

Mit speziellen Werkzeugen wird eine große äußere Kraft auf ein trockenes Haufwerk oder eine Schüttung ausgeübt. Dadurch verringert sich der Abstand zwischen den Teilchen und es kommt zu vielen Berührungspunkten. Durch das Aufbringen der äußeren Kraft, mit Hilfe von Hydraulikzylindern oder Exzenterpressen, verringert sich das Hohlraumvolumen und es kann zu einer Zerkleinerung der Teilchen kommen. Das Aufgabegut wird durch eine Matrice gepresst und erreicht dadurch die hohe Kompaktheit. Der notwendige Gegendruck wird durch die Reibung zwischen der Presskanalwand und dem Gut aufgebracht. Erntefeuchtes Gut lässt sich leicht verpressen, da die beim Pressvorgang austretende Flüssigkeit als Schmiermittel wirkt. Die Gutaufbringung zu solchen Pressen ist meist so gestaltet, dass nur fließfähiges Material verarbeitet werden kann oder aufwendige Zuführeinrichtungen installiert werden, um das Pressgut in den Pressraum zu befördern. Durch den Presszylinder muss die Reibkraft überwunden und das Gut vorwärts bewegt werden. Außerhalb des Pressraumes bricht der Pressling ab, wobei die Länge zwischen einem und mehreren Zylinderhüben liegen kann. Stark schwankt nicht nur die Länge, auch die Stirnfläche der zylindrischen Form liegt nicht immer parallel zueinander.

3.3. Aufbau Vorversuchsstand

Für die ersten Vorversuche wurde eine handelsübliche Werkzeugpresse zu einer „Kompaktieranlage“ umgebaut - Abbildung 3-6. Die Kraft wird mit einem doppelwirkenden Zylinder aufgebracht, welcher eine maximale Presskraft von 100.000 N liefert. Das dazu gehörige Hydraulikaggregat ist in der Lage einen maximalen Druck von 180 bar aufzubauen. Zwischen Kolbenstange und der Schneidringvorrichtung {3} befindet sich die Kraftmesseinrichtung {2}. Um zu verhindern, dass die Schneidvorrichtung gegen die Matrize {4} drückt, muss der Zylinder gut geführt werden {5}.

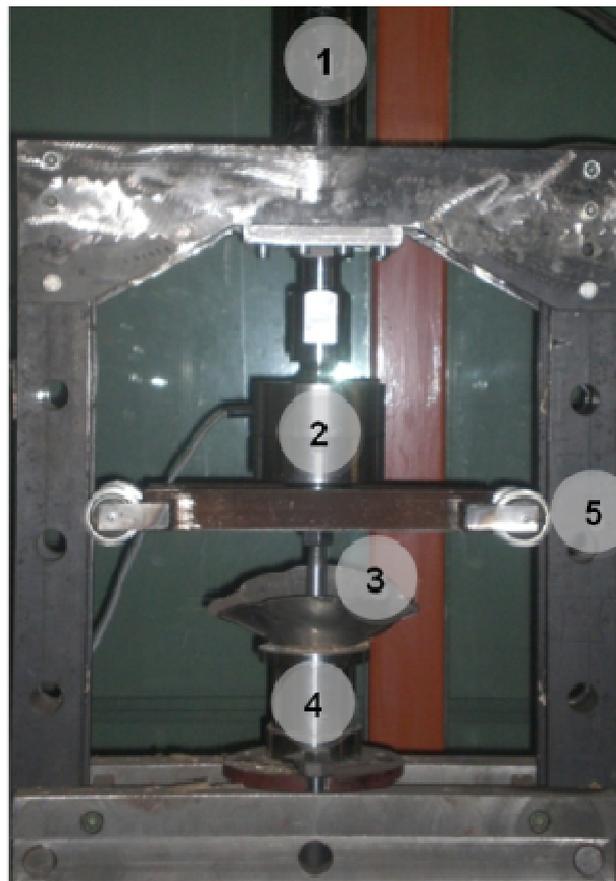


Abbildung 3-6 Vorversuchsaufbau

Folgende Tabelle 3-1 beschreibt die einzelnen Komponenten:

	Beschreibung
1	Doppelwirkender Hydraulikzylinder
2	Kraftmessdose
3	Schneidvorrichtung
4	Pressmatrize
5	Führung Schneidvorrichtung

Tabelle 3-1 Beschreibung Teile Vorversuchsanlage

3.3.1. Hydraulik

Hydraulik ist die Lehre vom Strömungsverhalten der Flüssigkeiten. Sie umfasst die gesamte Hydrostatik und Hydrodynamik und findet Anwendung in vielen Maschinen wie Fahrzeugen, Liften, Pressen u. a. m..

3.3.1.1. Hydraulikzylinder

Hydraulikzylinder wandeln die vom Aggregat aufgebrauchte hydraulische Energie in eine mechanische um. Durch den hohen Hydraulikdruck, der durch die Hydraulikpumpe erzeugt wird, können große Kräfte aufgebracht werden. Die charakteristischen Größen eines Hydrauliksystems (Zylinder und Aggregat) sind in Tabelle 3-2 dargestellt:

	Kraft	Arbeitsgeschwindigkeit
Hydraulikdruck	✓	
Kolbenfläche	✓	✓
Hydraulikflüssigkeitsstrom		✓

Tabelle 3-2 charakteristischen Größen ein Hydrauliksystems

In der folgenden Abbildung 3-7 sind die Größen in einem Diagramm zusammengefasst:

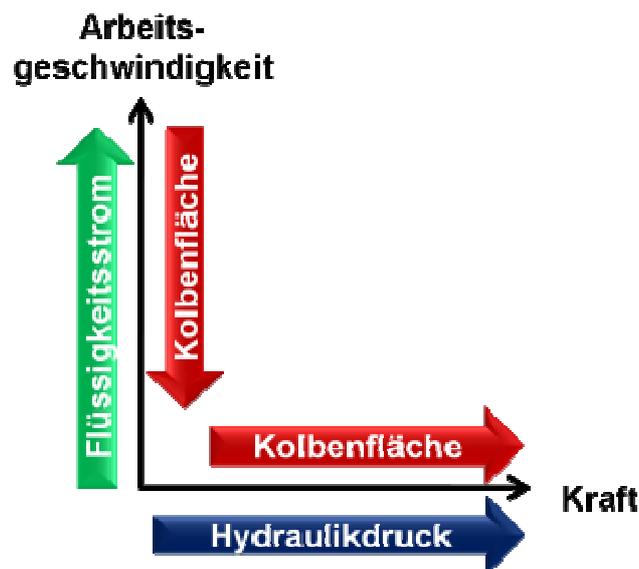


Abbildung 3-7 charakteristischen Größen ein Hydrauliksystems

Das Zylinderrohr wird meist als nahtloses Stahlrohr hergestellt, in dem sich der Arbeitszylinder mit der Kolbenstange bewegt. Die Bewegungsrichtung des Kolbens kann mit Hilfe der Anströmrichtung variiert werden.

Wird das Fluid über den bodenseitigen Anschluss zugeführt, so bewegt sich der Kolben aus dem Zylinder. Soll der Kolben wieder in den Zylinder einfahren, so muss die Hydraulikflüssigkeit stangenseitig zugeführt werden. Man unterscheidet zwischen doppel- und einfachwirkenden Zylindern.

Der doppelwirkende Hydraulikzylinder bietet den Vorteil, dass er in beide Bewegungsrichtungen Arbeit verrichten kann. Er besitzt zwei mit Hydraulikflüssigkeit beaufschlagbare Kolbenflächen. Je nach Arbeitsrichtung wird die ganze Fläche oder nur ein Teil mit Hydraulikflüssigkeit beansprucht. Daher kann es trotz konstantem Druck $p = \text{konst.}$ und Volumenstrom $Q = \text{konst.}$ zu Unterschieden in der Vorschubgeschwindigkeit und den Kräften kommen. Die Abmessungen des Vorversuchszylinders sind in Abbildung 3-8 und in Tabelle 3-3 angeführt.

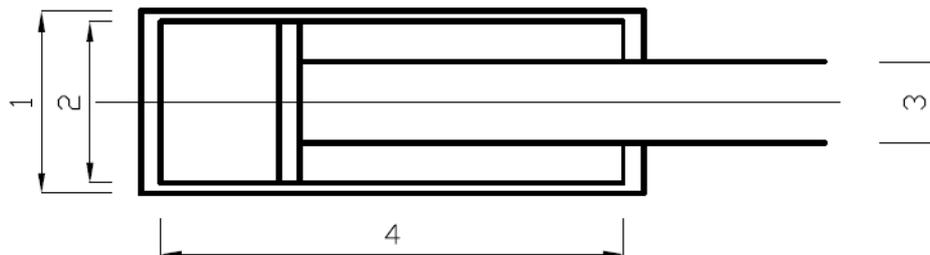


Abbildung 3-8 Zylinderabmessung Vorversuchsstand

	Beschreibung		Einheit
1	Zylinderdurchmesser - außen	90	mm
2	Zylinderdurchmesser - innen	80	mm
3	Kolbendurchmesser	40	mm
4	Hublänge	300	mm

Tabelle 3-3 Zylinderabmessungen Vorversuchsstand

3.3.1.1.1. Hubkraft

Für die Dimensionierung eines Hydraulikzylinders werden die auf ihn wirkenden Kräfte herangezogen. Als maximale Kraft wird die Lastkraft F_S gewählt. Es wirken jedoch auch Reibungskräfte F_R und Trägheitskräfte F_B auf den Zylinder.

Unter Berücksichtigung dieser kann die Zylinderkraft F_Z , wie in Gleichung 3-1 angeführt ist, berechnet werden.

$$F_Z = F_S + F_R + F_B$$

Gleichung 3-1

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 161)

F_Z	...	Zylinderkraft	N
F_S	...	Lastkraft	N
F_R	...	Reibungskraft	N
F_B	...	Trägheitskräfte	N

Für langsam ablaufende Vorgänge statischer Belastung bzw. konstanter Geschwindigkeit wird unter praktischen Bedingungen auf die Trägheitskräfte verzichtet. So wird mit der Gleichung 3-2 gerechnet.

		$F_Z \approx F_S + F_R$	Gleichung 3-2 vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 161)
F_Z	...	Zylinderkraft	N
F_S	...	Lastkraft	N
F_R	...	Reibungskraft	N

Durch einen Kraftansatz kann F_Z bestimmt werden, jedoch muss Gleichung 3-3 immer erfüllt werden.

		$F_{Zmax} > F_Z$	Gleichung 3-3 vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 162)
F_{Zmax}	...	maximale Zylinderkraft	N
F_Z	...	Zylinderkraft	N

Abbildung 3-9 zeigt das Kräftegleichgewicht eines reibungsfreien Hydraulikzylinders, der zwei voneinander getrennte Druckräume 1 und 2 aufweist. Diese weisen die Zylinderflächen A_1 bzw. A_2 und die Drücke p_1 bzw. p_2 auf. Es müssen die beiden Druckkräfte und die auf den Kolben wirkende Kraft F_S im Gleichgewicht stehen:

		$p_1 * A_1 = p_2 * A_2 + F$	Gleichung 3-4 vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 162)
p_1	...	Druck im Raum 1	N/m ²
p_2	...	Druck im Raum 2	N/m ²
A_1	...	Zylinderfläche 1	m ²
A_2	...	Zylinderfläche 2	m ²
F	...	Lastkraft	N

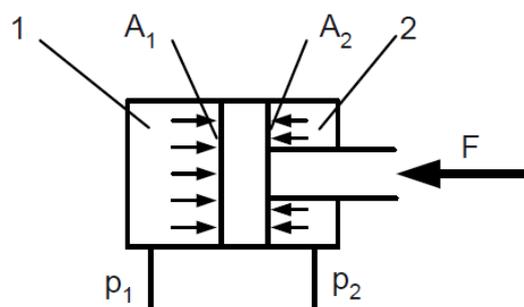


Abbildung 3-9 Kräftebilanz am reibungsfreien Arbeitszylinder

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 162)

Für einen doppelwirkenden Zylinder können unter Vernachlässigung der mechanischen und volumetrischen Verluste die wirkenden Kräfte beim Ausfahren F_{ZAmax} aus Abbildung 3-10 und beim Einfahren F_{ZEmax} aus Abbildung 3-11 abgeleitet werden.

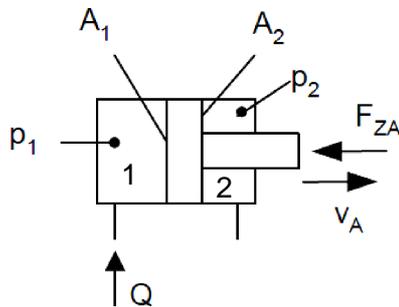


Abbildung 3-10 Arbeitszylinder - Ausfahren

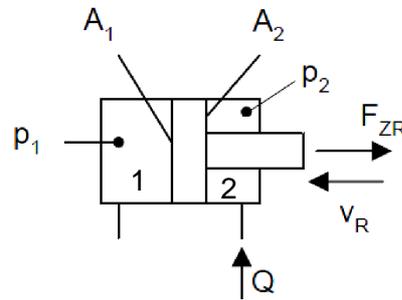


Abbildung 3-11 Arbeitszylinder - Einfahren

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 162)

Beim Ausfahren des Zylinders muss die Hydraulikflüssigkeit vom vorderen Teil des Zylinders verdrängt werden, daher der Term $A_2 * p_2$ in Gleichung 3-5. Beim Einfahren werden die Terme vertauscht - Gleichung 3-6.

Ausfahrt (Vorlauf)	Einfahrt (Rücklauf)
$F_{ZAmax} = A_1 * p_{1max} - A_2 * p_2$ Gleichung 3-5	$F_{ZEmax} = A_2 * p_{2max} - A_1 * p_1$ Gleichung 3-6

Tabelle 3-4 Berechnungsgleichungen - Hubkraft doppelwirkender Hydraulikzylinder

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 162)

F_{ZAmax}	...	wirkende Kraft beim Ausfahren des Zylinders	N
F_{ZEmax}	...	wirkende Kraft beim Einfahren des Zylinders	N
A_1	...	Zylinderfläche 1	m ²
A_2	...	Zylinderfläche 2	m ²
p_1	...	Druck im Raum 1	N/m ²
p_2	...	Druck im Raum 2	N/m ²

Es kann angenommen werden, dass die Hydraulikflüssigkeit ohne großen Widerstand aus dem Zylinder gedrückt werden kann. Für die Berechnung der Ausfahrkraft wird die Kraft $A_2 * p_2$ und für die Einfahrkraft $A_1 * p_1$ daher gleich Null gesetzt. Somit vereinfacht sich die Gleichung 3-5 und Gleichung 3-6 auf:

Ausfahrt (Vorlauf)	Einfahrt (Rücklauf)
$F_{ZAmax} = A_1 * p_{max}$ Gleichung 3-7	$F_{ZEmax} = A_2 * p_{max}$ Gleichung 3-8

F_{ZAmax}	...	wirkende Kraft beim Ausfahren des Zylinders	N
F_{ZEmax}	...	wirkende Kraft beim Einfahren des Zylinders	N
A_1	...	Zylinderfläche 1	m ²
A_2	...	Zylinderfläche 2	m ²
p_{max}	...	maximaler Hydraulikdruck	N/m ²

Zu achten ist auf den maximalen Druck p_{\max} , der nicht gleich Ausgangsdruck der Hydraulikpumpe ist, sondern um den Anteil der Verluste vermindert wird.

Mit Hilfe der gegebenen Zylinderabmessungen und dem bekannten Hydraulikdruck kann nun die Ausfahrkraft nach Gleichung 3-7 bestimmt werden.

Beschreibung		Einheit
maximaler. Hydraulikdruck	180	bar
Zylinderdurchmesser - innen	80	mm
Zylinderfläche	5,026 E-03	m ²
Ausfahrkraft	90478	N

Tabelle 3-5 Ausfahrkraft des Zylinders

Damit ergibt sich eine maximale errechnete Ausfahrkraft von 90478 N. Die gemessene Maximalkraft liegt bei 89514 N. Dieser Unterschied wird mit den mechanischen und volumetrischen Verlusten begründet.

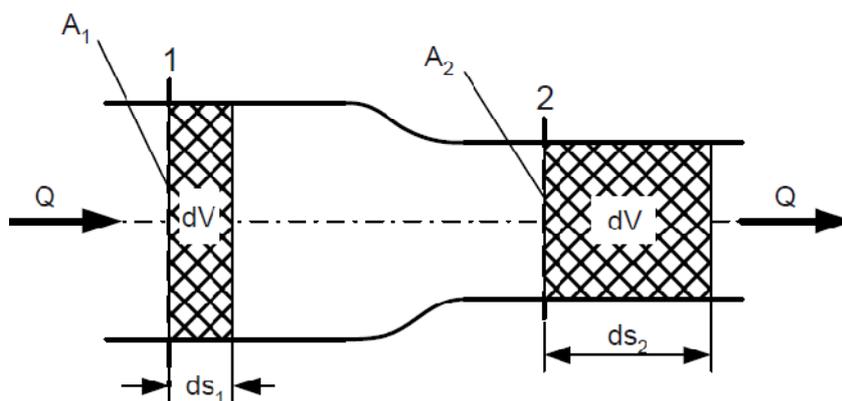
3.3.1.1.2. Ausfahr- und Einfahrgeschwindigkeit

Strömt eine Flüssigkeit in einer Leitung - Abbildung 3-12 - so gilt für den Massenstrom:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho * \frac{dV}{dt} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 44)

\dot{m}	...	Massenstrom	[kg/s]
m	...	Masse	[kg]
t	...	Zeit	[s]
ρ	...	Dichte	[kg/m ³]
V	...	Volumen	[m ³]



vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 44)

Abbildung 3-12 Strömung durch eine Leitung

Bei einer inkompressiblen Flüssigkeit verändert sich Gleichung 3-9 zu:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} \quad \text{Gleichung 3-10}$$

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 44)

\dot{V}	...	Volumenstrom	m^3/s
dV	...	Volumenänderung	m^3
dt	...	Zeitänderung	s

Da es sich bei Hydraulikflüssigkeiten näherungsweise um ein inkompressibles Fluid handelt, wird meist mit dem Volumenstrom \dot{V} anstatt dem Massenstrom \dot{m} gerechnet.

Für das Volumenstromelement aus Abbildung 3-12 kann nun geschrieben werden:

$$dV = A * ds \quad \text{Gleichung 3-11}$$

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 44)

V	...	Volumen	m^3
A		Fläche	m^2
s	...	Weg	m

Daher verändert sich auch Gleichung 3-10 zu:

$$\dot{V} = A * \frac{ds}{dt} = A * v \quad \text{Gleichung 3-12}$$

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 44)

\dot{V}	...	Volumenstrom	m^3/s
A	...	Fläche	m^2
s	...	Weg	m
t	...	Zeit	s
v	...	Geschwindigkeit	m/s

Der Volumenstrom \dot{V} ergibt sich somit aus dem Produkt Fläche A und der mittleren Fließgeschwindigkeit v. Ändert sich der Querschnitt längs der Fließrichtung wie in Abbildung 3-12, so gilt das Gesetz der Massenerhaltung und die Strömungsgeschwindigkeit verändert sich mit dem Querschnitt.

Formt man die Gleichung 3-12 um, so kann man daraus die Ausfahr- und Einfahrtgeschwindigkeit errechnen:

Ausfahrt (Vorlauf)		Einfahrt (Rücklauf)	
$v_A = \frac{\dot{V}}{A_A}$	Gleichung 3-13	$v_E = \frac{\dot{V}}{A_E}$	Gleichung 3-14

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 45)

v_A	...	Ausfahrgeschwindigkeit - Zylinder	m/s
v_E	...	Einfahrgeschwindigkeit - Zylinder	m/s
A_A	...	Zylinderfläche – Ausfahren	m ²
A_E	...	Zylinderfläche – Einfahren	m ²
\dot{V}	...	Volumenstrom	m ³ /s

Im Fall des Vorversuchstandes kann die Ausfahr- und Einfahrgeschwindigkeit auch mit Hilfe der Geschwindigkeitsformel Gleichung 3-15 und Gleichung 3-16- ermittelt werden.

Ausfahrt (Vorlauf)		Einfahrt (Rücklauf)	
$v_A = \frac{s_A}{t_A}$	Gleichung 3-15	$v_E = \frac{s_E}{t_E}$	Gleichung 3-16

v_A	...	Ausfahrgeschwindigkeit - Zylinder	m/s
v_E	...	Einfahrgeschwindigkeit - Zylinder	m/s
s_A	...	Zylinderweg - Ausfahren	m
s_E	...	Zylinderweg - Einfahren	m
t_A	...	Zeit - Ausfahren	s
t_E	...	Zeit - Einfahren	s

Um die Ausfahrgeschwindigkeit errechnen zu können, wird der zurückgelegte Weg des Zylinders und die dazu benötigte Zeit am Vorversuchstand gemessen.

In der folgenden Tabelle 3-6 sind die Ergebnisse der Messung dargestellt:

Beschreibung		Einheit		
		Ausfahrt	Einfahrt	
Weg	s	0,093	0,078	m
Zeit	t	7,20	4,9	s
Geschwindigkeit	v_A und v_E	0,0129	0,0159	m/s

Tabelle 3-6 Weg / Zeit Messung - Vorversuchszylinder

3.3.1.2. Hydraulikaggregat

Zu den hydraulischen Verdrängungsmaschinen gehören Motoren und Pumpen. Sie sind in der Regel gleich aufgebaut und arbeiten nach dem Verdrängungsprinzip. Je nach Fließrichtung des Volumenstroms kann man die Maschinen als Pumpe oder Motor betreiben. Mit der Hydropumpe wird mechanische in hydraulische Leistung überführt. Das Gegenteil dazu ist der Hydromotor, der hydraulische in mechanische Leistung umwandelt. Die charakteristische Größe ist das geometrische Verdrängungsvolumen V_v . Damit kann der theoretische Volumenstrom \dot{V}_{th} , der durch die Maschine strömt, mit Hilfe der Drehzahl n bestimmt werden.

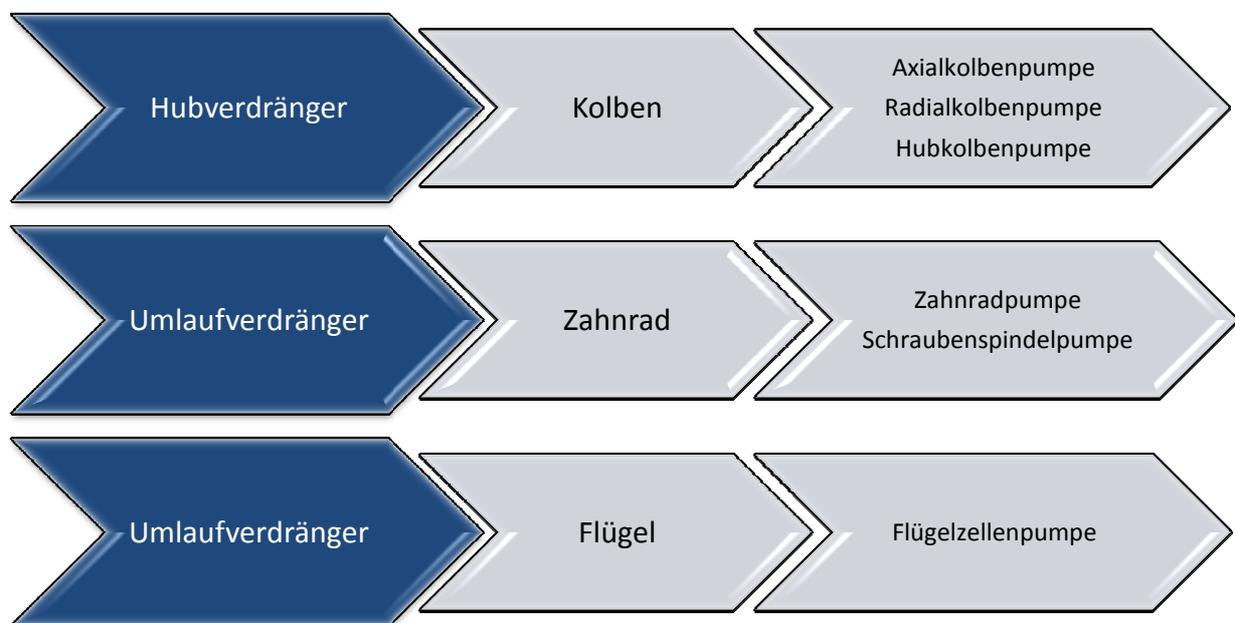
$$\dot{V}_{th} = V_v * n$$

Gleichung 3-17

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 45)

\dot{V}_{th}	...	theoretische Volumenstrom	m^3/s
V_v	...	geometrische Verdrängungsvolumen	m^3
n	...	Drehzahl	$1/s$

Die Pumpe saugt die Hydraulikflüssigkeit aus einem Behälter an und verdrängt diese durch die Leitungen. Durch das Entgegenwirken von Kräften wird ein Hydraulikdruck aufgebaut. Es gibt verschiedene Möglichkeiten bzw. Pumpenarten - Abbildung 3-13 - um den Druck aufzubauen:

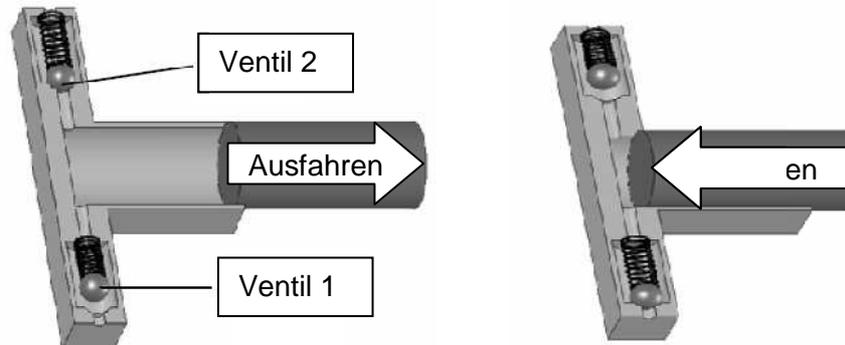


vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 109-110)

Abbildung 3-13 Auflistung der Hydraulikpumpenarten

3.3.1.2.1. Hubverdränger- oder Schubkolbenmaschinen

Bei Hubverdrängermaschinen wird die zyklische Veränderung der Zellgröße durch Längsbewegung des Kolbens erzielt. Vertreter hierfür wären die Axialkolben- und die Radialkolbenmaschine.



vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 110)

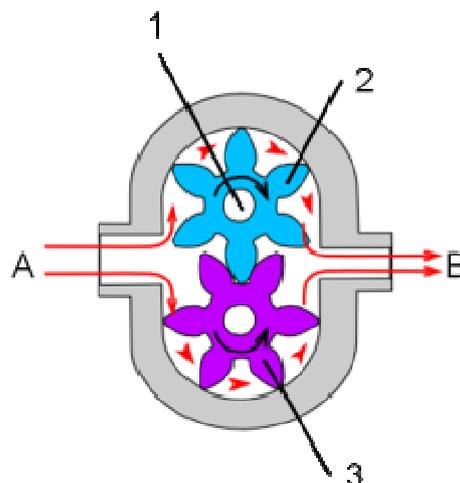
Abbildung 3-14 Schema der Hubverdrängermaschine

Das Grundprinzip der Hubverdrängermaschine wird anhand der Abbildung 3-14 erklärt. Beim Ausfahren des Kolbens entsteht ein Unterdruck, welcher bewirkt, dass sich das Ventil 1 öffnet und Flüssigkeit in den Raum strömt. Durch den Druck im Hydraulikkreislauf bleibt das Ventil 2 geschlossen. Fährt nun der Kolben wieder ein, so öffnet sich das Ventil 2 und der Druck wird aufgebaut. Dadurch bleibt das Ventil 1 beim Einfahrhub geschlossen.

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 110)

3.3.1.2.2. Umlaufverdränger- oder Drehkolbenmaschinen

Diese Maschinen fördern die Flüssigkeit durch Drehung von Zahnrädern, Kammern oder Zellen. Bekannte Baugruppen sind die Zahnradpumpe, Schraubmaschinen und die Flügelzellmaschine. Anhand der Zahnradpumpe soll die Umlaufverdrängermaschine erklärt werden.



vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 126)

Abbildung 3-15 Schema einer Außenzahnradpumpe

Wichtige Teile einer Zahnradpumpe sind:

	Teil
1	Triebwelle
2	treibendes Zahnrad
3	getriebenes Zahnrad
A	Unterdruck – Saugseite
B	Überdruck – Druckseite

Tabelle 3-7 Teile einer Außenzahnradpumpe

Über die Triebwelle 1 wird das Zahnrad 2 in die eingezeichnete Richtung gedreht. Dadurch ergibt sich für das Zahnrad 3 eine entgegengesetzte Drehrichtung. An der Saugseite A der Pumpe bewegt sich der im Eingriff stehende Zahn des einen Zahnrades aus der Zahnücke des anderen Zahnrades heraus. Durch die damit verbundene Volumenvergrößerung entsteht im Saugraum ein lokaler Unterdruck an den im Eingriff befindlichen Zähnen, wodurch sich die jeweilige Zahnkammer mit Hydraulikflüssigkeit füllt.

An der Druckseite der Hydropumpe entsteht durch die ineinandergreifenden Zähne eine Volumenverkleinerung und die Hydraulikflüssigkeit wird in die Druckleitung der Hydroanlage verdrängt.

Eigenschaften einer Zahnradpumpe:

- ✓ einfacher und robuster Aufbau,
- ✓ relativ preisgünstige Herstellung, auch bei hoher Genauigkeit,
- ✓ hohe Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit,
- ✓ Betrieb der Pumpe ist unabhängig von der Einbaulage,
- ✓ bei konstanter Drehzahl gutes Ansaugverhalten,
- ✓ geringe Schmutzempfindlichkeit,
- ✓ großer Drehzahlbereich $n = 500$ bis 6000 min^{-1} ,
- ✓ guter Wirkungsgrad bis oft 90 % und darüber hinaus.

vgl. (Will & Norbert, 2008, S. 126)

Aufgrund dieser Eigenschaften der Zahnradpumpe kommt sie bei Hydraulikpressen oft zum Einsatz, so auch bei der Vorversuchsanlage und beim Kompaktierprototyp.

3.3.1.2.3. Hydraulikflüssigkeitsstrom

Mit der gegebenen Ausfahrgeschwindigkeit und der Zylinderfläche kann mit der Kontinuitätsgleichung der Volumenstrom berechnet werden:

$$\dot{V}_p = \frac{v_A * A_A}{10 * \eta_{Pvol}} \quad \text{Gleichung 3-18}$$

vgl. (Tschätsch, 1997, S. 265)

\dot{V}_p	...	Volumenstrom der Pumpe	l/min
v_A	...	Ausfahrgeschwindigkeit - Zylinder	m/min
A_A	...	Zylinderfläche - Ausfahren	cm ²
η_{Pvol}	...	volumetr. Wirkungsgrad der Pumpe	-

Der volumetrische Wirkungsgrad wird mit 0,85 angenommen.

Beschreibung		Einheit		
Ausfahrgeschwindigkeit - Zylinder	v_A	0,775	m/min	
Zylinderfläche	A	50	cm ²	
volumetrischer Wirkungsgrad	η_{Pvol}	0,85	-	angenommen
Volumenstrom Pumpe	\dot{V}_p	4,58	l/min	

Tabelle 3-8 Volumenstrom Hydraulikpumpe

Die Berechnung - Gleichung 3-18 - liefert einen Volumenstrom von 4,58 l/min.

3.3.1.2.4. Pumpenantriebsleistung

Setzt man den Hydraulikdruck p und den Pumpenvolumenstrom \dot{V}_p in die Gleichung 3-19 ein, so kann die Antriebsleistung P ermittelt werden. Der Hydraulikdruck wurde mittels Druckmanometer, welches an der Vorversuchsanlage installiert wurde, abgelesen. Der Pumpenvolumenstrom wird in Kapitel 3.3.1.2.3 bestimmt.

$$P = \frac{p * \dot{V}_p}{600 * \eta_{Pm}} \quad \text{Gleichung 3-19}$$

vgl. (Tschätsch, 1997, S. 265)

P	...	Antriebsleistung	kW
p	...	Hydraulikdruck	bar
\dot{V}_p	...	Volumenstrom der Pumpe	l/min
η_{Pm}	...	mechanischer Wirkungsgrad der Pumpe	-

Beschreibung		Einheit		
Volumenstrom der Pumpe	\dot{V}_p	4,58	l/min	
Hydraulikdruck	p	180	bar	
mechanischer Wirkungsgrad der Pumpe	η_{Pm}	0,85	-	angenommen
Antriebsleistung	P	1,62	kW	

Tabelle 3-9 Antriebsleistung Pumpe

Die theoretische Leistungsberechnung ergibt 1,62 kW. Zum Vergleich wurde die Leistung auch mittels Netz- und Stromversorgungsanalysator Fluke 434 gemessen und es ergaben sich 1,60 kW. Somit kann von einer sehr guten Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messwert gesprochen werden.

3.3.2. Matrize

Die Matrize – Abbildung 3-16 – kann in 3 Bereiche unterteilt werden. Durch den Bereich {1}, den ersten 25 mm, gelangt das Aufgabegut in die Matrize. Hier weist die Matrize auch den größten Durchmesser auf, um möglichst viel Hackgut in die Matrize zu fördern und ein „Schaben“ durch die Schneidvorrichtung an der Matrize zu verhindern.

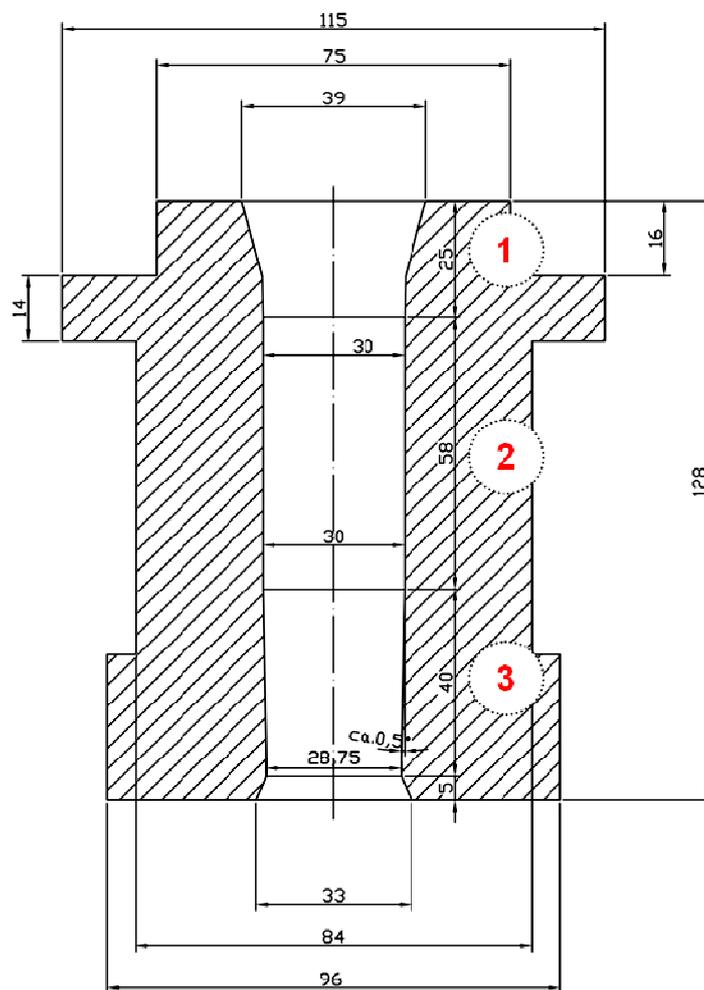


Abbildung 3-16 Matrize

Durch die Durchmesserverjüngung von 39 mm auf 30 mm wird hier schon eine Kompaktierung vorgenommen. Im Bereich {2} wird die Vorkompaktierung auf eine Länge von 58 mm durchgeführt, daher verbleibt der Durchmesser konstant bei 30 mm. Anschließend wird im Bereich {3} das Gut durch die Durchmesserverjüngung auf 28,75 mm und in eine Länge von 40 mm komprimiert und erreicht in diesem Bereich die hohe Dichte.

3.3.3. Schneidvorrichtung

Die Schneidvorrichtung - Abbildung 3-17 - hat die Aufgabe, das Gut durch die Matrize zu pressen. Durch die große Matrizenöffnung von 39 mm - wird das Aufgabegut beim Eintritt in die Matrize gepresst und nicht wie erwünscht geschnitten.

Eine Schneidwirkung würde erzielt werden, wenn der Matrizenöffnungsdurchmesser nur geringfügig größer ist, als der Durchmesser der Schneidvorrichtung. Dieser geringe Unterschied bringt die Gefahr mit sich, dass die Schneidvorrichtung beim Eintritt in die Matrize an dieser schabt und dadurch die Zerstörung von Matrize und Schneidvorrichtung zur Folge hat. Ein Schneiden würde den Energieeintrag senken und das Aufgabegut würde zerkleinert werden. Bei den Vorversuchen wurde keine Schneidwirkung erzielt, da der Schneidvorrichtungsdurchmesser 29,7 mm viel kleiner als der Durchmesser der Matrizenöffnung mit 39 mm war.

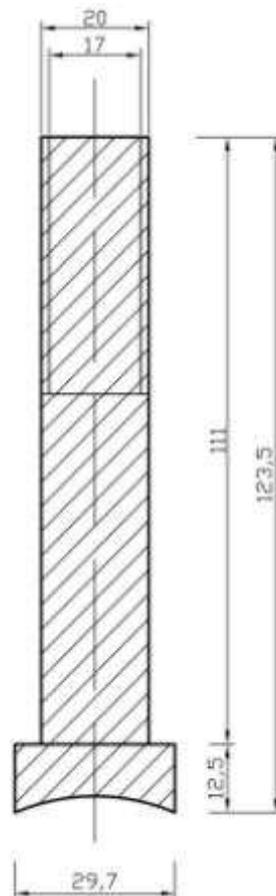


Abbildung 3-17 Schneidvorrichtung

3.3.4. Messtechnik

Wie bereits in der Einleitung zu den Vorversuchen - Kapitel 3 - kurz beschrieben wird, soll mit Hilfe der gefundenen Ergebnisse ein Prototyp gefertigt werden. Dazu ist es nötig, einige Daten zu erfassen.

Es wird die Presskraft des Hydraulikzylinders, der Druckluftabfall über den Pressling und die Leistungsaufnahme des Aggregates bestimmt. Für die Ermittlung der Presskraft, dient ein Kraftaufnehmer der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik - Abbildung 3-18. Das erhaltene Signal wird mit einem Messumformer (Firma: Hottinger Baldwin Messtechnik, Marke: MGC plus) erfasst und zur weiteren Verwendung in den PC eingelesen - Abbildung 3-19¹.



Abbildung 3-18 Kraftaufnehmer



Abbildung 3-19 Messumformer

Um eine Aussage über die Dichtheit der Presslinge machen zu können, wird ein Druckmessumformer installiert. Damit soll aufgezeichnet werden, wie lange der Pressling einen Druck von 5 bar halten kann. Die Daten des Druckmessumformer - Abbildung 3-20² - der Firma Hirschmann HCA 4445-B-060-000 werden ebenfalls mit dem gleichen oben genannten Messumformer ausgewertet. Zur Ermittlung der Leistung wird ein Netz- und Stromversorgungsanalysator Fluke 434 verwendet - Abbildung 3-21³.



Abbildung 3-20 Druckmessumformer



Abbildung 3-21 Netz- und Stromversorgungsanalysator - Fluke 434

¹ www.hbm.com

² www.hirschmann-ac.com

³ www.myflukestore.com

3.4. Ergebnisse Vorversuche

3.4.1. Versuchsprogramm zur Ermittlung der Einflussparameter

Die Eigenschaften der herzustellenden Hackgutbriketts werden durch material- und verfahrensabhängige Größen beeinflusst - Abbildung 3-22 - wobei die äußere Presskraft den ausschlaggebenden Einfluss ausmacht.



Abbildung 3-22 Einflussgrößen auf den Kompaktierprozess

In der Tabelle 3-10 sind die materialabhängigen und verfahrensabhängigen Einflussgrößen aufgelistet.

Materialabhängige Einflussgrößen:

- Aufgabematerial / Gutart
- Materialgröße
- Wasseranteil
- Hilfs- / Zusatzstoffe

Verfahrensabhängige Einflussgrößen:

- Verfahrensmethode
- Presskraft
- Haltezeit der Kraft
- Anzahl der Verdichtungen
- Temperatur
- Matrizengeometrie

Tabelle 3-10 Einflussgrößen auf den Kompaktierprozess

Diese Vielzahl an Einflussgrößen auf den Kompaktiervorgang fordern experimentelle Untersuchungen. Bei der Verwendung von „natürlichen Rohstoffen“ als Verarbeitungsgut, ist die rein theoretische Herleitung einer Verdichtungsgleichung nur wenig sinnvoll.

Zur Bestimmung des Verdichtungsverhaltens werden die Zusammenhänge von Presskraft, Pressweg und die Dichte der Briketts experimentell ermittelt.

Es werden einige Bedingungen festgelegt um das Verdichtungsverhalten charakterisieren zu können:

- Die Kraft wirkt senkrecht und wird mit einem Hydraulikzylinder aufgebracht.
- Der Werkzeugquerschnitt ist rund, damit ein Ausweichen des Hackgutes nicht möglich und die Form der Pellets vorgegeben ist.

- Der Kompaktierprozess erfolgt bei Umgebungstemperatur. Die Temperaturerhöhung in der Matrize ist auf die Reibung zwischen Hackgut und Matrizeninnenwand zurückzuführen.
- Es wird kein Bindemittel und auch kein Hilfsstoff zugegeben.
- Die Experimente umfassen das Druck-Weg-Verhalten und das Druck-Dichte-Verhalten.

3.4.2. Aufgabegut - Biomasse Hackgut

Um Holzhackgüter in Klassen einzuteilen, verwendet man den Wassergehalt (w) und Größenklassen z.B. G30/30. Der Wassergehalt (w) gibt den Anteil Wasser an, der im Brennstoff enthalten ist. Der Wassergehalt wird in Prozent angegeben und bezieht sich auf die Masse des wasserhaltigen Brennstoffes. Die zweite Größe, die den Wasseranteil wiedergibt, ist die Holzfeuchte (u). Sie wird ebenfalls in Prozent angegeben, jedoch bezogen



Abbildung 3-23 Wassergehaltbestimmung

auf die Masse des wasserfreien Holzes. Der Wassergehalt variiert sehr stark in Abhängigkeit vom Trocknungszustand des Holzhackgutes. Luftgetrocknetes Gut weist einen Wassergehalt von ca. 20% auf, wobei bei erntefrischen Hackgütern der Wassergehalt auf 40-50% ansteigt. Die Feuchtebestimmung - Abbildung 3-23 - wurde nach der Norm CEN/TS 14774-2 durchgeführt.

Eine andere Möglichkeit Holzhackgut zu unterscheiden, ist die Größe des Hackgutes. Im Handel findet man Holzhackgut G30, Holzhackgut G50 und Holzhackgut G100. Holzhackgut G30 ist ein Feinhackgut mit einer Nennlänge von 30 mm. G50 ist die Klasse des Mittelhackgutes mit der Nennlänge von 50 mm. Auch sehr grobes Hackgut - mit Nennlängen von über 100 mm - wird angeboten.

3.4.3. Pressversuche mit unterschiedlichem Holzhackgut

Es wurde versucht, einen Zusammenhang für die Gutgröße, Gutdichte, Gutfeuchte und Presskraft zu finden und diese in einem Diagramm darzustellen. Die Untersuchungen wurden an der Vorversuchsanlage durchgeführt.

Als Aufgabematerial wurde Hackgut G30 mit unterschiedlichem Wassergehalt verwendet, siehe Abbildung 3-24.

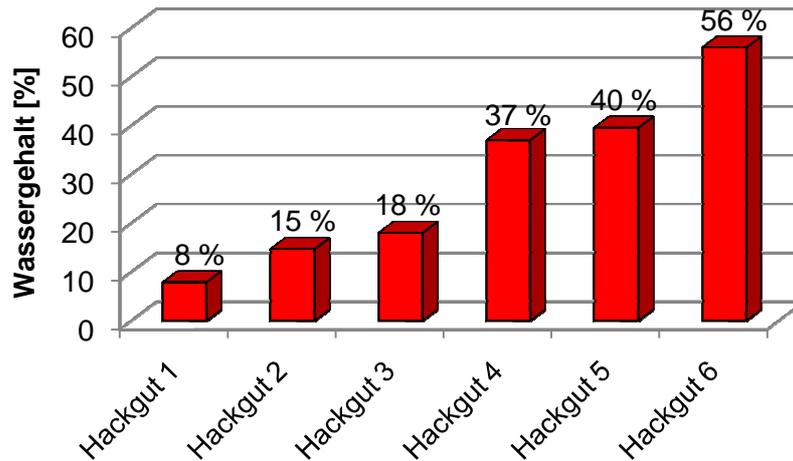


Abbildung 3-24 Verwendete Holzhackgut – Wassergehälter

3.4.4. Ergebnisse

3.4.4.1. Kompaktierungsversuche

Bei den ersten Versuchen wurde keine Kraft oder Energie gemessen, sondern nur das Pressverhalten von Hackgut untersucht. Die unterschiedlichen Biomassefraktionen wurden der Presse zugeführt, um die Brikettbildung zu beobachten. Das trockene Hackgut, mit einem Wassergehalt von 8% bildete bei einer Eintauchtiefe¹ von 85 mm sehr kompakte und feste Briketts - Abbildung 3-25. Bei geringeren Eintauchtiefen in die Matrize bestand jedoch Verstopfungsgefahr. Aufgrund der großen Reibung zwischen Matrizeninnenwand und Hackgut war die Hydraulikanlage nicht in der Lage, das Aufgabegut durch die Matrize zu pressen.



Abbildung 3-25 Brikett
w = 8%



Abbildung 3-26 Brikett
w = 15%



Abbildung 3-27 Brikett
w = 18%

Bei den Versuchen, mit Wassergehältern von 15 % - Abbildung 3-26 - fiel auf, dass die Eintauchtiefe auf 80 mm verringert werden konnte.

¹ Die Eintauchtiefe beschreibt wie weit die Schneidvorrichtung in die Matrize einfährt.

Durch das Pressen, wird das Hackgut mechanisch entwässert. Dies hat die Vorteile, dass der Heizwert angehoben wird und die Reibung zwischen Hackgut und Matrizeninnenwand gesenkt wird. Bei weiterer Steigerung des Wassergehaltes über 20% wurde beobachtet, dass keine Briketts - Abbildung 3-27 - mehr gebildet werden. Sofort nach dem Austritt aus der Matrize quoll das Hackgut rasch auf - Abbildung 3-28.



Abbildung 3-28 Pressversuche mit Hackgut $w = 56\%$

3.4.4.2. Förderversuche von Briketts

Es soll untersucht werden, ob es möglich ist die Hackgutbriketts durch ein Rohr zu fördern - Abbildung 3-29. Die Anlagenteile werden in Tabelle 3-11 beschrieben. Als Aufgabegut für diese Versuche diente trockenes Hackgut, $w = 8\%$. Das Förderrohr hatte einen Innendurchmesser von 35,9 mm, eine Länge von 2 m und einen Biegeradius von 20 cm. Es konnten durch das Rohr keine Briketts gefördert werden, weil es genau am Scheitel des Rohrs zu einer Verstopfung kam. Der geringe Biegeradius führte zu einer erhöhten Reibungskraft und somit zum Verstopfen des Systems. Die Briketts konnten der Richtungsänderung nicht folgen und verstopften das Rohr. Um die Brikettförderung zu ermöglichen, sollte der Radius auf mindestens 50 cm erhöht werden.



suchsanlage

Beschreibung	
1	Matrize
2	Übergang Matrize - Förderrohr
3	Förderrohr mit 180° Richtungsänderung

Tabelle 3-11 Beschreibung *Förderungsversuchsanlage*

3.4.4.3. „Presskraft-Weg“ – Verhalten

In Abbildung 3-30 wurde das „Presskraft-Weg“ – Verhalten für Hackgut mit einem Wassergehalt von 18 % dargestellt. Es sind die verschiedenen Stufen bzw. Abschnitte sehr gut erkennbar. Der erste Abschnitt stellt das Füllen der Matrize, gefolgt vom Vorverdichten und dem abschließenden „Hochverdichten“ dar. Die ersten Abschnitte, Füllen und Vorverdichten nehmen den meisten Weg in Anspruch. Der Kraftanstieg geht nur sehr langsam und kontinuierlich vor sich und weist ein Maximum im dritten Abschnitt auf. Nach dem Hochverdichten wird die Schneidvorrichtung aus der Matrize bewegt und die Kraft sinkt rasch auf null ab.

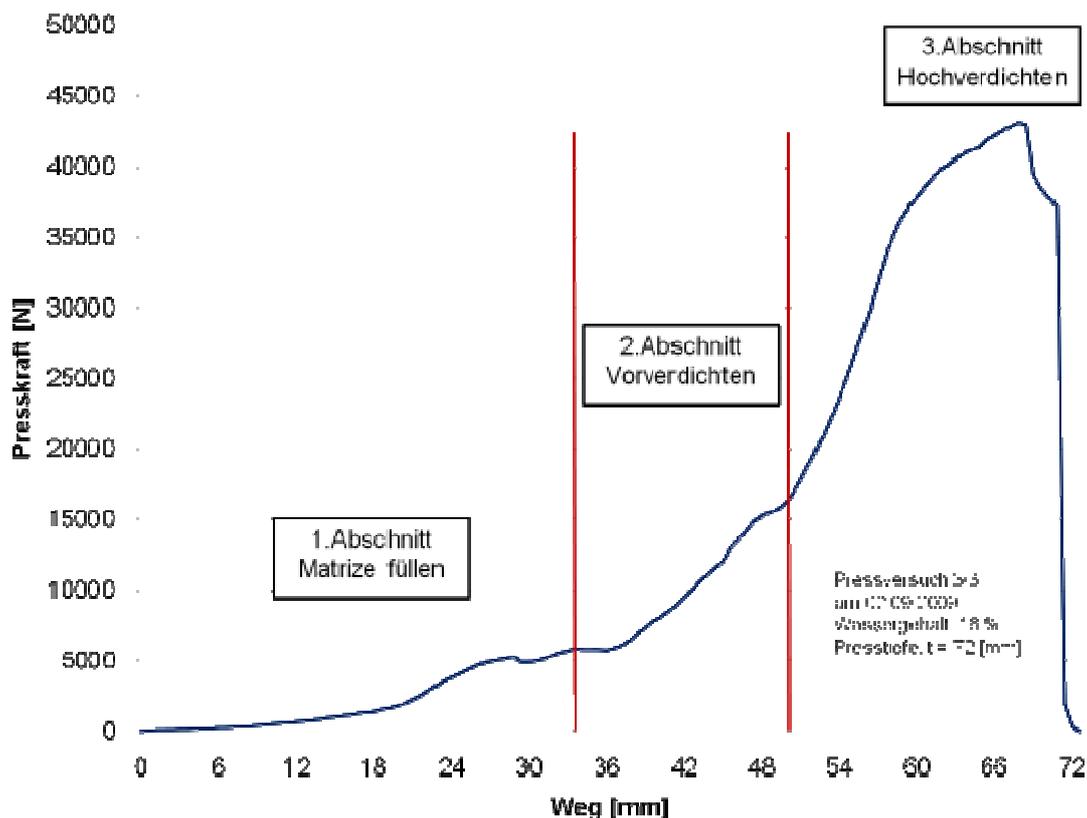


Abbildung 3-30 Presskraft-Weg – Verhalten 1 (w = 18% und t = 72 mm)

Folgendes Presskraft-Weg - Verhalten - Abbildung 3-31 - wurde mit einer Hackgutfeuchte von 15% und einer Presstiefe von t=72 mm durchgeführt. Auffällig in Abbildung 3-31 ist, die konstante Presskraft – rote Markierung – im Abschnitt der Hochverdichtung. Dieser 3. Abschnitt beginnt bei einer Presstiefe von rund 63 mm.

Dies deutete drauf hin, dass die maximale Presskraft erreicht wurde und der Kompaktiervorgang abgebrochen werden musste, um die Matrize wieder von dem Hackgut zu befreien. Wie bereits in Abschnitt 3.4.4.1 Kompaktierversuche erwähnt wurde, ist die benötigte Presskraft umso höher, je trockener das Hackgut ist. Je geringer die Presstiefe ist, desto größer wird die Reibung zwischen Hackgut und Matrizeninnenwand und damit die erforderliche Presskraft sind.

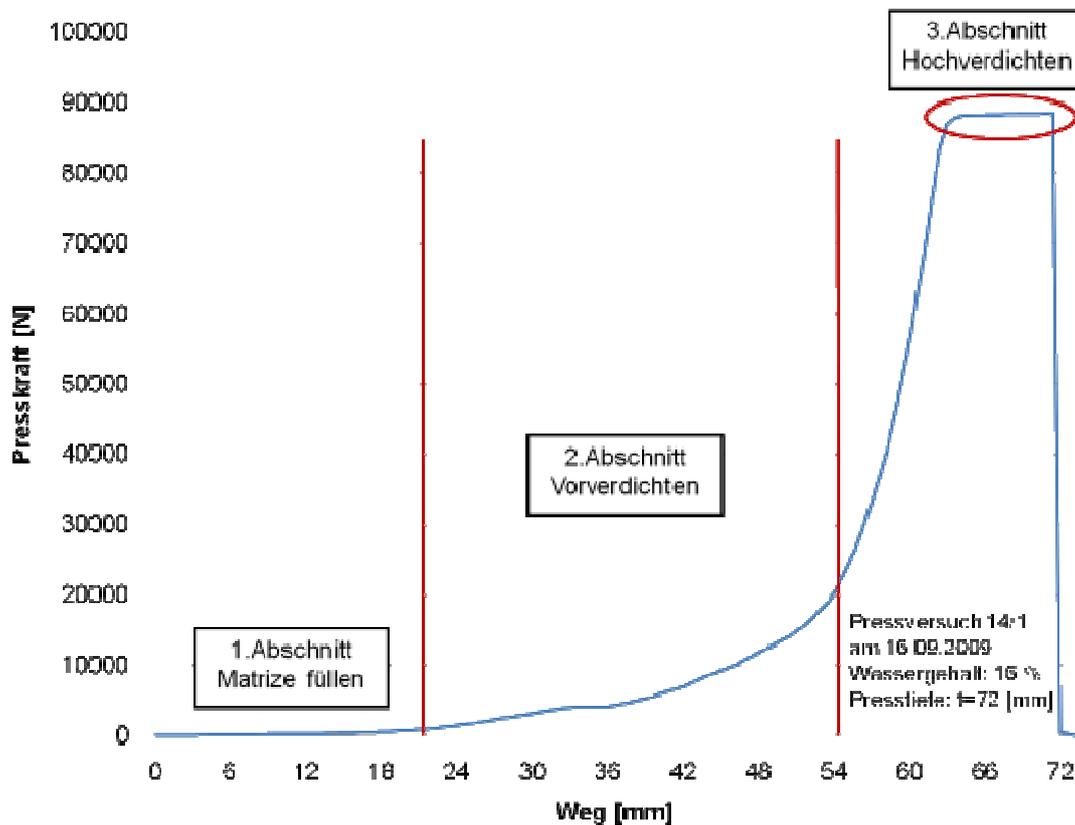


Abbildung 3-31 Presskraft-Weg – Verhalten 2 (w=15% und t=72 mm)

3.4.4.4. Presskraft-Dichte – Verhalten

Der gesamte Pressvorgang läuft innerhalb weniger Sekunden ab. Dadurch ist es schwierig, die Dichte genau einer Presskraft zuzuordnen. Mittels Kraftaufnehmer wird die Presskraft aufgezeichnet. Nach dem Auswerfen der Briketts wird dessen Masse, Länge und Durchmesser bestimmt. Mit den gemessenen Werten kann mit Hilfe der Gleichung 3-20 die Brikettdichte bestimmt werden.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Gleichung 3-20

ρ	...	Dichte	[kg/m ³]
m	...	Masse	[kg]
V	...	Volumen	[m ³]

In der Tabelle 3-12 sind die Messergebnisse für Hackgut mit einem Wassergehalt von 15% und einer Presstiefe von 72 mm dargestellt:

Pressvorgang	Kraft N	Briketthöhe mm	Volumen m ³	Brikettmasse g	Dichte kg/m ³
1	0				
2	11724				
3	9995				
4	14109				
5	14842				
6	20733				
7	23471	35	2,47E-05	8,69	351,25
8	36774	39	2,76E-05	15,24	552,83
9	46164	55	3,89E-05	24,36	626,59
10	42829	100	7,10E-05	56,56	800,16
11	32580	55	3,89E-05	27,40	704,78
12	88483	12	8,48E-06	4,50	530,52
13	88958	42	2,97E-05	28,02	943,81

Tabelle 3-12 Messergebnisse Kraft - Dichte - Verhalten ($w = 15\%$ und $t = 72$ mm)

In der folgenden Abbildung 3-32 sind die Werte in einem Diagramm zusammengefasst:

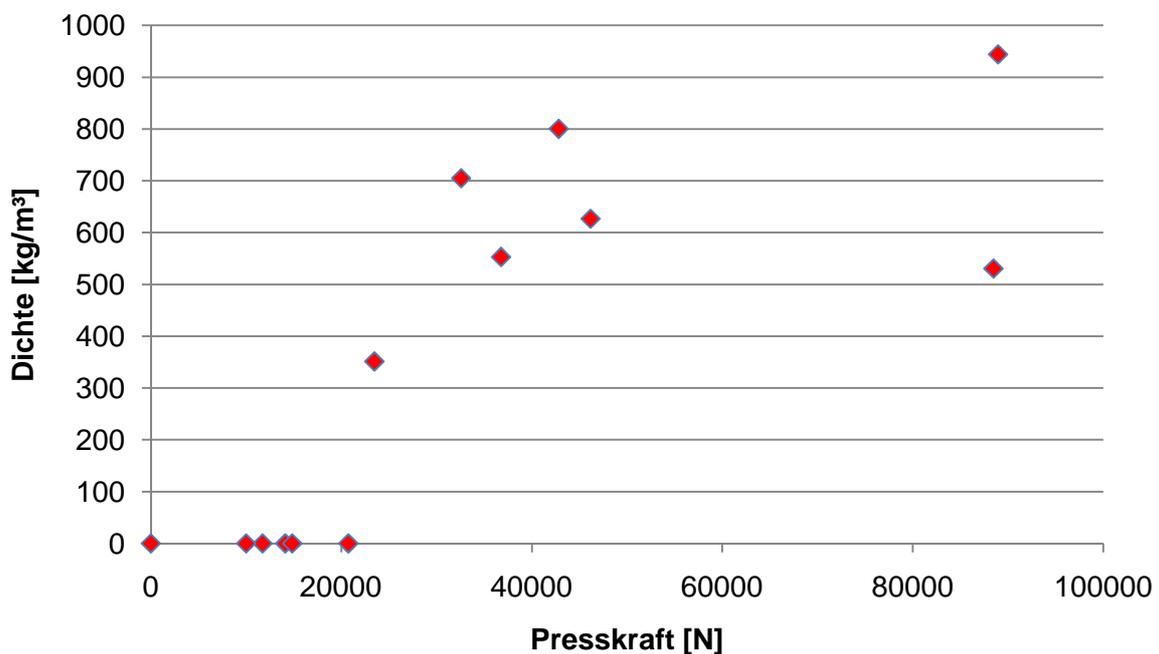


Abbildung 3-32 Kraft - Dichte - Verhalten ($w=14,71\%$ und $t=72$ mm)

Bei den ersten sieben Pressvorgängen konnte keine Kompaktierung, sondern nur eine Hackgutförderung beobachtet werden. Daher beginnt die Dichtebestimmung erst ab dem 7. Pressvorgang.

Wie man dem Diagramm - Abbildung 3-32 - entnehmen kann, steigt die Dichte erst nach einigen Pressvorgängen. Aufgrund der kompakten Briketts in der Matrize entsteht ein Gegendruck, welcher auf die Reibung zwischen Matrize und Hackgut zurück zu führen ist.

Wie dem Diagramm - Abbildung 3-32 - weiters zu entnehmen ist, schwankt die Dichte stark. Es wurde nicht immer die gleiche Menge Hackgut von der Schneidvorrichtung in die Matrize gedrückt, daher kommt die Dichtestreuung zu Stande.

3.4.4.5. Versuch Druckdichtheit der Briketts

Mit Hilfe der Kompaktieranlage soll ein Brikett erzeugt werden der als Stoppel dient, um eine druckdichte Trennung zwischen den unter Druck stehenden Reformer und dem Hackgutlager



herzustellen. Man würde sich dadurch eine aufwendige Druckschleuse für die Brennstoffeinbringung ersparen. Um die Druckdichtheit überprüfen zu können, wurde an der Unterseite der Matrize ein druckdichtes Rohr angeschraubt, das mit Druckluft von 5 bar beaufschlagt wurde - Abbildung 3-33.

Abbildung 3-33 Versuchsaufbau Druckdichtheit

Die Auswertung des Druckmessumformers - Abbildung 3-34 - zeigt, dass der Druck mit der Zeit abfällt und nach 14 Minuten nur mehr rund 3 bar beträgt. Eine absolute Abdichtung ist daher nicht gegeben.

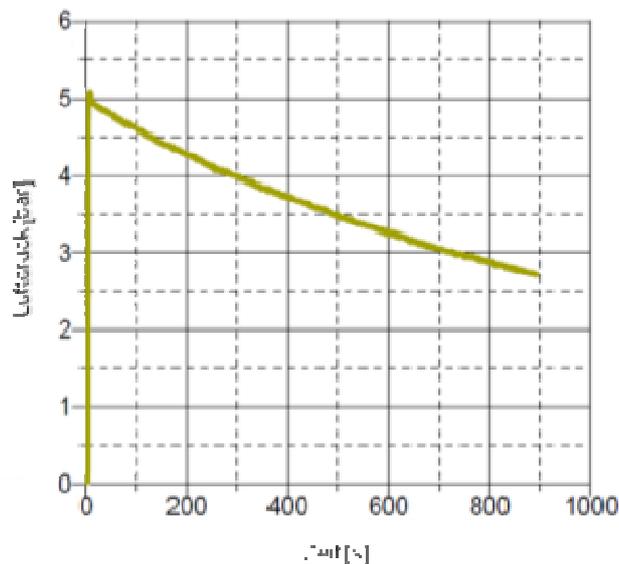


Abbildung 3-34 Druckabfall

Für den konventionellen Einsatz muss sichergestellt werden, dass kein Gas zurück ins Brennstofflager strömt. Man muss daher weitere Schutzmechanismen wie Druckbeaufschlagung mit Inertgas in die Kompaktieranlage einbauen, um jederzeit einen gasdichten Abschluss gewährleisten zu können.

3.4.4.6. Leistungsaufnahme Vorversuchsanlage

Die mechanische Leistung wird mit der Gleichung 3-21 bestimmt.

$$P_{\text{mech}} = F \cdot v_A$$

Gleichung 3-21

v_A	...	Ausfahrgeschwindigkeit	m/s
F	...	Kraft	N
P_{mech}	...	mechanische Leistung	W

In Abbildung 3-35 ist ein Vergleich der elektrischen Spitzenleistung, der elektrischen Dauerleistung und der mechanischen Leistung dargestellt. Ein wichtiger Punkt der Anlagenplanung ist der Energieeinsatz, der möglichst gering gehalten werden soll. In Abbildung 3-35 ist die elektrische Dauerleistung mit der waagrechten Linie dargestellt und wird für die 3 Abschnitte Füllen der Matrize, Vorverdichten und Hochverdichten benötigt.

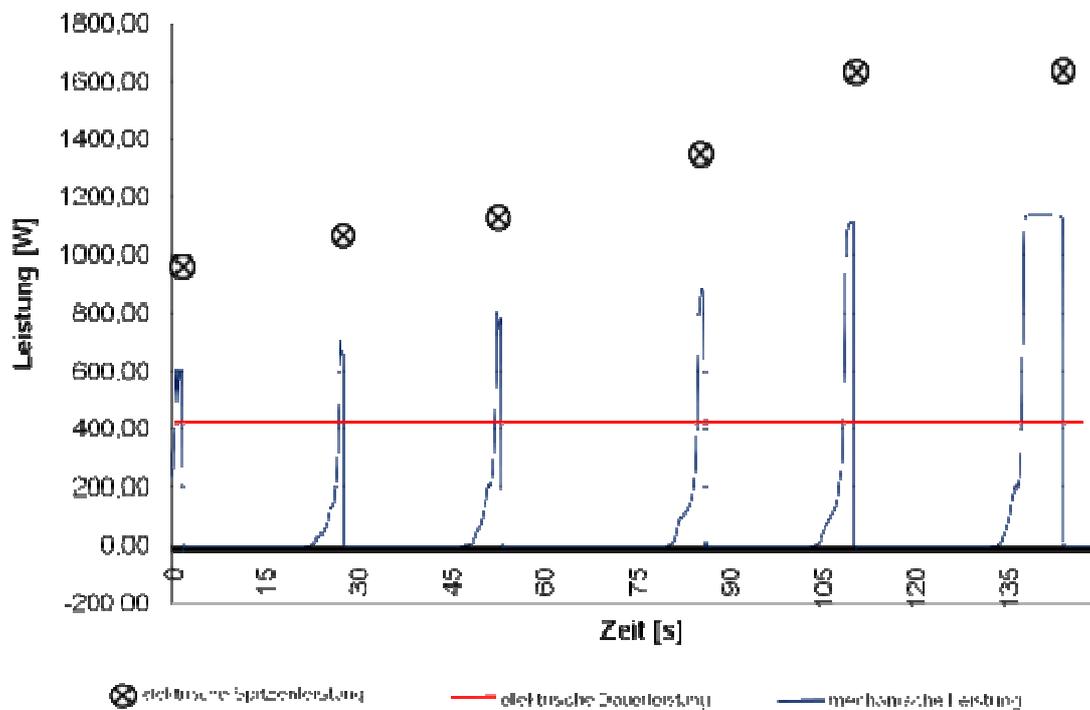


Abbildung 3-35 Leistung Vorversuchsanlage

Die Punkte – elektrische Spitzenleistung – zeigen den Energieverbrauch beim Hochverdichten. Diese Spitzen dauern nur einen Bruchteil einer Sekunde und wirken sich daher nur geringfügig auf die Dauerleistung aus. Die mechanische Leistung stellt den Nutzen der Anlage dar. Die Spitzen zeigen den Teil des Hochverdichtens und dauern ebenfalls nur einen Bruchteil einer Sekunde im Vergleich zu den beiden anderen Abschnitten.

Es ist also sehr wichtig, die Spitzen zu senken und die Leerlaufleistung des Hydraulikaggregates so gering wie möglich zu halten.

3.5. Fazit Vorversuche

In Kapitel 3 wurde auf die Kompaktiermechanismen eingegangen. Es werden die verschiedenen Hydraulikaggregate vorgestellt und auch erklärt warum Zahnradpumpen für einen Einsatz in Kompaktieranlagen optimal geeignet sind.

Vorversuche wurden durchgeführt, um material- und verfahrensabhängige Einflussfaktoren auf den Kompaktierprozess abstimmen zu können. Die Kompaktierversuche haben gezeigt, dass mit Hackgut über 20% Wassergehalt keine kompakten Briketts erzeugt werden können. Trockenes Hackgut ist nur schwer durch die Matrize zu drücken und die Verstopfungsgefahr ist wesentlich höher als bei feuchtem Hackgut. Eine Biomasseförderung durch Rohre könnte realisiert werden, jedoch muss der Biegeradius mindestens 50 cm betragen und die Presskraft erhöht werden.

Der Druckabschluss, der durch die kompakten Briketts in der Matrize gewünscht wird, ist nur zum Teil vorhanden. Der Brikettstoppel wurde mit einem Druck von 5 bar beaufschlagt, nach 14 Minuten sank der Druck auf 3 bar ab. Eine absolute Druckdichtheit ist daher nicht gegeben und für den Einsatz bei realen Anlagen müssen zusätzliche Maßnahmen gesetzt werden, um einen Gasaustritt verhindern zu können.

Mit der gewählten Matrizengeometrie - Abbildung 3-16 - konnte eine Kompaktierung durchgeführt werden. Die Matrize der Vorversuche kann daher auch beim Prototyp eingesetzt werden.

In der folgenden Tabelle 3-13 sind die wichtigsten Daten der Hydraulikanlage dargestellt:

Vorversuchsstand		
Kolbeninnendurchmesser	d	80 mm
Hydraulikdruck	p	180 bar
Ausfahrgeschwindigkeit	v_A	0,0129 m/s
Einfahrgeschwindigkeit	v_E	0,0159 m/s
maximale Presskraft	F	90478 N
maximaler Zylinderhub	H	260 mm
maximale mechanische Leistung	P_{mech}	1,69 kW

Tabelle 3-13 Hydraulikdaten - Vorversuche

Mit den ermittelten Daten der Vorversuche kann die Planung des Prototyps – Kapitel 4 – nun durchgeführt werden.

Prototyp

Ziel der Verfahrensentwicklung ist es, einen Brennstoff in Schüttgutform durch eine Hydraulikpresse in eine kompakte Form zu bringen, um damit einen gasdichten Abschluss erzeugen zu können. Neben dem gasdichten Abschluss soll auch eine Brennstoffförderung möglich gemacht werden.

4.1. Randbedingungen

Bei der Planung der Kompaktieranlage müssen einige Bedingungen berücksichtigt werden:

1. Das Ausgangsmaterial für die Brikettherstellung ist Holzhackgut, welches ohne Zugabe von Bindemittel verpresst werden soll.
2. Für das Verfahren ist ein möglichst kontinuierliches und wartungsarmes Arbeitsprinzip zu wählen.
3. Der Energieeinsatz soll niedrig gehalten werden.
4. Der Prototyp soll Biomasse für einen 500 kW Heatpipe-Reformer fördern können.
5. Ein gasdichter Abschluss soll erzeugt werden.

4.2. Konzept Prototyp

Für die Erzeugung kompakter Biomassebriketts müssen 6 Schritte durchlaufen werden. Im ersten Schritt wird die Biomasse der Anlage zugeführt, der zweite Schritt beinhaltet die Kompaktiervorbereitung. Danach wird die Biomasse geschnitten und in der Matrice vorverdichtet. Die vorverdichtete Biomasse wird anschließend hochverdichtet und erreicht dadurch die geforderte hohe Kompaktheit. Abschließend werden die Briketts ausgeworfen womit der Schritt 1 wieder beginnt- Abbildung 4-1.

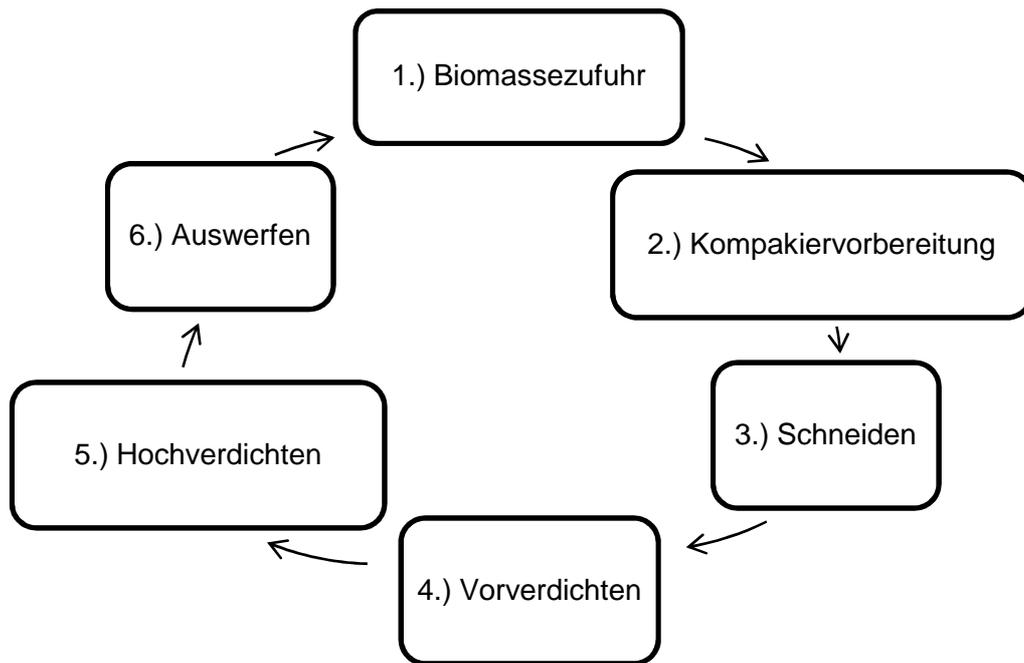


Abbildung 4-1 Konzept Prototyp

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte genauer erklärt:

1.) Biomassezufuhr

Die Biomassezufuhr soll kontinuierlich erfolgen. Eine denkbare Möglichkeit dafür wäre eine Förderschnecke – detaillierte Versuche hierzu wurden allerdings nicht durchgeführt. Für die ersten Versuche wurde keine Förderschnecke installiert. Das Förderrohr wurde diskontinuierlich mit Hackgut gefüllt, dabei wurde immer genügend Hackgut zugeführt, um ein Leerlaufen der Schneide zu vermeiden.

2.) Kompaktiervorbereitung

Um eine kontinuierliche Förderung realisieren zu können, muss die Matrize immer mit Hackgut gefüllt sein. Daher ist es sehr wichtig, dass die Schneide immer Hackgut nach vorne fördert und die Matrize damit füllt. Man könnte das Hackgut bereits im Förderrohr leicht vorkompaktieren und damit die Förderleistung zu erhöhen.

3.) Schneiden

Das Hackgut wird beim Eintreten in die Matrize mit Hilfe von Schneidringen zerkleinert. Dadurch soll der Energieeinsatz gesenkt werden.

4.) Vorverdichten

Ist die Matrize mit Hackgut gefüllt, so beginnt bereits kurz nach dem Eintreten der Schneide der Kompaktiervorgang. Das Gut wird vorverdichtet und anschließend hochverdichtet.

5.) Hochverdichten

Der nächste Schritt der Kompaktierung ist die Hochverdichtung. Dabei wird das Hackgut zu einem festen Brikett verdichtet. Die Hauptkräfte zur Verdichtung wirken vorwiegend axial. Die spezifischen Eigenschaften des Hackgutes, die auftretende Wandreibung in der Matrize und die mechanische Belastung der Schneidvorrichtung setzen dem Matrizendurchmesser nach unten hin Grenzen.

6.) Auswerfen

Dem Schritt der Hochverdichtung folgt das Auswerfen der kompakten Briketts.

Diese sechs Schritte sind notwendig, um einen Kompaktiererfolg erzielen zu können, sie wurden auch bei der Planung der Anlage berücksichtigt, daraus ergibt sich der schematische Aufbau des Prototyps - Abbildung 4-2.

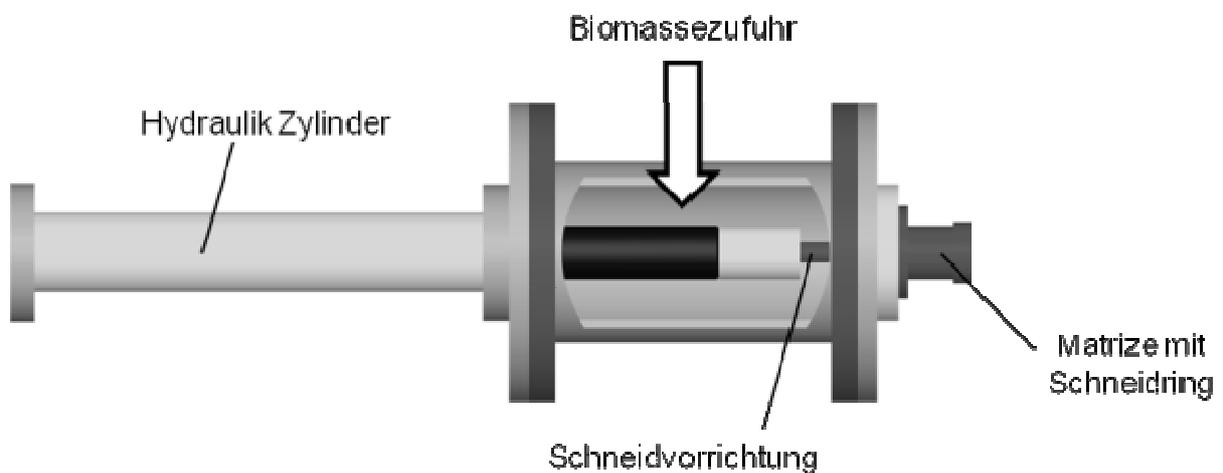


Abbildung 4-2 schematischer Aufbau des Prototyps

4.3. Der Prototyp

Bei der Planung des Prototypen wurde auf die Randbedingungen - welche unter Kapitel 4.1 zu finden sind - eingegangen. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der Vorversuche für die Auslegung herangezogen.

4.3.1. Bestimmung des Hackgutstromes

Der Prototyp soll einen 500 kW allothermen Vergaser mit Brennstoff versorgen. Um die Versorgung gewährleisten zu können, muss ein bestimmter Strom an Biomasse zugeführt werden. Der Massenstrom ist vom Heizwert der Biomasse abhängig.

Der Heizwert wird von folgenden Größen beeinflusst:

- ✓ Feuchte des Hackgutes
- ✓ Dichte der Briketts
- ✓ Hackgutart

Mit Hilfe der Gleichung 4-1 kann der Heizwert bestimmt werden:

$$H_u = H_o * \left(1 - \frac{M_{ar}}{100}\right) - 2,5 * \frac{M_{ar}}{100} - \frac{h}{200} * 18 * 2,5 * \left(1 - \frac{M_{ar}}{100}\right) \quad \text{Gleichung 4-1}$$

H_u	...	Heizwert	$\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg FS}}\right]$
H_o	...	Brennwert	$\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg TS}}\right]$
w	...	Wassergehalt des Brennstoffes	[Gew% d. FS]
h	...	Wasserstoffgehalt des Brennstoffes	[Gew% d. TS]
ρ	...	Dichte der Briketts	[kg/m ³]

vgl.(Oberberger, 1997, S. 22)

Mit den bekannten Werten - vgl.

Tabelle 4-1 - für Wassergehalt, Dichte, Brennwert und dem Wasserstoffgehalt des Brennstoffes kann der Heizwert bestimmt werden. Der Wassergehalt wurde angenommen und die Dichte der Briketts aus den Vorversuchen ermittelt. Die Werte für Brennwert und Wasserstoffgehalt des Brennstoffes wurden aus der Literatur entnommen.

Beschreibung			Einheit	
Wassergehalt	M_{ar}	20,00	Gew% d. FS	
Dichte der Briketts	ρ	800,00	kg FS / m ³	
Brennwert	H_o	20,00	MJ / kg TS	
Wasserstoffgehalt des Brennstoffes	h	6,00	Gew% d. TS	
Heizwert	H_u	14,42	MJ/kg FS	Gleichung 4-1
Heizwert	H_u	4,01	kWh/kg FS	Gleichung 4-2
Heizwert	H_u	11536,00	MJ/m ³ FS	Gleichung 4-3
Heizwert	H_u	3204,44	kWh/m ³ FS	Gleichung 4-4

vgl. (Oberberger, 1997, S. 22)

Tabelle 4-1 Heizwert

Mit Gleichung 4-2, Gleichung 4-3 oder Gleichung 4-4 kann der Heizwert auf die entsprechenden Einheit umgerechnet werden.

$$H_u \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg FS}} \right] = \frac{H_u \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg FS}} \right] * 1000}{3600} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

$$H_u \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \text{FS}} \right] = H_u \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg FS}} \right] * \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 1000 \quad \text{Gleichung 4-3}$$

$$H_u \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{FS}} \right] = H_u \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg FS}} \right] * \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Mit dem nun bekannten Heizwert und der Reformierleistung kann der Biomassevolumenstrom mit Hilfe der Gleichung 4-5 berechnet werden.

$$\dot{V}_{\text{Hack}_{500\text{kW}}} = \frac{P_K}{H_u} \quad \text{Gleichung 4-5}$$

$\dot{V}_{\text{Hack}_{500\text{kW}}}$...	Hackgutvolumenstrom	m ³ /h
P_K	...	Reformierleistung	kW
H_u	...	Heizwert	kWh/m ³ FS

Beschreibung		Einheit	
Reformierleistung	P_K	500	kW
Heizwert	H_u	3204,44	kWh/m ³ FS
Hackgutvolumenstrom	$\dot{V}_{\text{Hack}_{500\text{kW}}}$	0,16	m ³ /h

Tabelle 4-2 Werte für die Ermittlung des Biomassevolumenstroms

Um den 500 kW Vergaser betreiben zu können, bräuchte man bei dem vorgegebenen Wassergehalt von 20% und der Dichte der Briketts von 800 kgFS/m³, einen Brikettsvolumenstrom - Gleichung 4-5 - von 0,16 m³/h.

Analog dazu kann auch der Hackgutmassenstrom errechnet werden - Gleichung 4-6:

$$\dot{m}_{\text{Hack}_{500\text{kW}}} = \frac{P_K}{H_u} \quad \text{Gleichung 4-6}$$

$\dot{m}_{\text{Hack}_{500\text{kW}}}$...	Hackgutmassenstrom	kg/m ³
P_K	...	Reformierleistung	kW
H_u	...	Heizwert	kWh/kg FS

Beschreibung		Einheit	
Kesselleistung	P_K	500	kW
Heizwert	H_u	4,01	kWh/m ³ FS
Hackgutvolumenstrom	$\dot{V}_{\text{Hack}_{500\text{kW}}}$	124,83	kg/h

Tabelle 4-3 Werte für die Ermittlung des Massenstroms

Durch den vorgegebenen Wassergehalt von 20% und der Dichte der Briketts von 800 kgFS/m³, benötigt man einen Hackgutstrom von 124,83 kg/h, um den Reformier betreiben zu können - Tabelle 4-3.

4.3.2. Bestimmung des Hackgutstromes der Vorversuchsanlage

Um eine Abschätzung für den Hackgutstrom machen zu können, wurden die Daten der Vorversuchsanlage herangezogen. Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung werden der Querschnitt der Briketts bzw. Matrizendurchmesser und die Vorschubgeschwindigkeit bestimmt. Tabelle 4-4 zeigt, die für die Berechnung benötigten Zahlenwerte.

Durchmesser Brikett	Brikethöhe / Pressvorgang	Ausfahr - Geschwindigkeit	Einfahr- Geschwindigkeit
mm	mm	m/s	m/s
d	h	v_A	v_E
30	10	0,0129	0,0159

Tabelle 4-4 Angaben zur Massenstromermittlung Vorversuchsanlage

Folgende Tabelle 4-5 zeigt die Zylinderweg und die Zeiten der einzelnen Pressabschnitte. Die Zeiten wurden mit der umgeformten Geschwindigkeitsformel $t = \frac{s}{v}$ berechnet. Die Spalte für die Hackgutaufgabe wurde freigelassen, da angenommen werden kann, dass keine Zeit hierfür verloren geht.

Zylinderweg:	Zeit / Pressvorgang ausfahren	Zeit / Pressvorgang einfahren	Zeit für Hackgut Aufgabe	Gesamtzeit 1 Zyklus
mm	s	s	s	s
s	t_A	t_E		t
85	6,58	5,34	-	11,92
78	6,04	4,90	-	10,94
72	5,57	4,52	-	10,10
65	5,03	4,08	-	9,12
55	4,26	3,46	-	7,71

Tabelle 4-5 Zeit für einen Pressvorgang Vorversuchstand

Nun kann der Hackgutvolumenstrom berechnet werden - Gleichung 4-7. Dazu wird das Fördervolumen pro Pressvorgang mit einem Brikettdurchmesser $d = 30$ mm und einer Brikethöhe je Pressvorgang $h = 10$ mm bestimmt.

$$\dot{V} = \frac{V}{t}$$

Gleichung 4-7

V	...	Volumen / Pressvorgang	m^3
t	...	Gesamtzeit – 1 Zyklus	s
\dot{V}	...	Hackgutvolumenstrom	m^3/h

Mit den nun vorhandenen Werten Volumen pro Pressvorgang und Pressvorgänge pro Stunde kann der Hackgutvolumenstrom errechnet werden - Tabelle 4-6.

Presstiefe:	Gesamtzeit 1 Zyklus	Pressvorgänge / Stunde	Volumen / Pressvorgang	Hackgut - Volumenstrom
mm	s	h^{-1}	m^3	m^3/h
s	t		\dot{V}	\dot{V}
85	11,92	302	7,07E-06	0,0021
78	10,94	329	7,07E-06	0,0023
72	10,10	357	7,07E-06	0,0025
65	9,12	395	7,07E-06	0,0028
55	7,71	467	7,07E-06	0,0033

Tabelle 4-6 Biomassevolumenstrom in Abhängigkeit der Presstiefe – Vorversuchstand

Durch die gegebenen Daten vom Vorversuchsaufbau:

- ✓ maximale Ausfahrgeschwindigkeit von 0,0129 m/s
- ✓ Matrizendurchmesser von 30 mm
- ✓ Briketthöhe pro Hub von 10 mm,

ergibt sich ein Volumenstrom von minimal 0,0021 m^3/h und maximal 0,0033 m^3/h .

Man kann erkennen, dass der Hackgutvolumenstrom von der Presstiefe abhängt. Je geringer die Schneidvorrichtung in die Matrize eindringt, desto höher wird der Hackgutstrom. Dieser weicht jedoch von den geforderten 0,16 m^3/h stark ab, was eine Veränderung einiger Systemparameter zur Folge hat.

Folgende Parameter müssen aufeinander abgestimmt werden:

- Matrizendurchmesser
- Briketthöhe / Pressvorgang
- Vorschubgeschwindigkeit
- Presstiefe bzw. Hub des Zylinders

4.3.3. Bestimmung des Biomassestroms mit optimierten Bedingungen

Um den geforderten Hackgutvolumenstrom sicherstellen zu können, wird die Vorschubgeschwindigkeit von 0,0129 m/s auf 0,1 m/s erhöht. Der Matrizendurchmesser wird nach wie vor mit 30 mm in Rechnung gestellt. Um einen höheren Biomassestrom erzielen zu können, wird die Presstiefe in die Matrize erhöht. Dadurch wird pro Pressvorgang eine größere Briketthöhe erreicht.

Tabelle 4-7 zeigt die Angaben für die Biomassestromermittlung:

Ausfahr - Geschwindigkeit	Einfahr- Geschwindigkeit	Brikettdurchmesser
m/s	m/s	mm
v_A	v_E	d_B
0,10	0,10	30

Tabelle 4-7 Angaben zur Biomassestromermittlung – Prototyp

Die Zeiten wurden wieder mit der umgeformten Geschwindigkeitsformel $t = \frac{s}{v}$ berechnet - Tabelle 4-8. Für die Hackgutaufgabe wird keine Zeit in Rechnung gestellt.

Zylinderweg: [mm]	Zeit / Pressvorgang abwärts [s]	Zeit / Pressvorgang aufwärts [s]	Zeit für Hackgut Aufgabe [s]	Gesamtzeit 1 Zyklus [s]
s	t_A	t_E		t
100	1,00	1,00	-	2,00
50	0,50	0,50	-	1,00
20	0,20	0,20	-	0,40

Tabelle 4-8 Zeit für einen Pressvorgang – Prototyp

Mit den bekannten Werten, Brikettdurchmesser $d = 30$ mm und Briketthöhe je Pressvorgang $h = 20$ mm, kann der Hackgutvolumenstrom errechnet werden - Tabelle 4-9:

Zylinderweg: [mm]	Gesamtzeit 1 Zyklus [s]	Pressvorgänge / Stunde	Volumen/ Pressvorgang [m ³]	Volumenstrom für 1 Aufgabe [m ³ /h]
100	2,00	1800	1,41E-05	0,0254
50	1,00	3600	1,41E-05	0,0509
20	0,40	9000	1,41E-05	0,1272

Tabelle 4-9 Biomassevolumenstrom in Abhängigkeit von der Presstiefe – Prototyp

Mit einem Zylinderweg – das ist der Weg durch den Vorratsbehälter bis zum Wenden des Zylinders – von 20 mm kann ein Hackgutvolumenstrom von 0,13 m³/h erreicht werden. Gefordert sind jedoch 0,16 m³/h. Um diesen Wert zu erreichen, könnten verschiedene Systemparameter geändert werden. Eine Variante wäre, den Matrizendurchmesser auf 50 mm zu erhöhen oder es würde gelingen, die Briketthöhe pro Pressvorgang weiter zu steigern. Zu beobachten ist, dass durch den kurzen Zylinderweg viele Pressvorgänge pro Stunde geschafft werden, jedoch die Briketthöhe dadurch zurück geht. Dabei ist zu erwähnen, dass ein Zusammenhang zwischen Zylinderweg und Briketthöhe besteht. Je länger der Zylinderweg ist, desto höher ist auch die Briketthöhe. Begründet wird dies mit dem Dichteunterschied zwischen der Schüttdichte des Hackgutes und der Dichte der Briketts.

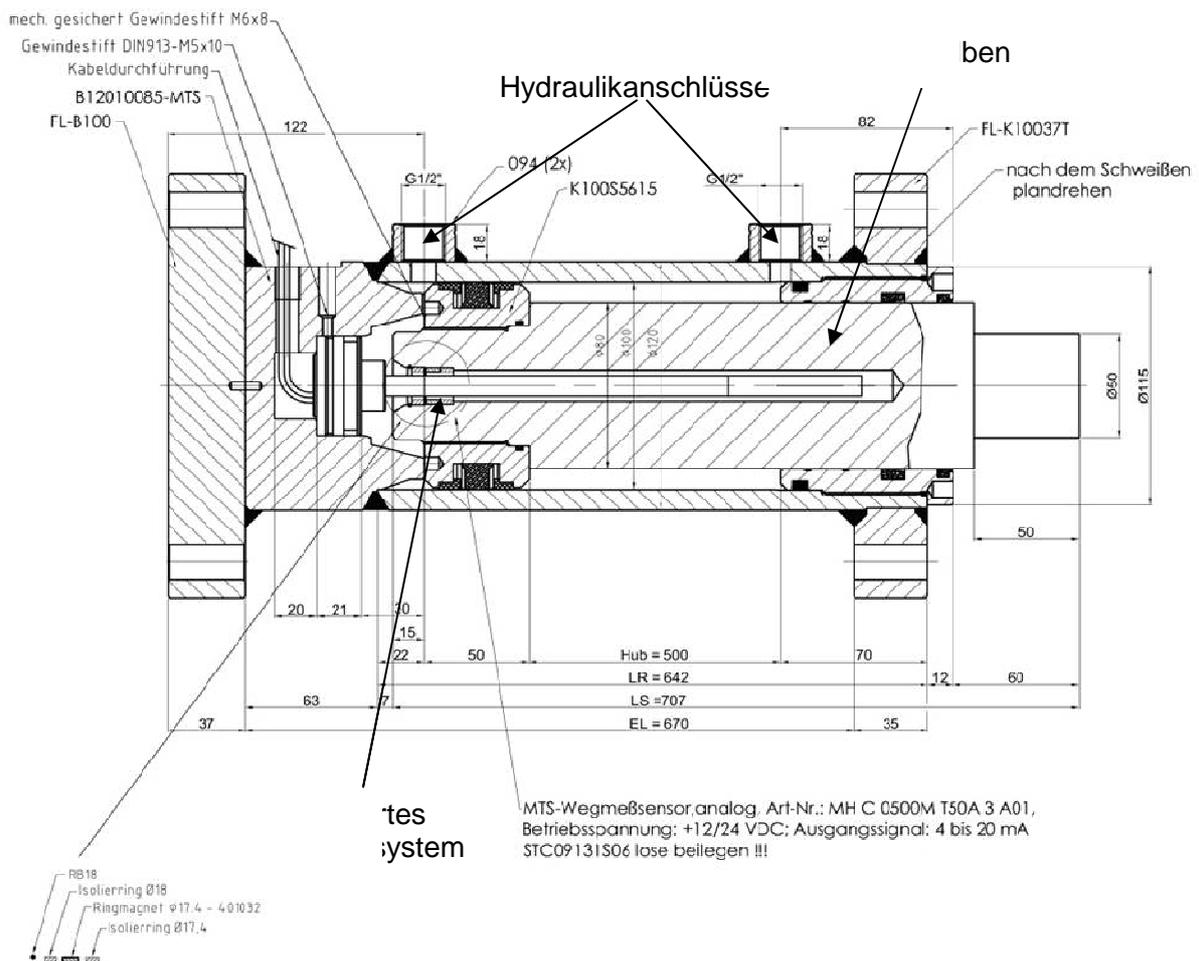
Hierbei handelt es sich um den Faktor 4, welcher zwischen den Beiden liegt. Das heißt, bei einem Weg von 100 mm werden Briketts in der Höhe von 25 mm entstehen, bei einem Weg von 20 mm nur mehr 5 mm. Um dennoch bei kurzen Zylinderwegen hohe Förderleistung erzielen zu können, müsste eine Dichtesteigerung bereits im Vorlagebehälter erzielt werden. Eine denkbare Variante wäre eine Vorkompaktierung im Vorlagebehälter.

4.3.4. Hydraulikanlage – Prototyp

In den folgenden Kapiteln werden die Komponenten des Protoyps näher erklärt.

4.3.4.1. Hydraulikzylinder

Für die Komapktieranlage kommt ein doppelwirkender Hydraulikzylinder der Firma Schema Hydraulik® zum Einsatz. Der Zylinder weist einen Kolbeninnendurchmesser von 100 mm auf. Um bei den Versuchen einen möglichen Kompaktiereinfluss der Hublänge erkennen zu können, wurde der maximale Zylinderhub mit 500 mm festgelegt. Zusätzlich wurde ein Wegmesssystem integriert, um die Positionierung des Zylinders vornehmen zu können. Abbildung 4-3 zeigt den Hydraulikzylinder der Firma Schema Hydraulik.



vgl. (Hydraulik-Schema, 2009)

Abbildung 4-3 Hydraulikzylinder Prototyp

In der folgenden Tabelle 4-10 werden die Zylinderdaten vom Vorversuchsstand und des Prototyps aufgelistet.

		Vorversuchsstand	Prototyp	Einheit
Kolbeninnendurchmesser	d	80	100	mm
Hydraulikdruck	p	180	200	bar
Ausfahrgeschwindigkeit	v_A	0,0129	0,10	m/s
Einfahrgeschwindigkeit	v_E	0,0159	0,10	m/s
maximale Presskraft	F	90478	164934	N
maximaler Zylinderhub	H	260	500	mm
maximale mechanische. Leistung	P_{mech}	1,69	17	kW

Tabelle 4-10 Vergleich Hydraulikzylinder Vorversuchsstand – Prototyp

Durch den gegebenen Kolbeninnendurchmesser und den Hydraulikdruck ergibt sich eine maximale Presskraft von 164934 N. Diese wurde gegenüber den Vorversuchen angehoben, um eine Förderung von Briketts nach dem Pressvorgang mühelos bewerkstelligen zu können. Durch die Anhebung der Presskraft und der Ausfahrgeschwindigkeit kann eine höhere mechanische Leistung erzielt werden.

4.3.4.2. Hydraulikaggregat

Das Hydraulikaggregat wurde ebenfalls von der Firma Schema Hydraulik[®] geliefert. Es besteht aus folgenden Komponenten:

- 18,5kW Drehstrommotor 400/690V
- 32,27cm³ Außenzahnradpumpe
- Anschlussblock mit Druckbegrenzungsventil 30-250 bar, Rücklauffilter und Manometer
- 100 l Stahlbehälter mit Thermometer und Niveauschalter für Ölstandüberwachung
- Druckschalter 50-400bar
- 4/3 Weg-Magnetventil
- Drosselrückschlagventil

Der maximale Hydraulikdruck wurde gegenüber der Vorversuchsanlage auf 210 bar angehoben, um eine höhere Presskraft aufbringen zu können. Auch der Hydraulikölvolumenstrom wurde auf 45,70 l/min erhöht, um eine Ausfahrgeschwindigkeit von 0,1 m/s zu erreichen.

In der folgenden Abbildung 4-4 ist das Hydraulikaggregat der Firma Schema Hydraulik® abgebildet.

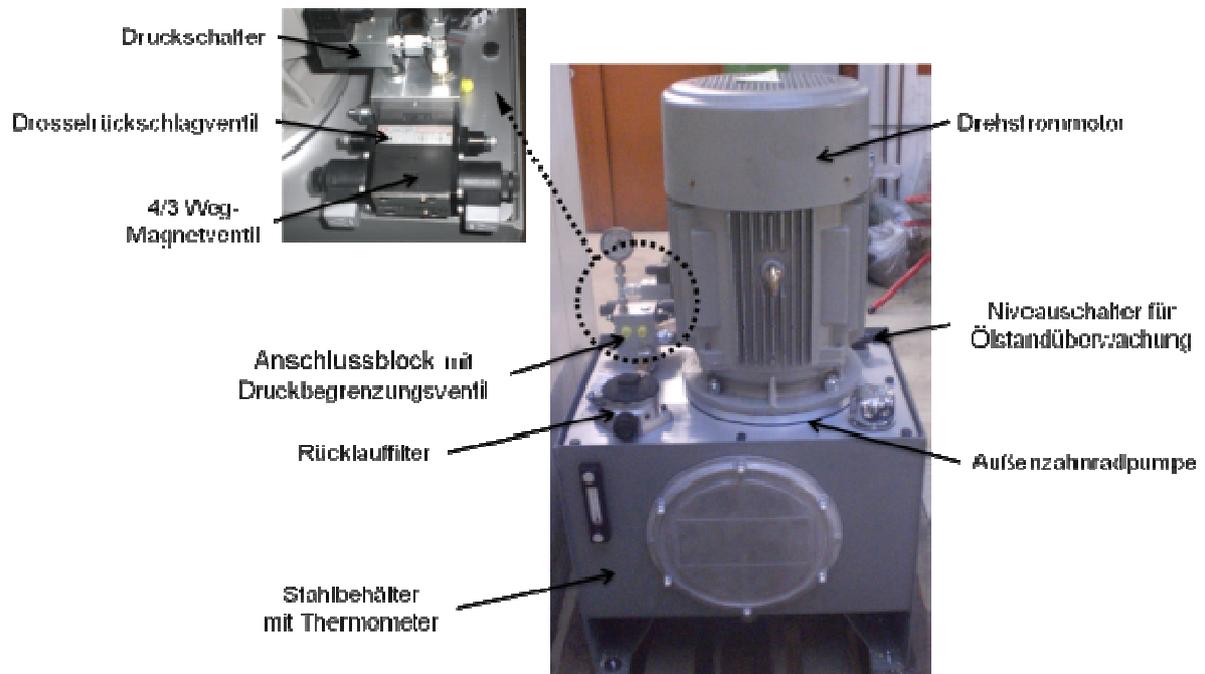


Abbildung 4-4 Hydraulikaggregat

In Tabelle 4-11 werden die Daten vom Vorversuchsstand und die des Prototyps verglichen.

		Vorversuchsstand	Prototyp	Einheit
Hydraulikdruck	p	180	210	bar
Volumenstrom der Pumpe	\dot{V}_p	4,10	45,70	l/min
Drehstrommotor - Leistung	P_M	1,60	18,5	kW

Tabelle 4-11 Vergleich Hydraulikaggregat Vorversuchsstand – Prototyp

4.3.5. Hydraulik – Funktionsplan

Wie man dem Funktionsschaltplan - Abbildung 4-5 - entnehmen kann, treibt der Elektromotor M die Zahnradpumpe P an. Diese saugt einen konstanten Volumenstrom aus dem Behälter B und fördert diesen über die Hydraulikleitung in die Steuereinrichtung VW.

Die Positionen 0, 1 und 2 am 4/3 – Wegventil VW realisieren die Bewegungszustände des doppelwirkenden Arbeitszylinders Z. Die Schaltstellung 0 am Wegventil steht für Halt, 1 für Ausfahren und 2 für Einfahren des Arbeitszylinders. Um die Anlage durch zu hohe Drücke nicht zu zerstören, wurde ein Druckbegrenzungsventil VD installiert.

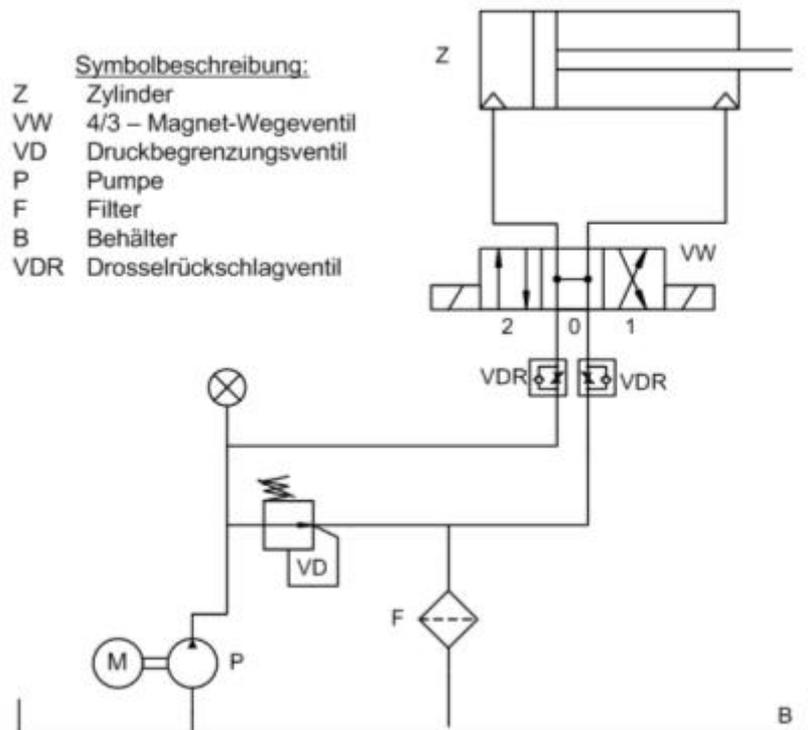
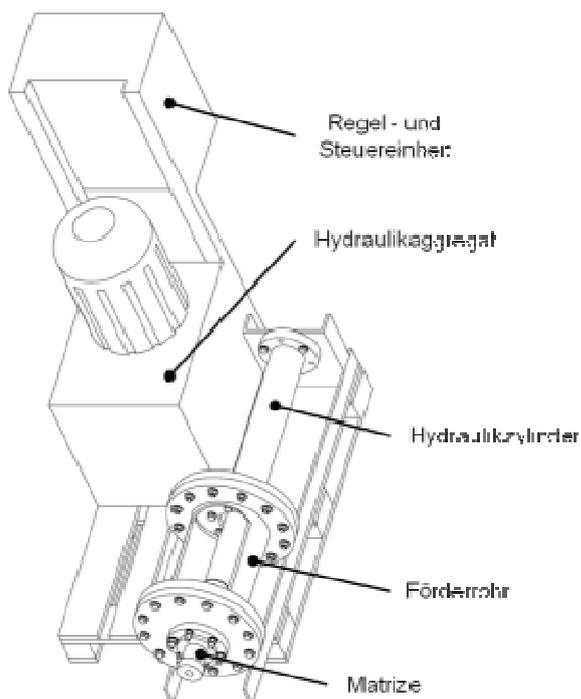


Abbildung 4-5 Hydraulikfunktionsschaltplan

Zum Schutz vor Verunreinigungen und schnellem Verschleiß wurde ein Filter F in der Rückflussleitung eingebaut. Um die Ausfahr- und Einfahrgeschwindigkeit einstellen zu können, wird ein Drosselrückschlagventil VDR verwendet.

4.3.6. Aufbau Prototyp



Bei der Planung des Prototyps wurde darauf geachtet, dass Veränderungen schnell und einfach durchgeführt werden können. Die Flanschverbindungen können jederzeit gelöst werden, um eine andere Matrize oder Schneidvorrichtung einsetzen zu können. Der gesamte Prototyp wurde mobil auf eine Europalette aufgebaut. Abbildung 4-6 zeigt die wichtigsten Komponenten des Prototyps, es sind dies: Hydraulikzylinder, Hydraulikaggregat, die Regel- und Schalteinheit, das Förderrohr (Vorlagebehälter) und die Matrize.

Abbildung 4-6 Zeichnung Prototyp

4.3.7. Regel – und Steuereinheit

Der Schaltschrank - Abbildung 4-7 - wurde einfach und übersichtlich aufgebaut. Die speicherprogrammierbare Steuerung (kurz SPS) der Firma Eurotherm® übernimmt den gesamten Regelaufwand. Die ablaufenden Arbeitsschritte wurden in einzelnen Reglern realisiert. Die Regelung hat die Aufgabe den Zylinder an einer vorgegebenen Position wenden zu lassen. Die dafür notwendigen Daten liefert das im Zylinder integrierte, Wegmesssystem. Zum Schutz der Anlage wurde auch eine Grenzwertüberwachung eingebaut. Sollte die SPS aus irgendeinem Grund ausfallen, sorgt der Grenzwertschalter dafür, dass der Zylinder dennoch am Ende stehen bleibt.

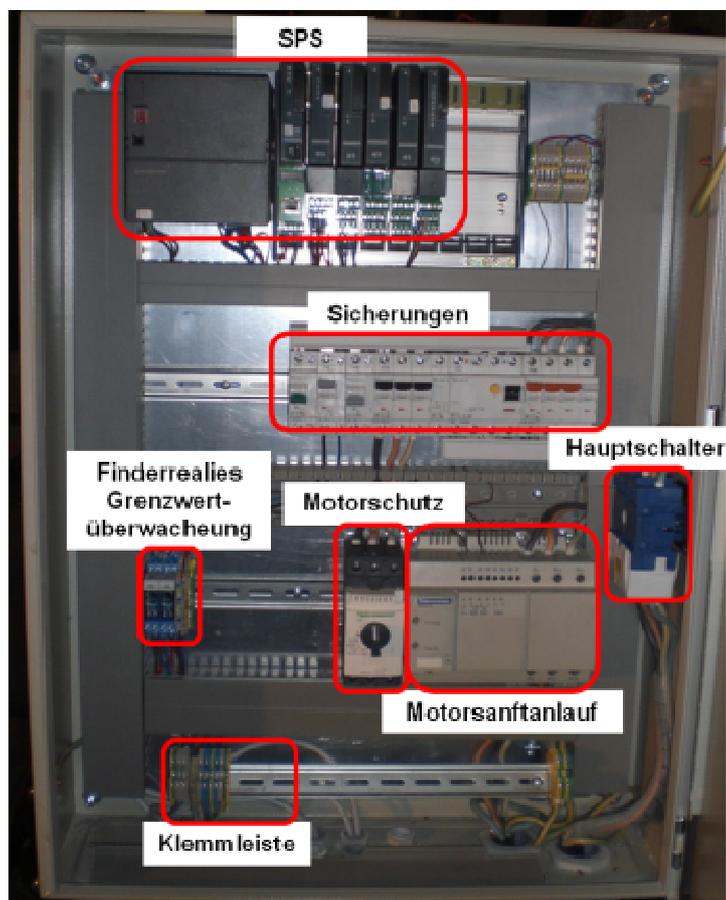


Abbildung 4-7 Schaltschrank



Abbildung 4-11 verdrückte Schneidvorrichtung



Abbildung 4-12 zerstörte Gewindeverbindung



Abbildung 4-13 verschleißte Schneidvorrichtung

Bei diesem Versuch fiel auf, dass das Hackgut durch die zylindrische Form der Schneidvorrichtungsbefestigung bereits im Förderrohr leicht kompaktiert wurde. Diese Kompaktierung könnte dazu führen, dass keine Hackgutförderung stattfindet, da sich ein Kanal bildet - Abbildung 4-14

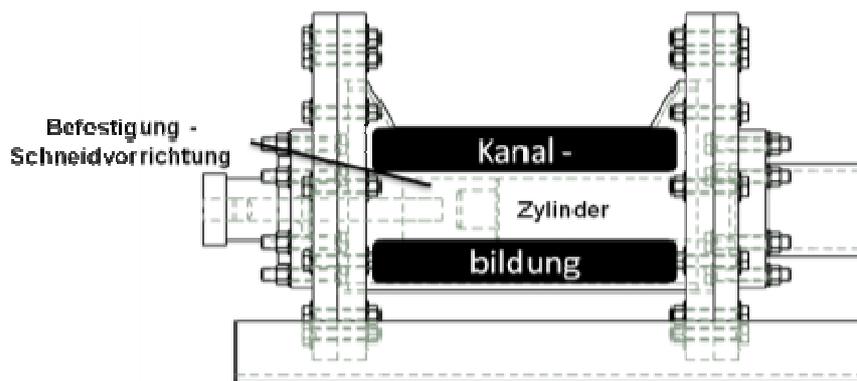


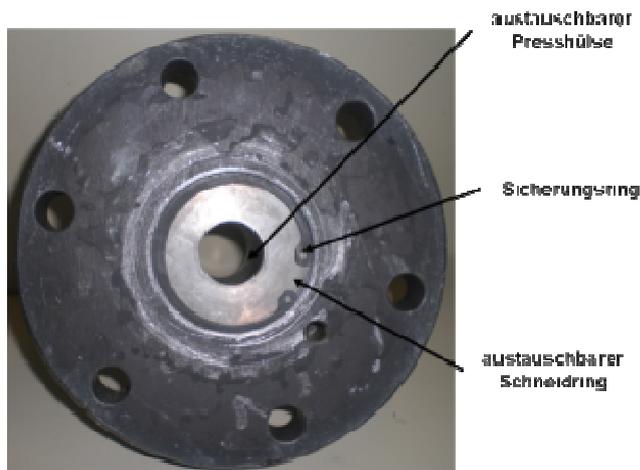
Abbildung 4-14 Hackgut Kanalbildung

Für die nächsten Versuche mussten die Schneidvorrichtungsbefestigung und die Schneidvorrichtung neu angefertigt werden. Aufgrund des starken Verschleißes beim ersten Kompaktierversuch wurde ein Stahl höherer Festigkeit gewählt. Zusätzlich wurde das Befestigungsgewinde vergrößert und für zusätzliche Sicherheit gegen das Ausreißen soll bei den folgenden Versuchen eine Kontramutter sorgen. Um einer Kompaktierung im Förderrohr entgegen zu wirken, wurde die zylindrische Form durch eine kegelige ersetzt - Abbildung 4-15.



Abbildung 4-15 neue Schneidvorrichtungsbefestigung

Für die Versuchsreihe 2 wurde eine austauschbare Presshülse in die Matrize eingebaut. Veränderungen (z.B. Winkel der Verjüngung oder einzelne Durchmesser) können dadurch



rasch vorgenommen werden, wodurch ein optimales Pressverhalten erzielt werden kann. Auch die Schneidringe sind austauschbar. Sie wurden mit unterschiedlichen Innendurchmessern angefertigt: 29,50 mm, 30,00 mm, 31,00 mm und 33,00 mm. Die Schneidvorrichtung hat einen Außendurchmesser von 29,00 mm.

Abbildung 4-19 Matrize mit Schneidring

Für die ersten Versuche wurde der größte Schneidring, mit einem Innendurchmesser von 33,00 mm gewählt. Als Aufgabegut diente trockenes Hackgut mit einem Wassergehalt von 8 %.



Abbildung 4-20 zerstörte Presshülse

Nach zirka 10 Pressvorgängen wurde die Presshülse zerstört, weil durch den Pressvorgang eine zu hohe Kraft auf die Schweißverbindung wirkte. Die Schneidwirkung war gegeben, jedoch konnte durch die geringe Anzahl der Pressvorgänge keine Aussage über den Energieaufwand gemacht werden.

Versuch 1 und 2 führten dazu, dass eine neue Matrize angefertigt wurde. Versuch 1 zeigte die Problematik der wirkenden Kräfte auf die Schneidvorrichtung und die damit hervor gerufenen axiale Auslenkung. Die entstehende Gefahr dabei ist das Scharren an der Matrizeninnenwand und bei großen Auslenkungen das nicht Treffen der Matrize und die Zerstörung der Anlage. Versuch 2 zeigte die wirkenden hohen Kräfte auf die Matrize selbst.

Variante 1: Matrize mit Einlaufkonus

Diese Variante bietet den Vorteil einer guten Führung der Schneide durch den Einlaufkonus, jedoch muss ohne Schneidring ein etwas höherer Energieaufwand in Kauf genommen werden.

Variante 2: Verstärken der Schneidvorrichtung

Um das Verdrücken der Schneidvorrichtung zu verhindern, könnte diese verstärkt werden. Dadurch könnte eine Matrize mit Schneidring verwendet werden.

Variante 3: kurze Presshübe

Durch kurze Hübe taucht die Schneide nicht oder nur gering in die Matrize ein, dadurch wird ein Verdrücken oder Scharren verhindert und ein Einsatz der Schneidringe wäre denkbar.

Variante 4: Führung der Schneidvorrichtung

Diese Variante würde eine eigene Führung des Zylinders und auch der Schneidvorrichtung in Betracht ziehen. Diese Variante ist bei der bestehenden Anlage nicht einsetzbar.

Variante 1 wurde realisiert und kam für die weiteren Versuche zum Einsatz. Es wurden 2 neue Matrizen geplant und auch angefertigt. Matrize 1 - Abbildung 4-21 – wurde mit Schneidringeneinsatz angefertigt. Die Flanschdicke für die Fixierung der Schneidringe wurde mit 10 mm, 20 mm und 30 mm gefertigt, um den Dickeneinfluss auf das Hackgut abstimmen zu können.

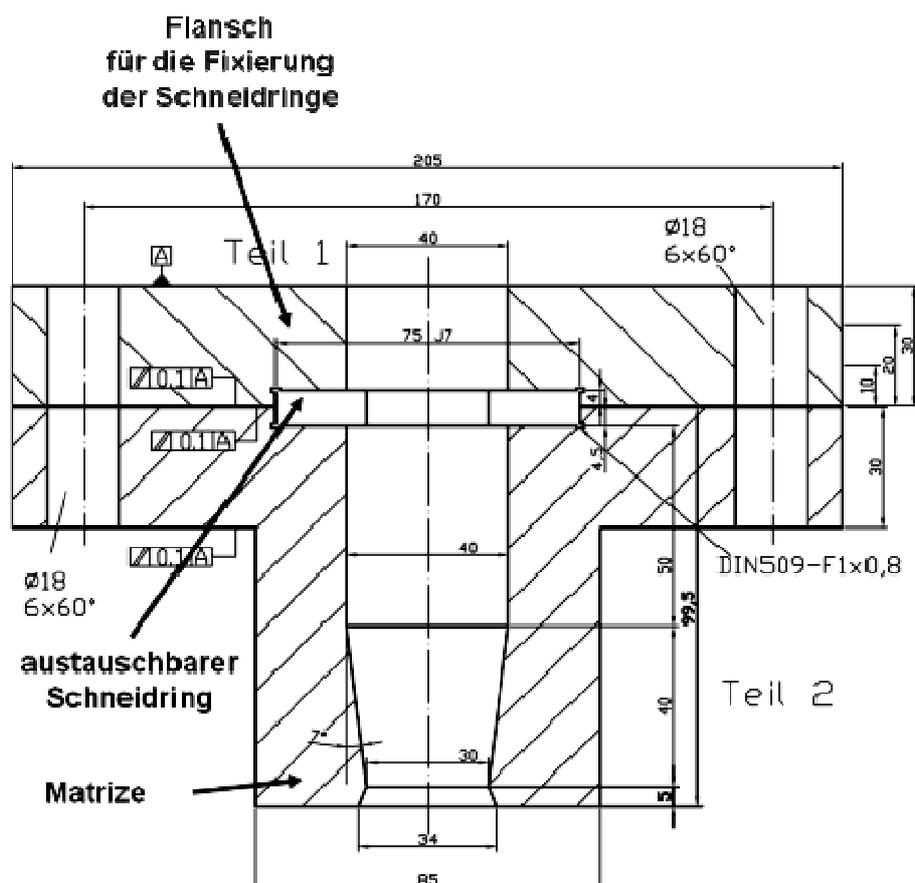


Abbildung 4-21 Matrize 1 mit Schneidring

Matrize 2 – Abbildung 4-22 – wird ohne Schneidring nur mit Einlaufkonus gefertigt. Der Aufbau des Presskanals ist gleich dem der Vorversuche.

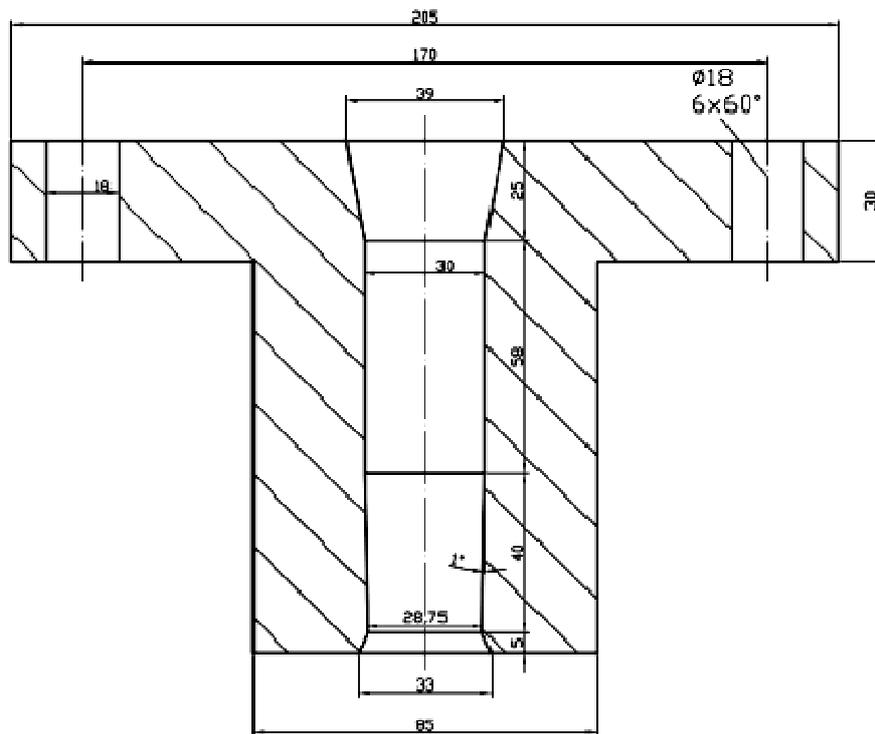
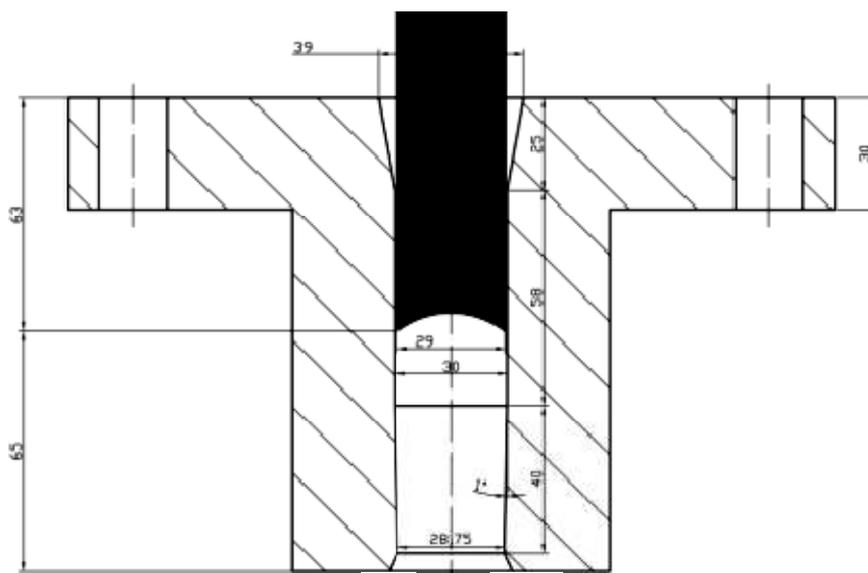


Abbildung 4-22 Matrize 2 mit Einlaufkonus

4.4.3. Kompaktierversuch 3

Für Kompaktierversuch 3 wurde Matrize 2 mit Einlaufkonus verwendet - Abbildung 4-23. Als Aufgabegut diente Hackgut mit einem Wassergehalt von 8%. Das trockene Hackgut G 30



Schneidvorrichtung

wurde der Anlage zugeführt, um kompakte Briketts zu erzeugen. Es wurde eine hohe Eintauchtiefe von 63 mm gewählt. Die neu gefertigte Schneidvorrichtung - Abbildung 4-23 - wurde in der Institutswerkstatt gehärtet, um die Verschleißfestigkeit zu erhöhen.

Am Beginn des Pressversuches bildeten sich Briketts, die eine sehr kompakte und feste



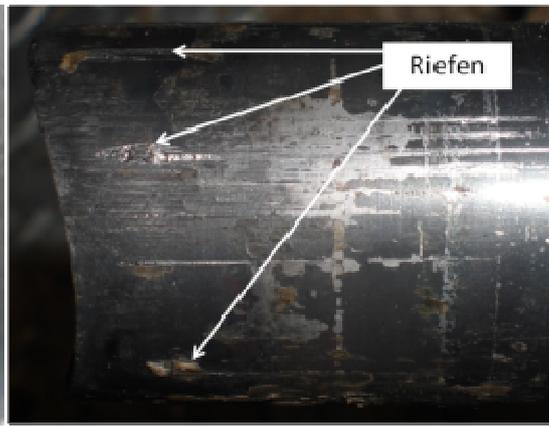
Form aufwiesen - Abbildung 4-24. Eine kontinuierliche Bildung war nicht möglich, es wurde auch eine reine Förderung des Hackgutes ohne Kompaktierung beobachtet.

mpaktierversuch 3

Nach dem Versuch wurden die Schneidvorrichtung und die Matrize auf Schäden kontrolliert. Bei der Matrize fiel auf, dass der Einlaufkonus keinen Schaden davon getragen hatte, aber der anschließende Abschnitt in Mitleidenschaft gezogen wurde - Abbildung 4-25. Es waren Riefen erkennbar, die durch das Scharren der Schneidvorrichtung entstanden sind. Auch die Schneidvorrichtung wurde dadurch leicht beschädigt - Abbildung 4-26.

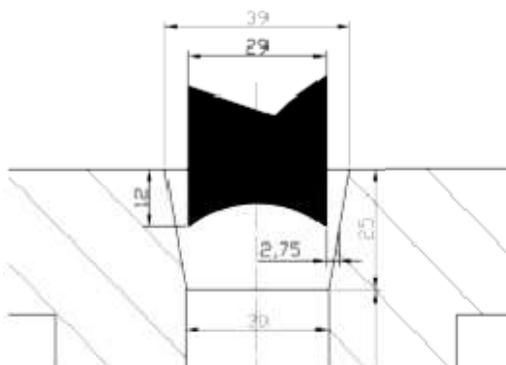


schneidvorrichtung nach



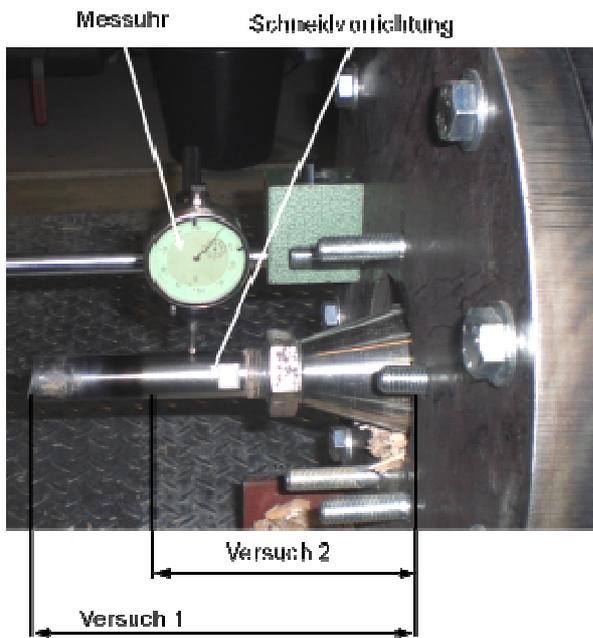
matrize nach versuch

Der Versuch zeigte, dass der Einlaufkonus keinen Schaden davontrug. Wählt man eine Eintauchtiefe, welche nicht größer als der Einlaufkonus ist, so sollte eine Zerstörung verhindert werden können. Wählt man eine Eintauchtiefe von 12 mm, muss die Schneidvorrichtung um 2,75 mm verdrückt werden, um an der Matrize zu scharren.



einlaufkonus eintauchtiefe

Um die axiale Abweichung der Schneidvorrichtung feststellen zu können, wurde die Matrize



abgebaut und durch eine Messuhr ersetzt - Abbildung 4-28. Der Hydraulikzylinder wurde soweit ausgefahren, dass die Schneidvorrichtung beim Versuch 1 - 22 cm und beim Versuch 2 - 16 cm aus dem Förderrohr ragte. Danach wurde die Messuhr auf 0 gestellt und die Schneidvorrichtung samt Hydraulikzylinder immer um rund 51° weitergedreht. Die auftretende Abweichung wurde von der Messuhr abgelesen.

Abbildung 4-28 Aufbau der Abweichungsüberprüfung

Abbildung 4-29 zeigt die Auswertung der Abweichungsmessung. Erkennbar ist, dass eine

	Verdrehung	Abweichung	
		Versuch1	Versuch2
1	0	0	0
2	51	10	16
3	103	-1	10
4	154	-14,5	-6
5	206	-28	-25
6	257	-16	-22,5
7	309	-18	-22
	in grad	in 1/100 mm	

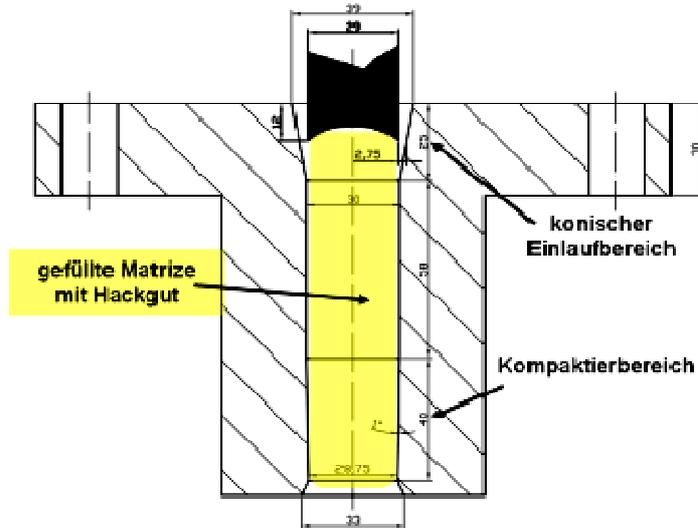
maximale Abweichung von 0,28 mm auftritt. Der Grund hierfür ist die Fertigungsungenauigkeit der einzelnen Bauteile. Wirken zusätzliche Kräfte auf die Anlage, wird die axiale Abweichung dementsprechend größer und ein Scharren der Schneidvorrichtung an der Matrize wird sich nur schwer verhindern lassen.

Abbildung 4-29 Auswertung der Abweichungsmessung

4.4.4. Kompaktiersversuch 4

Kompaktiersversuch 4 wurde mit Matrize 2 ohne Schneidring und trockenem Hackgut (Wassergehalt 8%) durchgeführt - Abbildung 4-30. Die Eintauchtiefe der Schneidvorrichtung wurde mit 12 mm festgelegt, um ein Scharren an der Matrizeninnenwand zu verhindern. Der Versuch dauerte nur kurze Zeit, da die Matrize mit Biomasse gefüllt war und die Presskraft der Hydraulikanlage nicht ausreichte, um die Biomasse durchzufördern.

Die geringe Eintauchtiefe bewirkte, dass die gesamte Matrize mit Hackgut gefüllt wurde. Die dadurch über die gesamte Länge der Matrize auftretende Reibkraft war für die

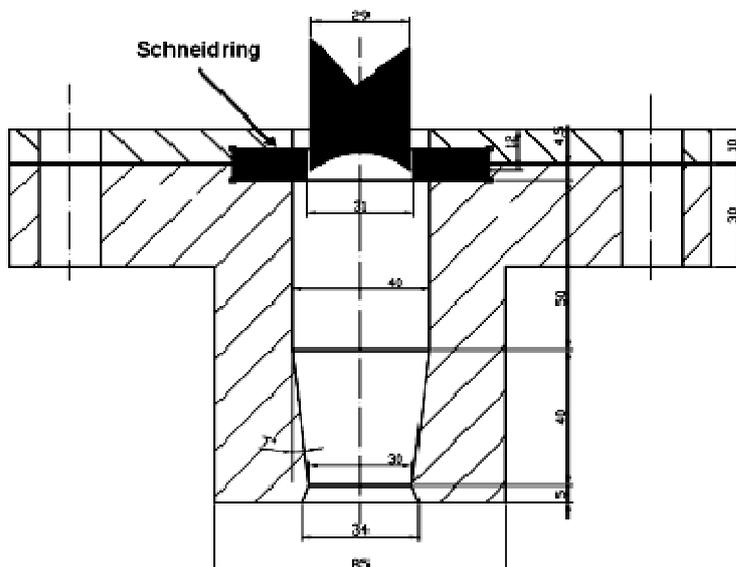


Schneidvorrichtung

Hydraulikanlage zu hoch, um ein Ausstoßen der Briketts möglich zu machen. Eine Lösung hierfür wäre eine kürzere Matrize, um die Reibkraft zu minimieren. Es wäre vorstellbar auf den mittleren Teil der Matrize zu verzichten. Die Matrize würde dann nur aus dem konischen Einlaufteil und dem Kompaktierbereich bestehen. Zusätzlich könnte man den Winkel im Kompaktierbereich verringern.

4.4.5. Kompaktierversuch 5

Bei Kompaktierversuch 5 wurde erstmals Matrize 1 mit Schneidvorrichtung verwendet. Die



Eintauchtiefe wurde wieder mit 12 mm festgelegt. Als Aufgabegut diente Hackgut mit einem Wassergehalt von 8%. Mit Hilfe des Schneidrings sollte die Biomasse beim Eintritt in die Matrize nicht gequetscht, sondern geschnitten werden. Zum Einsatz kam der Schneidring mit 31 mm Innendurchmesser und der 10 mm Klemmflansch.

Abbildung 4-31 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktierversuch 5

Mit dem verwendeten Schneidring und Klemmflansch konnten keine kompakten Briketts erzeugt werden. Die durch die Matrize gepresste Biomasse, wurde beim Eintritt durch den Schneidring zerkleinert.

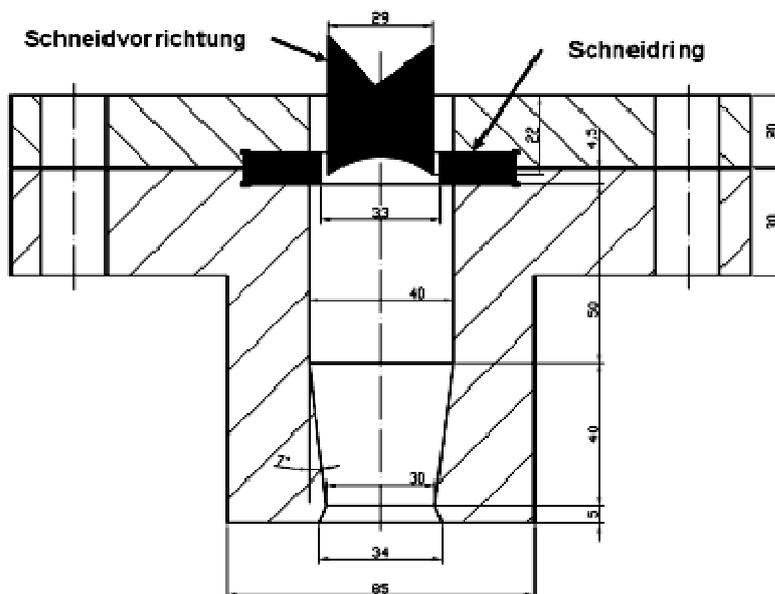
Nach dem Versuch wurden Matrize, Schneidring und Schneidvorrichtung auf etwaige Verschleißspuren kontrolliert. Die Matrize und auch der Schneidring wiesen keine Abnützungen auf. Die Schneidvorrichtung wurde durch den 31 mm Schneidring jedoch in Mitleidenschaft gezogen - Abbildung 4-32. Die auftretenden Kräfte drückten die Schneidvorrichtung gegen den Schneidring. Das vorhandene Spaltmaß zwischen Schneidring und Schneidvorrichtung von 2 mm konnte die Auslenkung nicht aufnehmen und so scharfte die Schneidvorrichtung am Schneidring.



vorrichtung

4.4.6. Kompaktierversuch 6

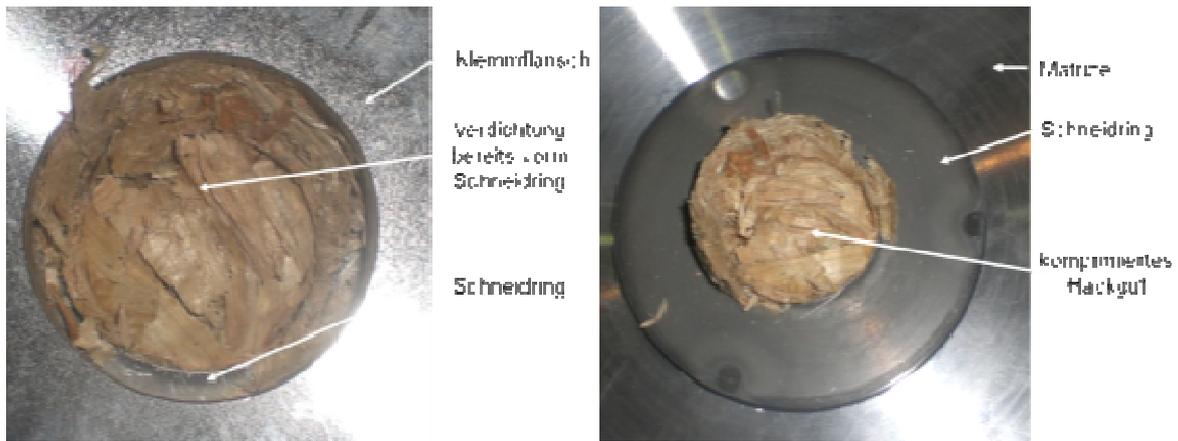
Um ein weiteres Scharren der Schneidvorrichtung zu vermeiden, wurde der Schneidring mit



einem Innendurchmesser von 33 mm eingebaut. Der Klemmflansch wurde auch getauscht - Abbildung 4-33. Mit Hilfe des 20 mm Flansches sollte mehr Reibung aufgebaut werden, um aus dem trockenen Hackgut (Wassergehalt 8%) kompakte Briketts herstellen zu können. Der Versuch musste abgebrochen werden.

Abbildung 4-33 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktierversuch 6

Durch den dickeren Klemmflansch ergab sich mehr Reibfläche – als im Versuch 5. Die Presskraft reichte nicht aus, um das Hackgut zu kompaktieren. Es wurde bereits vor dem Schneidring kompaktiert - Abbildung 4-35. Nach dem Entfernen des Klemmflansches fiel auf, dass die Biomasse bereits beim Einlaufbereich sehr stark verdichtet wurde - Abbildung 4-34.



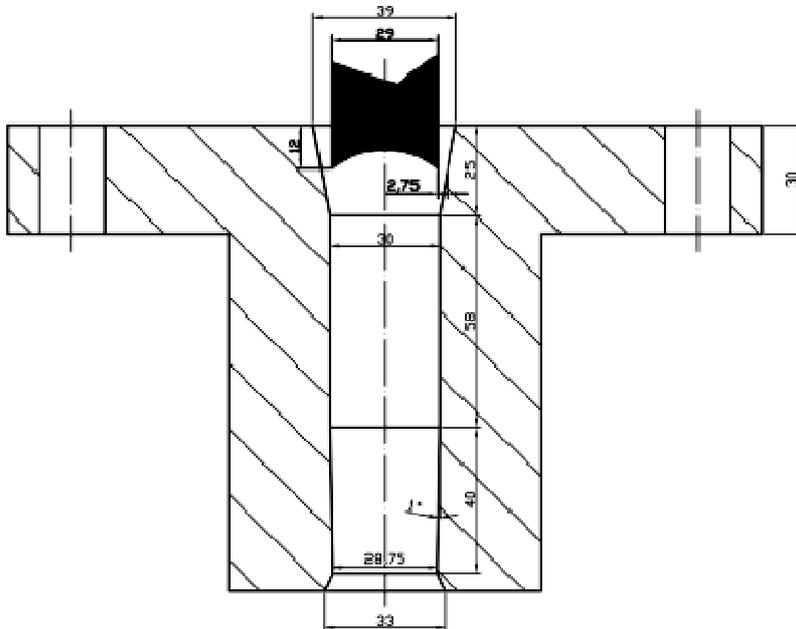
em
imflansch

dem
lemmflansch

Durch das größere Spaltmaß von 4 mm wurde kein Verschleiß an der Schneidvorrichtung festgestellt. Das größere Spaltmaß bringt aber den Nachteil mit sich, dass ein Teil der Schneidwirkung verloren geht.

4.4.7. Kompaktierversuch 7

Für Kompaktierversuch 7 kam nicht Biomasse, sondern Braunkohle als Aufgabegut zum Einsatz. Die



Einsatz. Die Kompaktierung soll mit Matrize 2 und einer Eintauchtiefe von 12 mm erfolgen. Es soll untersucht werden, ob mit der Matrize, die eigentlich für Biomasse gebaut wurde, Braunkohlebriketts erzeugt werden können.

Abbildung 4-36 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktierversuch 7

Die trockene Braunkohle (Wassergehalt 19%) - Abbildung 4-37 - wurde der Komaptieranlage zugeführt. Nach einigen Pressvorgängen war die Matrize bereits kompakt mit Braunkohle gefüllt - Abbildung 4-38. Die Braunkohle zerbröselte sofort nach dem Austritt aus der Matrize, es bildeten sich keine kompakten Briketts - Abbildung 4-39.



**Abbildung 4-37 Braunkohle
– Powersplit LIN 1361**



**Abbildung 4-38 kompakt
gefüllte Matrize**



**Abbildung 4-39
Kompaktierprodukt Kohle**

Ein Teil der Braunkohle wurde beim Eintritt in die Matrize wieder in das Förderrohr zurück gedrückt - Abbildung 4-40. Um das Ausweichen der Braunkohle zu verhindern, musste die Schneidvorrichtung tiefer in die Matrize einfahren.



Braunkohle weicht der
Schneidvorrichtung aus
und wird in das
Förderrohr
zurückgedrückt

Abbildung 4-40 Braunkohle Kompaktierversuch

4.4.8. Kompaktierversuch 8

Mit feuchter Braunkohle soll versucht werden, kompakte Briketts zu erzeugen. Die Braunkohle hatte einen Wassergehalt von 29,8%. Beim Anlagenaufbau wurde gegenüber Versuch 7, nur die Eintauchtiefe auf 20 mm angehoben. Damit soll verhindert werden, dass die Kohle wieder ins Förderrohr zurückgedrückt wird. Vor dem Versuchsstart musste die trockene Kohle von Kompaktierversuch 7 aus der Matrize entfernt werden.

Mit Matrize 2 und einer Eintauchtiefe von 20 mm konnte die feuchte Braunkohle zu festen Briketts kompaktiert werden – Abbildung 4-41 und Abbildung 4-42. Die Brikettherstellung mit Automatikschaltung der Steuerung ist mit der feuchten Braunkohle möglich – Abbildung 4-43. Der Versuch dauerte 10 Minuten und nach dem Beenden dieses fiel auf, dass sich die Hydraulikanlage stark erwärmt hatte. Um längere Dauerversuche dennoch machen zu können, müsste ein Ölkühler aufgebaut werden.



Abbildung 4-41
Kompaktierversuch 8



Abbildung 4-42 kompaktiert
Braunkohle



Abbildung 4-43
Brikettherstellung mit
feuchter Braunkohle

Die Braunkohle wurde bei Raumtemperatur der Anlage zugeführt, nach dem Pressvorgang stieg die Temperatur im Zentrum auf 38°C und am Rand des Briketts auf 40°C an.

4.4.9. Kompaktierversuch 9



Kompaktierversuch 9 wurde mit den gleichen Anlagenspezifikationen wie Versuch 8 durchgeführt. Als Aufgabegut diente trockene Braunkohle (19% Wassergehalt). Im Automatikbetrieb konnten feste Briketts mit einer glatten Oberfläche hergestellt werden. Beim Pressversuch wurden die Briketts mit hohem Druck aus der Matrize geschleudert, durch die hohe Kompaktheit der Briketts zerfielen sie dabei nicht. Bereits in Kompaktierversuch 7 wurde versucht, trockene Braunkohlebriketts herzustellen. Die Braunkohle zerbröselte jedoch sofort nach dem Matrizenaustritt. Der

Unterschied zu Kompaktierversuch 8 ist nur die erhöhte Eintauchtiefe von 12 auf 20 mm. Durch die Erhöhung wurde keine Braunkohle ins Förderrohr zurück gedrückt, sondern alles durch die Matrize gepresst. Die größere Braunkohlenmenge pro Hub und die erhöhte Eintauchtiefe, führten zu einer kompakten Brikettbildung.

4.4.10. Kompaktierversuch 10

An der Anlage wurde gegenüber Kompaktierversuch 9 nichts verändert. Die Eintauchtiefe wurde bei 20 mm belassen. Als Kompaktiergut diente Braunkohle mit einem Wassergehalt von 33,5%. Bevor mit dem Versuch begonnen werden konnte, musste die Matrize 2 von der Braunkohle, der letzten Versuche, befreit werden. Im Automatikbetrieb konnten kompakte Briketts hergestellt werden - Abbildung 4-45.



Abbildung 4-45 Briketts – Kompaktierversuch 10

4.4.11. Kompaktierversuch 11

Die nächsten Versuche wurden mit Matrize 2 und einer Eintauchtiefe von 20 mm durchgeführt Abbildung 4-46. Als Kompaktiergut kam wieder Biomasse zum Einsatz. Das feuchte Hackgut (50% Wassergehalt) konnte gut durch die Matrize gepresst werden. Nach dem Austritt aus der Matrize konnte ein starkes Aufquellen der Biomasse beobachten - Abbildung 4-47 - werden, es kam daher zu keiner Brikettbildung - Abbildung 4-48.

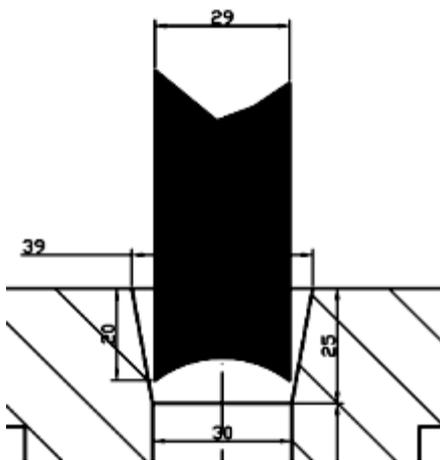


Abbildung 4-46 Matrize und Schneidvorrichtung Kompaktierversuch 11



Abbildung 4-47 Kompaktierversuch 11



Abbildung 4-48 Kompaktierprodukt – Kompaktierversuch 11

4.4.12. Kompaktversuch 12

An der Anlage wurde nichts verändert, auch die Eintauchtiefe wurde bei 20 mm belassen.



Der Versuch wurde jedoch mit trockenem Hackgut (Wassergehalt 10%) durchgeführt. Es bildeten sich einige Briketts, aber der Großteil der Biomasse wurde ohne Kompaktierung gefördert. Mit Fortdauer der Versuche verstopfte sich die Matrize, die Presskraft reichte nicht aus, um das Hackgut durch die Matrize zu pressen. Kürzt man die Matrize 2, so würde die Reibfläche kleiner werden und die Anlage könnte auch mit trockenem Hackgut problemlos betrieben werden.

4.4.13. Kompaktversuch 13

Da im Kompaktversuch 12 die Reibkraft zu hoch war, wurde die Matrize 2 gekürzt - Abbildung 4-50.

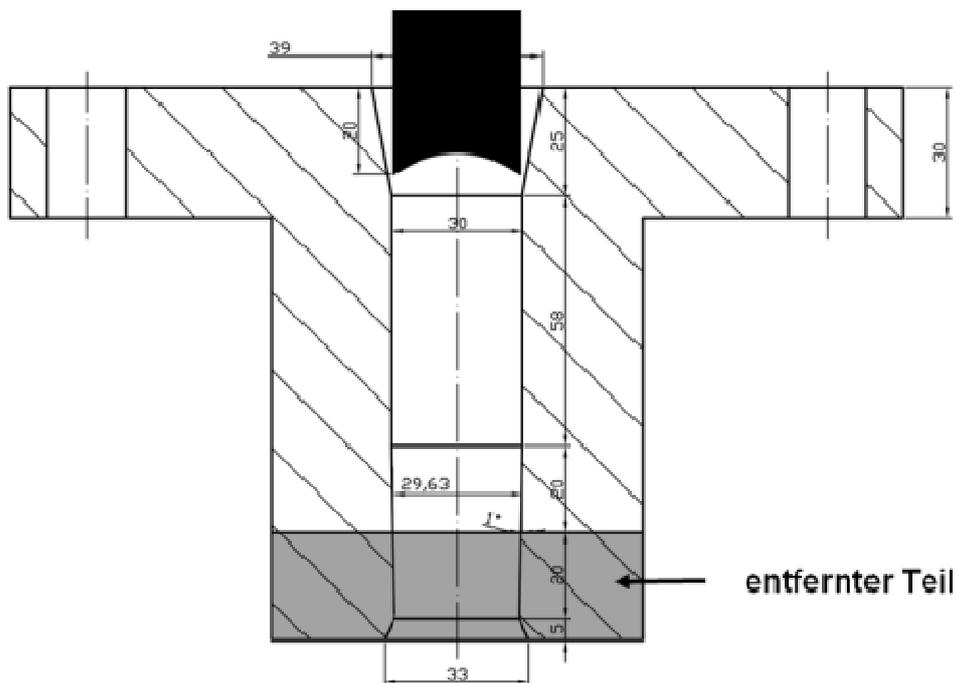


Abbildung 4-50 Matrize 2 – gekürzt

Der Versuch wurde mit feuchtem Hackgut (Wassergehalt 50%) durchgeführt. Dieses lässt sich ohne Verstopfungsgefahr durch die gekürzte Matrize pressen. Nach dem Austreten aus der Matrize konnte wieder ein Aufquellen der Briketts beobachtet werden.

4.4.14. Kompaktierversuch 14

Trockenes Hackgut (Wassergehalt 10%) wurde der Anlage zugeführt. Aufgrund der zu hohen Reibung bei geringen Eintauchtiefen, wurde Matrize 2 gekürzt. Die Eintauchtiefe wurde bei 20 mm belassen. Trotz gekürzter Matrize war eine kontinuierliche Brikettherstellung nicht möglich. Das trockene Hackgut schoss schnell und mit hohem Druck aus der Matrize - Abbildung 4-51. Vereinzelt wurde eine Brikettbildung beobachtet - Abbildung 4-52. Die Förderung von Biomasse viel auch sehr unregelmäßig aus.



Abbildung 4-51 Hackgut nach Kompaktierversuch 12



Abbildung 4-52 vereinzelt Brikettherstellung

In Kapitel 4.3.1 wurde der geforderte Biomassestrom berechnet. Es müssten 125 kg/h an Biomasse gefördert werden um einen 500 kW Kessel versorgen zu können. Um den tatsächlichen Biomassestrom bestimmen zu können, wurde die geförderte Masse abgewogen und die benötigte Zeit dafür gestoppt und mit Gleichung 4-8 der tatsächliche Massenstrom berechnet.

$$\dot{m}_{\text{Hack_tat}} = \frac{m_{\text{Hack}}}{\Delta t} \quad \text{Gleichung 4-8}$$

$\dot{m}_{\text{Hack_tat}}$...	tatsächlicher Hackgutmassenstrom	kg/s
m_{Hack}	...	geförderte Hackgutmasse	kg
Δt	...	benötigte Zeit	s
Beschreibung		Einheit	
	geförderte Hackgutmasse	$m_{\text{Hack_tat}}$	0,26 kg
	benötigte Zeit	Δt	0,033 h
	tatsächlicher Hackgutmassenstrom	\dot{m}_{Hack}	7,8 kg/h

Die geforderten 125 kg/h konnten bei weitem nicht erreicht werden. Mit dem Aufbau und Matrize 2 können nur 7,8 kg/h erbracht werden. Bei Versuch 15 soll die Eintauchtiefe erhöht werden, um damit den Einfluss auf die Förderleistung bestimmen zu können.

4.4.15. Kompaktierversuch 15

Gegenüber Kompaktierversuch 14 wurde nur die Eintauchtiefe auf 50 mm erhöht. Das



Abbildung 4-53 Kompaktierversuch 15

trockene Hackgut (Wassergehalt 10%) konnte ohne Probleme gefördert und zum Teil auch kompaktiert werden. Mit Fortdauer der Versuche wurden keine kompakten Briketts mehr gebildet und das Hackgut wurde nur mehr gefördert. Durch die Erhöhung der Eintauchtiefe konnte eine minimale Erhöhung des Hackgutmassenstrom auf 9,75 kg/h erreicht werden.

Beschreibung			Einheit
geförderte Hackgutmasse	$m_{\text{Hack_tat}}$	0,325	kg
benötigte Zeit	Δt	0,033	h
tatsächlicher Hackgutmassenstrom	\dot{m}_{Hack}	9,75	kg/h

4.4.16. Fazit Kompaktierversuche

Bei den Versuchen mit Hackgut wurde beobachtet, dass sich dieses in der Matrize anlagert und so zu einer axialen Abweichung der Schneidvorrichtung führt. Dadurch verschleißt diese stark, zusätzlich wirken beim Ausfahren der Schneidvorrichtung aus der Matrize hohe Kräfte auf die Schneidvorrichtungsbefestigung. Daher ist dafür zu sorgen, dass die Schneidvorrichtung fest mit dem Zylinder verbunden ist. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass sich kein Biomassekanal im Förderrohr bildet und es dadurch zu keiner Kompaktierung kommt. Abbildung 4-15 zeigt eine Befestigungsform, die dies verhindert.

Die Versuche mit Schneidringen waren nicht sehr erfolgreich, da durch die axiale Abweichung des Zylinders, die Schneidvorrichtung an den Schneidringen scharfte und dadurch stark abgenützt wurde. Daher wurden Matrizen ohne Schneidvorrichtung, aber mit Einlaufkonus - Abbildung 4-22 - für die weiteren Versuche verwendet.

Feuchtes Hackgut (Wassergehalt 50%) konnte durch die Matrize 2 mit Einlaufkonus ohne Verstopfungsgefahr, aber auch ohne Brikettbildung gepresst werden. Trockenes Hackgut (Wassergehalt 10%) führte zu einer Verstopfung der Matrize. Daher wurde die Matrize 2 mit Einlaufkonus gekürzt - Abbildung 4-50, um die auftretende Reibkraft zu senken und trockenes Hackgut kompaktieren zu können. Durch die Matrizenkürzung konnte schließlich auch trockenes Hackgut ohne Verstopfungsgefahr kompaktiert werden. Es zeigte sich aber,

dass die geforderte Förderleistung nicht erbracht wird und daher weitere Maßnahmen zur Steigerung (z. B.: Vorkompaktierung im Förderrohr) zu treffen sind.

Versuche mit Braunkohle haben gezeigt, dass eine Kompaktierung im Vergleich zu den Versuchen mit Hackgut besser funktioniert. Es muss ab darauf geachtet werden, dass die Eintauchtiefe der Schneidvorrichtung in die Matrize mindestens 20 mm beträgt, da sonst die Braunkohle ausweicht und nicht durch die Matrize gepresst wird.

Abschließend ist zu sagen, dass bei einer Kompaktierung mit Hilfe von Schneidringen, eine starke Abnützung der Schneidvorrichtung in Kauf genommen werden muss. „Matrize 2 – gekürzt“ ist für eine Kompaktierung von feuchter und trockener Biomasse nahezu optimal, jedoch muss noch eine Steigerung der Förderleistung erzielt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Anlage zum Kompaktieren von Biomasse geplant, gebaut und getestet werden. Der Kompaktierprototyp soll in der Lage sein, einen 500 kW Reformier mit Biomasse zu versorgen. Durch den Pressvorgang soll ein Brikett entstehen, womit ein gasdichter Abschluss erzeugt wird und so eine Druckschleuse entfallen kann.

Es wurden Vorversuche zur Kompaktierung durchgeführt, um die Einflüsse von Wassergehalt und Matrizengeometrie auf den Kompaktiervorgang zu erhalten. Dabei zeigte sich, dass mit feuchter Biomasse – ab einem Wassergehalt von 20% – keine festen Briketts erzeugt werden können. Trockene Biomasse ließ sich ohne Probleme zu kompakten Briketts pressen. Ein Weiterfördern der Biomasse ist somit möglich und Richtungsänderungen müssen mit Radien ab 500 mm durchgeführt werden. Die Vorversuche zeigten, dass durch den Brikettstoppel keine absolute Dichtheit gegeben ist und für den Einsatz am Heatpiperreformer weitere Maßnahmen zu setzen sind, um einen Gasaustritt verhindern zu können.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass ein Pressvorgang aus 3 Abschnitten besteht. Am Beginn wird die Matrize mit Hackgut gefüllt, danach wird vorverdichtet und zum Abschluss folgt die Hochverdichtung. Die Kraft steigt sehr langsam und kontinuierlich an und nimmt ein Maximum im Abschnitt der Hochverdichtung an. Das Füllen und Vorkomprimieren nahm die meiste Zeit in Anspruch. Eine Kraft-Dichte-Messung hat ergeben, dass die Presskraft erst nach 5-10 Pressvorgängen steigt und auch eine Brikettbildung erst dann einsetzt. Grund hierfür ist der sich aufbauende Gegendruck, durch die Reibung zwischen dem Hackgut und der Matrizeninnenwand.

Mit den erhaltenen Daten der Vorversuche, wurde der Prototyp geplant und aufgebaut. Der Hydraulikstempel ist in der Lage, eine Presskraft von rund 160.000 N aufzubringen. Die Aus- und Einfahrgeschwindigkeit des Zylinders wurde mit 0,1 m/s festgelegt, um die Biomasseförderleistung erreichen zu können. Ein Wegmesssystem wurde in den Zylinder integriert, um damit die Positionierung des Zylinders vornehmen zu können.

Die verwendete speicherprogrammierbare Steuerung der Firma Eurotherm ® konnte der schnellen Ausfahrgeschwindigkeit des Zylinders nicht folgen. Für eine genaue Steuerung der Kompaktieranlage ist sie daher ungeeignet und muss ersetzt werden. Um dennoch Versuche durchführen zu können, wurde ein mechanischer Grenzwertschalter installiert, um dadurch eine genaue Positionierung möglich zu machen.

Um Dauerversuche durchführen zu können, wurde ein Ölkühler der Firma Schema Hydraulik installiert.

Die ersten Pressversuche mit Biomasse zeigten, dass auf Matrize und Schneidvorrichtung hohe Kräfte wirken. Des Weiteren wurde ein mechanischer Verschleiß an Matrize und Schneidvorrichtung festgestellt. Versuche mit dem Schneidring zeigten, dass eine Schneidwirkung gegeben ist, jedoch die Schneidvorrichtung nicht immer genau trifft und dadurch eine starke Abnützung der Schneidvorrichtung zur Folge hat. Aufgrund der axialen Abweichung und durch das Verdrücken der Schneidvorrichtung bei den Pressvorgängen, wurde auf die Schneidringe verzichtet und der etwas höhere Energieaufwand in Kauf genommen, um die Standzeit von Matrize und Schneidvorrichtung erhöhen zu können.

Die weiteren Versuche wurden ohne Schneidring und mit einer Matrize, die ähnlich die der Vorversuche ist, durchgeführt. Bei diesen wurde die Förderleistung gemessen, es konnte ein Biomassemassenstrom von rund 10 kg/h erreicht werden. Für die Beschickung des 500 kW Reformers müsste ein Strom von 120 kg/h erreicht werden. Eine andere Möglichkeit wäre, dass die Biomasse vorkomprimiert wird, um dadurch eine höherer Briketthöhe pro Pressvorgang erreichen zu können.

Biomasse kann kompaktiert werden. Jedoch kann der Brikettstoppel eine absolute Gasdichtheit nicht gewährleisten, daher müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden, um den Gasaustritt verhindern zu können. Die Veränderungen müssen durchgeführt, der Prototyp optimiert und in realitätsnahen Bedingungen getestet werden.

Mit der Diplomarbeit „Kompaktierung von Biomasse“ wurde eine Pilotanlage aufgebaut, an der weitere Optimierungen zur Erhöhung der Durchsatzleistung und Minimierung der Pressleistung gesetzt werden können.

Literaturverzeichnis

- Heinze, G. (2000). *Handbuch der Agglomerationstechnik*. WILEY-VCH.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Biomasse>. (14. Dezember 2009).
- Hydraulik-Schema. (10. November 2009). Zeichnung: Hydraulikzylinder 10080500-MTS. Bruckmühl.
- J.Karl, W. S. *Allotherme Wirbelschichtvergasung - Möglichkeit zur Realisierung des Wärmeeintrages in Wirbelschichten*.
- Karl, J. (2006). *Dezentrale Energieisysteme*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Karl, J. (1 2005). Erneuerbare Energien 1/2005. *Erneuerbare Enengrie* .
- Karl, J. (1 2005). Regenerative Gase aus fester Biomasse. *Erneuerbare Energie* .
- Karl, J. (2009). *Vorlesungsskriptum Wärmetechnik 1*. TU Graz- Institut für Wärmetechnik.
- Karl, P. J. *Vorlesung - Biomasse*.
- Obernberger, I. (1997). *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen*. dbv-Verlag für die Technische Universität Graz.
- Schubert, H. (2002). *Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik*. Wiley-VCH.
- Stieß, M. (1994). *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Springer - Verlag .
- Tschätsch, H. (1997). *Praxiswissen Umfromtechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- Will, D., & Norbert, G. (2008). *Hydraulik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- www.agnion.de. (2010). Abgerufen am 31. Mai 2010 von www.agnion.de