

# Masterarbeit

Studie zur Prüfung der wirtschaftlichen  
Durchführbarkeit der Kopplung des Zementwerkes Rohrdorf  
und des Zementwerkes Gmunden mit einer Biogasanlage

erstellt für

Südbayerisches Portland-Zementwerk  
Gebr. Wiesböck & Co. GmbH

**Vorgelegt von:**  
Manuel Gusenbauer  
1135197

**Betreuer/Gutachter:**  
Dipl.-Ing. Dr.mont. Markus Ellersdorfer  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Markus Lehner

Leoben, Mai 2014

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Manuel Gusenbauer  
Leoben, Mai 2014

# Danksagung

Viele Personen haben direkt oder indirekt einen positiven Einfluss auf die Entstehung dieser Arbeit genommen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei den Führungspersonen und Mitarbeitern des Zementwerkes Rohrdorf, insbesondere beim Herrn Dipl.- Ing. Dr. Helmut Leibinger, der mir die Ausarbeitung dieses innovativen Diplomarbeitsthemas ermöglicht und mir dabei sehr große Freiheiten eingeräumt hat. Ebenfalls wurde ich von den Mitarbeitern der Abteilung Anlagen- und Verfahrenstechnik tatkräftig unterstützt. Die Mitarbeiter des Rohrdorfer Labors leisteten einen essentiellen Beitrag an dieser Arbeit, da sie eine Vielzahl an Klärschlamm-trocknungsproben auswerteten und jederzeit für Detailfragen zur Verfügung standen. Besonderen Dank gebührt Herrn Manfred Scheuerer, der mich umfassend mit Informationen über die in Rohrdorf eingesetzten Brennstoffe, sowie über die momentane Emissionspolitik versorgt hat. Auch die anderen Mitarbeiter der technischen Abteilung des Zementwerkes Rohrdorf und des Zementwerkes Gmunden, hatten jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen.

Der Firma JVK Filtration Systems GmbH möchte ich für die zur Verfügung gestellte Membranfilterpresse danken. Herrn Bernhard Salbaum danke ich für die Einweisung mit der Membranfilterpresse.

Meinem Betreuer seitens der Montanuniversität, Herr Dipl.-Ing. Dr. mont. Markus Ellersdorfer, gebührt für die Unterstützung während der Erstellung der Arbeit, aber vor allem für die Korrektur der Arbeit großen Dank.

Meinen Kollegen Herrn Johannes Schedlberger MSc und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Skazedonigg, mit denen ich zeitgleich die Diplomarbeit in Rohrdorf geschrieben habe, möchte ich für die vielen anregenden Gespräche und für die tolle Zeit in Rohrdorf danken.

Einen sehr großen indirekten Einfluss auf die Entstehung dieser Arbeit hatten meine Freunde und im Besonderen meine Familie, die mich in schwierigen wie auch in guten Zeiten unterstützten.

Herzlichen Dank und Glück auf!

# Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es eine Studie zur Prüfung der wirtschaftlichen Durchführbarkeit der Koppelung des Zementwerkes Gmunden und des Zementwerkes Rohrdorf mit einer Biogasanlage zu erstellen. Ebenfalls sollen aus einer Bandbreite möglicher Verfahrensschritte der Biogaserzeugung und -verwertung jene Prozesse eruiert werden, die das größte Potential im Hinblick auf eine wirtschaftliche Kombination mit einem Zementwerk bergen.

Zu Beginn dieser Arbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche zum Stand der Technik der Zementindustrie und dem Stand der Technik zu Biogas durchgeführt. Eine anschließend durchgeführte Substratstudie für das Zementwerk Rohrdorf und das Zementwerk Gmunden bildet die Grundlage für eine Grobdimensionierung der Biogasanlage und für die Konzeptvorüberlegungen der Anlagenkopplung. Im weiteren Verlauf dieser Konzeptvorüberlegungen wurden Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche mit einer Membranfilterpresse durchgeführt, um Erfahrung auf dem Gebiet der Klärschlamm-trocknung und der Bioschlamm-trocknung zu sammeln, sowie Rückschlüsse auf die Gärrest-trocknung ziehen zu können.

# Abstract

The aim of this thesis is the development of an economic feasibility study of the cement plants Gmunden and Rohrdorf, in case both of them are combined with a biogas plant. Moreover, the range of possible steps of biogas production and utilization processes is evaluated, concerning the potential of an economic combination with a cement plant.

At the beginning of this thesis, a comprehensive study of contemporary literature on the state of the art in the cement industry as well as in biogas utilization was accomplished. A substratum study for the cement plants Rohrdorf and Gmunden forms the basis for a rough dimensioning of the biogas plant and the concept preconsiderations of the plant combination.

Later, sewage- and biosludge drying tests were carried out with a membrane filter press, in order to gain experience in the field of sludge drying and to be able to draw conclusions concerning digestate drying, utilising excess heat sources from cement works.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik in der Zementindustrie</b>	<b>3</b>
2.1	Stand der Technik der Zementherstellung . . . . .	3
2.1.1	Informationen über den Zementherstellungsprozess . . . . .	3
2.1.1.1	Rohmaterialgewinnung . . . . .	3
2.1.1.2	Rohmaterialaufbereitung . . . . .	4
2.1.1.3	Brennstoffaufbereitung . . . . .	4
2.1.1.4	Klinkerproduktion . . . . .	4
2.1.1.5	Zementproduktion . . . . .	8
2.1.2	Emissionen der Zementindustrie . . . . .	9
2.1.2.1	Emissionsrechtehandel . . . . .	9
2.1.2.2	Treibhausgase der Zementindustrie . . . . .	9
2.1.2.3	Emissionsberechnungsmöglichkeiten für verschiedene Brennstoffe	10
2.2	Zementwerk Gmunden . . . . .	10
2.2.1	Zementherstellungsprozess . . . . .	10
2.2.2	Betriebsparameter . . . . .	12
2.2.2.1	Brennstoffeinsatz . . . . .	12
2.2.2.2	Abwärmequellen . . . . .	12
2.3	Zementwerk Rohrdorf . . . . .	13
2.3.1	Herstellungsprozess . . . . .	13
2.3.2	Eigenheiten des Rohrdorfer Zementwerks . . . . .	14
2.3.2.1	Abhitzekraftwerk . . . . .	15
2.3.2.2	SCR Anlage . . . . .	15
2.3.3	Betriebsparameter . . . . .	15
2.3.3.1	Brennstoffeinsatz . . . . .	15
2.3.3.2	Abwärmequellen . . . . .	16
2.3.3.3	Lastzyklus . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Stand der Technik zu Biogas</b>	<b>18</b>
3.1	Grundlagen des anaeroben Abbaus . . . . .	18

3.2	Substrate . . . . .	19
3.2.1	Eignung verschiedener Substrate zur Biogasgewinnung . . . . .	19
3.2.2	Anforderungen an die Hygienisierung . . . . .	21
3.2.3	Substrataufschluss (Desintegration) . . . . .	23
3.2.3.1	Enzyme . . . . .	25
3.2.3.2	Thermische Verfahren . . . . .	25
3.2.3.3	Elektrokinetische Verfahren . . . . .	25
3.2.3.4	Mechanische Verfahren . . . . .	26
3.2.3.5	Ultraschallverfahren . . . . .	27
3.2.3.6	Chemische Verfahren . . . . .	27
3.3	Stand der Technik der Biogaserzeugung . . . . .	27
3.3.1	Batchverfahren . . . . .	28
3.3.2	Wechselbehälterverfahren . . . . .	29
3.3.3	Speicherverfahren . . . . .	29
3.3.4	Durchflussverfahren . . . . .	29
3.3.5	Durchfluss-Speicher-Verfahren . . . . .	30
3.3.6	Pfropfenstromverfahren . . . . .	30
3.4	Stand der Technik der Biogasaufbereitung . . . . .	30
3.4.1	Entschwefelungsverfahren . . . . .	31
3.4.1.1	Biologische Entschwefelung . . . . .	31
3.4.1.2	Biofilter . . . . .	31
3.4.1.3	Chemische Entschwefelung . . . . .	31
3.4.1.4	Chemisch-biologische Entschwefelung . . . . .	32
3.4.2	CO <sub>2</sub> -Abtrennungsverfahren . . . . .	32
3.4.2.1	Druckwechseladsorption . . . . .	32
3.4.2.2	Physikalische Wäschen . . . . .	32
3.4.2.3	Chemische Wäscher . . . . .	33
3.4.2.4	Membran-Biogasaufbereitung . . . . .	33
3.4.3	Gastrocknungsverfahren . . . . .	33
3.4.3.1	Vortrocknung . . . . .	33
3.4.3.2	Nachtrocknung . . . . .	33
3.5	Stand der Technik der Biogasverwertung . . . . .	34
3.5.1	Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	34
3.5.1.1	Motoren für Biogasanlagen . . . . .	34
3.5.1.2	Mikrogasturbine . . . . .	35
3.5.2	Verwertungsmöglichkeiten des aufbereiteten Biogases . . . . .	36
3.5.2.1	Einspeisung des Biomethans ins Erdgasnetz . . . . .	36
3.5.2.2	Treibstoff für Kraftfahrzeuge . . . . .	36

3.5.3	Vergütungssätze . . . . .	37
3.5.3.1	Vergütungssätze nach dem EEG 2012 . . . . .	37
3.5.3.2	Vergütungssätze nach der Ökostromverordnung . . . . .	38
3.6	Stand der Technik der Gärrestaufbereitung . . . . .	39
3.6.1	Eigenschaften der Gärreste . . . . .	39
3.6.2	Verwertungswege der Gärreste . . . . .	40
3.6.2.1	Behandlung der Gärrestmischphase . . . . .	40
3.6.2.2	Behandlung der festen Gärrestphase . . . . .	41
3.6.2.3	Behandlung der flüssigen Gärrestphase . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Substratstudie</b>	<b>43</b>
4.1	Substratspezifische Eigenschaften . . . . .	43
4.1.1	Substratbeschreibung . . . . .	43
4.1.1.1	Wirtschaftsdünger . . . . .	43
4.1.1.2	Ernterückstände . . . . .	44
4.1.1.3	Speisereste . . . . .	44
4.1.1.4	Fettabscheider . . . . .	45
4.1.1.5	Schlachtabfälle . . . . .	45
4.1.1.6	Molke . . . . .	45
4.1.1.7	Biotonne . . . . .	46
4.1.1.8	Grün- und Strauchschnitt . . . . .	46
4.1.2	Substratbewertung . . . . .	46
4.1.2.1	Gaserträge . . . . .	46
4.1.2.2	Nährstoffgehalte . . . . .	47
4.1.2.3	Gliederung der Substrate nach dem Abfallverzeichnis . . . . .	48
4.1.2.4	Einteilung der Substrate nach der Vergütungsmöglichkeit des EEG 2012 . . . . .	48
4.1.2.5	wirtschaftliche Substratbewertung . . . . .	49
4.2	Biogasanlagen im Umkreis des Zementwerkes Gmunden . . . . .	56
4.3	Theoretisches und realistisches Substratpotential im Umkreis der Zementwerke	57
4.3.1	Theoretisches Substratpotential im Umkreis des Gmundner Zementwerkes	58
4.3.1.1	Landwirtschaftliche Substrate . . . . .	59
4.3.1.2	Schlachthöfe . . . . .	61
4.3.1.3	Molkereien . . . . .	63
4.3.1.4	Gastronomie / Kantinen . . . . .	63
4.3.1.5	Kommunen . . . . .	65
4.3.2	Theoretisches Substratpotential im Umkreis des Rohrdorfer Zementwerkes	66
4.3.2.1	Landwirtschaftliche Substrate . . . . .	66
4.3.2.2	Gastronomie, Kantinen und Schlachthöfe . . . . .	67



4.3.2.3	Kommunen . . . . .	67
4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung der Substratstudie . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Ermittlung eines Biogasanlagenkonzeptes</b>	<b>70</b>
5.1	Angenommene, bezogene Substratmenge für die Biogasanlage . . . . .	70
5.2	Konzeptvorüberlegungen . . . . .	71
5.2.1	Gärrestausbringung auf landwirtschaftliche Flächen . . . . .	71
5.2.1.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	71
5.2.1.2	Durchführung der Berechnung . . . . .	72
5.2.1.3	Ergebnisse und Schlussfolgerung . . . . .	73
5.2.2	Substrataufschluss mittels Bio-Extruder . . . . .	77
5.2.2.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	77
5.2.2.2	Durchführung der Berechnung . . . . .	77
5.2.2.3	Ergebnisse und Schlussfolgerung . . . . .	78
5.3	Grobdimensionierung der Biogasanlage . . . . .	80
5.3.1	Durchführung der technischen Berechnung und typische Kennwerte . . . . .	80
5.3.2	Durchführung der wirtschaftlichen Berechnung . . . . .	81
5.3.3	Ergebnisse der technischen Berechnung . . . . .	83
5.3.4	Ergebnisse der wirtschaftlichen Berechnung . . . . .	84
5.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Ermittlung eines Anlagenkonzeptes zur Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage</b>	<b>85</b>
6.1	Brennstoffbewertung . . . . .	85
6.1.1	Vergleich der Brennstoffe hinsichtlich wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien . . . . .	85
6.1.1.1	Durchführung der wirtschaftlichen Berechnung . . . . .	85
6.1.1.2	Vergleich der Brennstoffe bei optimistischen Biogaskosten des Gmundner Zementwerkes . . . . .	86
6.1.1.3	Ermittlung der maximal tolerierbaren Biogaskosten . . . . .	88
6.1.2	Vergleich der Brennstoffe hinsichtlich ihrer adiabaten Flammentemperatur . . . . .	89
6.1.2.1	Berechnung der adiabaten Flammentemperatur des Rohbiogases . . . . .	89
6.1.2.2	Ergebnisse der adiabaten Flammentemperaturrechnung des Rohbiogases . . . . .	90
6.1.2.3	Ergebnisse und Schlussfolgerung . . . . .	91
6.2	Konzeptvorüberlegungen . . . . .	93
6.2.1	Biogasverstromung vs. Biogasverfeuerung im Drehrohrofen . . . . .	93
6.2.1.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	93
6.2.1.2	Durchführung der Berechnung zur thermischen Biogasverwertung . . . . .	93

6.2.1.3	Durchführung der Berechnung zur Biogas Verstromung . . . . .	94
6.2.1.4	Wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der thermischen Biogasnutzung mit der Biogasverstromung . . . . .	97
6.2.1.5	dynamische Amortisationsrechnung einer Biogasverstromung .	100
6.2.2	Substitution der Brennstoffe Heizöl EL und Erdgas . . . . .	101
6.2.2.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	101
6.2.2.2	Überprüfung des Nutzens für das Rohrdorfer Zementwerk . . .	102
6.2.2.3	Auswirkung eines zusätzlichen Gasspeichervolumens auf den Substitutionsgewinn des Rohrdorfer Zementwerkes . . . . .	105
6.2.2.4	Überprüfung des Nutzens für das Gmundner Zementwerk . . .	107
6.2.3	Substitution der Brennstoffförderluft durch Gas . . . . .	108
6.2.3.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	108
6.2.3.2	Überprüfung des Nutzens . . . . .	109
6.2.3.3	Überprüfung der Durchführbarkeit . . . . .	109
6.2.4	Biomethan für den Kraftfahrzeugpark . . . . .	110
6.2.4.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	110
6.2.4.2	Durchführung der Berechnungen . . . . .	110
6.2.4.3	Ergebnisse der Kraftstoffsubstitution . . . . .	111
6.2.5	Trocknung und thermische Verwertung der Gärreste . . . . .	112
6.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerung . . . . .	113

## **7 Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche 115**

7.1	Stand der Technik der Filterpressen . . . . .	115
7.1.1	Aufbau und Prozessablauf einer Filterpresse . . . . .	115
7.1.2	Das DEHYDRY - Verfahren . . . . .	118
7.2	Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche mit einer Membranfilterpresse . . . . .	120
7.2.1	Die verwendete Membranfilterpresse . . . . .	120
7.2.1.1	Aufbau und Funktion der verwendeten Membranfilterpresse . .	120
7.2.1.2	Aufgenommene Messwerte . . . . .	123
7.2.2	Versuchsdurchführung . . . . .	124
7.2.2.1	Versuchsdurchführung der Klärschlammversuche . . . . .	124
7.2.2.2	Versuchsdurchführung der Bioschlammversuche . . . . .	127
7.2.3	Versuchsauswertung . . . . .	127
7.2.3.1	verwendete Formeln und Auszüge aus der Berechnungsdurchführung . . . . .	127
7.2.3.2	Ergebnisauszug und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	129
7.2.3.3	Befüllungs- Entwässerungs- und Trocknungseigenschaften des Klär- und Bioschlammes im Vergleich . . . . .	134

7.2.3.4	Brennwert, Heizwert und chemische Zusammensetzung des Klär- und Bioschlammes . . . . .	135
7.2.3.5	Gepulstes Vakuum . . . . .	137
7.3	Wirtschaftliche Betrachtung der Trocknung mittels Membranfilterpresse . . . . .	137
7.3.1	Einführung in die Problemstellung . . . . .	137
7.3.2	Durchführung der Berechnungen . . . . .	138
7.3.3	Ergebnisse und Schlussfolgerung . . . . .	141
7.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung . . . . .	145
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>146</b>

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Als energieintensive Branche gerät die Zementindustrie zunehmend unter Druck. Brennstoffe wie Kohle und Heizöl werden ständig teurer, aber auch die für die Zementherstellung sehr wichtigen Ersatzbrennstoffe wie Brennstoff aus produktionsspezifischen Gewerbeabfällen (BPGs) und Tetra-Pack-Rejekte sind am Markt hart umkämpft. Ein Vorteil der zuletzt genannten Brennstoffe liegt darin, dass diese meist einen biogenen Anteil aufweisen. Dem Zementwerk wird beim Einsatz solcher Brennstoffe nur ein Teil der entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen angerechnet. Ein Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Zement entsteht jedoch nicht durch das Verfeuern von Brennstoffen, sondern durch das Entsäuern von Kalkstein. Diese CO<sub>2</sub>-Emissionen können verfahrenstechnisch nicht vermindert werden. Da die Zementindustrie nur eine gewisse Menge an CO<sub>2</sub> emittieren darf, limitieren hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Brennstoffen die produzierbare Menge an Zement, wenn auf den Zukauf von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten verzichtet werden soll. Für viele Industrien erfolgt die Ausgabe von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten aufgrund von Benchmarks nur mehr teilweise kostenlos. Noch dazu wird jährlich die europaweite Gesamtmenge der Emissionsberechtigungen um 1,74 % verringert.

Aufgrund dieser Situation wird in der Zementindustrie nach der Erschließung neuer, möglichst CO<sub>2</sub> neutraler, Brennstoffquellen gestrebt.

Ein für die Zementindustrie komplett CO<sub>2</sub> neutraler Brennstoff könnte Biogas sein. Biogas ist jedoch ein teurer Brennstoff, wenn dieser zugekauft wird. Nach [12] konnte allgemein gezeigt werden, dass die Erzeugung eines kostengünstigen Brennstoffes möglich werden kann, wenn das Zementwerk unter bestimmten Rahmenbedingungen mit einer Biogasanlage gekoppelt wird.

Da die Umsetzbarkeit einer solchen Kopplung stark vom jeweiligen Standort abhängt, wird in dieser Arbeit konkret für das Zementwerk Rohrdorf und Gmunden geprüft, ob für diese Standorte ein solches Projekt rentabel sein kann. Da die Aufgabenstellung sehr breitgefächert ist, wird eine umfassende Literaturrecherche zum Stand der Technik in der Zementindustrie und dem Stand der Technik zu Biogas durchgeführt. Eine anschließend durchgeführte Substratstudie für das Rohrdorfer und Gmundner Zementwerk bildet die Grundlage für alle weiteren Überlegungen. Ein großer Schwerpunkt dieser Arbeit wird insbesondere auf standortspezifische betriebliche Möglichkeiten der Biogasverwertung und Gärrestentsorgung gelegt. Durch selbst durchgeführte Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche mit einer Membranfilterpresse sollen Erfahrungen auf dem Gebiet der Klär- und Bioschlamm-trocknung sowie der Gärrest-trocknung gesammelt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, Entscheidungsträgern eine Abschätzung über die Sinnhaftigkeit und die

## *1 Einleitung und Zielsetzung*

Umsetzbarkeit eines solchen Projektes zu ermöglichen und aus einer Bandbreite möglicher Verfahrensschritte der Biogaserzeugung und -verwertung jene Prozesse zu eruieren, die das größte wirtschaftliche Potential im Hinblick auf eine Kombination mit einem Zementwerk bergen.

Am Ende dieser Einleitung wird noch auf die Zitation in dieser Arbeit eingegangen. Befindet sich nach einem Punkt eine Zitatnummer, gilt dieses indirekte Zitat für den gesamten vorläufigen Text, falls dieser nicht durch einen Absatz oder eine weitere Zitatnummer getrennt wird. Befindet sich vor einem Punkt eine Zitatnummer, gilt dieses indirekte Zitat nur für den einen Satz.

## 2 Stand der Technik in der Zementindustrie

Zuerst wird in diesem Kapitel ein allgemeiner Überblick über die Zementherstellung gegeben. Anschließend wird die Zementherstellung im Zementwerk Gmunden und im Zementwerk Rohrdorf näher beschrieben und auf wichtige Betriebsparameter eingegangen.

### 2.1 Stand der Technik der Zementherstellung

Ziel dieses Unterkapitels ist es, dem Leser einen umfassenden Einblick in den Zementherstellungsprozess und die dabei verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu geben.

#### 2.1.1 Informationen über den Zementherstellungsprozess

Es gibt vier Hauptprozessverfahren der Zementherstellung. Das trockene Verfahren, das halbtrockene Verfahren, das halbnaasse Verfahren und das nasse Verfahren. Die Wahl des Prozesses hängt von der Feuchte der zur Verfügung stehenden Rohmaterialien ab. In Europa wird mehr als 90 % des Zementes mit dem trockenen Verfahren hergestellt. Da das Rohrdorfer und Gmundner Zementwerk das trockene Verfahren nutzen, wird auf die anderen drei Verfahren nicht näher eingegangen. Im trockenen Prozess wird das Rohmaterial zu einem fließfähigem Pulver gemahlen und getrocknet. Das trockene Rohmehl wird im Vorwärmer oder im Vorkalzinator aufgegeben. Alle vier Hauptprozesse haben die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Unterprozesse gemeinsam. [8]

##### 2.1.1.1 Rohmaterialgewinnung

Kalkstein, Kreide, Kalkmergel, Ton, Tonschiefer und Ölschiefer bilden die Ausgangsrohstoffe für die Zementherstellung. Neben diesen Rohstoffen werden noch Korrekturmaterialien wie siliciumhaltige Rohstoffe (Sand, Sandstein, Quarz), aluminiumhaltige Rohstoffe (Bauxit, Kaolin) und eisenhaltige Rohstoffe (Eisenerz, Kiesabbrände) eingesetzt. [25] Die Rohstoffe werden meist in Steinbrüchen im Tagebau durch Bohren, Sprengen, Knäppern und Reißen gewonnen. Dem Bergmann stehen dazu Radlader, Mobilbagger, Kettenlader, Kettenbagger und Kettendozer zur Verfügung. Um natürliche Rohstoffe zu schonen, können auch Prozessrückstände wie Hochofenschlacke, Asche, etc. für den Zementherstellungsprozess verwendet werden. [8] [24]

### **2.1.1.2 Rohmaterialaufbereitung**

Die aus dem Steinbruch antransportierten Rohmaterialien weisen je nach Gewinnung unterschiedliche Korngrößen auf. In einem Brecher werden die Materialien auf Schottergröße (bis 100mm) vorzerkleinert. Die Vorzerkleinerung wirkt sich positiv auf die Förderbarkeit sowie auf die anschließende Mahlung aus. [26]

Die Zusammensetzung der Rohmischung darf nur in engen Grenzen schwanken. Mit einem Mischbett ist es möglich, Schwankungen gering zu halten und dabei gleichzeitig einen Materialpuffer für die Versorgung der Rohmehlmahlanlagen bereitzustellen. Das vorzerkleinerte Steinbruchmaterial wird nach einem genau festgelegten Plan in Halden eingelagert. Die Vergleichmäßigung erfolgt beim Abziehen des Schotters mit Spezialgeräten durch Verschneiden. Üblicherweise besteht ein Mischbett aus einer Rundhalle oder zwei Längshalden, von denen eine abgebaut und die andere aufgebaut wird. Der Schottervorrat einer Halde sollte mindestens für eine Woche reichen. [26]

Eine konstante Zusammensetzung und eine gleichmäßige Feinheit des Rohmehls sind Voraussetzung für eine hohe Klinkerqualität. Um ein Rohmehl mit solchen Eigenschaften zu erhalten, müssen die unterschiedlichen Rohstoffe getrocknet und gemahlen werden.

Trocknungsanlagen können im Gleich- und im Gegenstrom betrieben werden. Eine schonende Trocknung wird mit einem Gleichstromverfahren erreicht, während mit einer Gegenstromtrocknung eine effizientere Trocknung erreicht werden kann. Zur Trocknung werden Trommeltrockner, Schnellrockner und Steigrohrrockner eingesetzt. Durch eine Mahltrocknung ist es möglich das Material zu mahlen und gleichzeitig zu trocknen. Alle Mahltrockner wie die Prall- oder Hammermühle, die Rohrmühle, die Aerofallmühle, sowie die Wälzmühle arbeiten im Gleichstromverfahren. [27]

Da die Homogenisierung der Rohstoffe durch die Mischwirkung des Mischbettes meist nicht ausreicht, wird eine zweite Homogenisierung durch eine möglichst geschickte Einlagerung des Rohmehls in die Silos erreicht. Durch eine anschließende pneumatische Homogenisierung können Schwankungen der chemischen Zusammensetzung reduziert werden. [28]

### **2.1.1.3 Brennstoffaufbereitung**

Die Brennstoffaufbereitung wird üblicherweise vor Ort durchgeführt. Kohle und Petrolkoks werden in Mühlen, die ähnlich der Rohmaterialaufbereitung sind, zu feinem Pulver gemahlen. Für die Kohlemahlung werden Walzenmühlen, Rohrmühlen und Prallmühlen eingesetzt. [8]

### **2.1.1.4 Klinkerproduktion**

Eine moderne Drehofenanlage besteht aus einem Vorwärmer, meist einen Calcinator, einen Drehrohrföfen und einen Klinkerkühler. In dieser Reihenfolge durchläuft das Rohmehl im Ge-

genstrom zu den Ofenabgasen die Anlage. [29]

### **Vorwärmer**

Beim Vorwärmen wird zunächst das im Brenngut physikalisch und chemisch gebundene Wasser entfernt (bis 700°C). In einem Temperaturbereich von 830 bis 950 °C findet die Vor-*Calcinierung* des Rohmehls statt.

Es gibt zwei Arten von Vorwärmer, den Rostvorwärmer und den Zyklonvorwärmer. Da der Rostvorwärmer nach dem Halbtrockenverfahren arbeitet, wird er in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. [30]

Der Zyklonvorwärmer besteht aus 3 bis max. 6 Zyklonstufen, die übereinander angeordnet sind. Je nach Klinkerkapazität der Ofenanlage sind die Zyklonvorwärmer ein- oder zweisträngig ausgeführt.

Die Rohmehlaufgabe findet vor dem letzten Zyklon statt. Das aufgegebene Rohmehl wird von dem Gasstrom aus dem vorletzten Zyklon erfasst und in den letzten Zyklon befördert, wo es vom Gasstrom abgeschieden wird. Durch Mehlschurren wird das abgeschiedene und vorgewärmte Rohmehl in die darunterliegende Zyklonstufe in den Gasstrom eingebracht. Dort wird das Rohmehl wieder vom Gasstrom erfasst und im vorletzten Zyklon abgeschieden, wo es wieder in die darunterliegende Zyklonstufe eingebracht wird. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange bis das auf circa 800 °C vorgewärmte Rohmehl die erste Zyklonstufe erreicht, um von dort dem Drehrohfen bzw. den *Calcinator* zugeführt zu werden. [30]

### **Calcinator und Ofeneinlauffeuerung**

Der *Calcinator* ist ein separater Brennraum im Übergangsbereich zwischen Drehrohr und Zyklonvorwärmer. Im *Calcinator* ist eine Vorentsäuerung des Kalksteins von über 90 % möglich. Durch eine vorgelagerte Entsäuerung kann der Drehrohfen kleiner und kostengünstiger ausgelegt werden. [32]

Das aus der zweituntersten Zyklonstufe austretende Heißmehl wird mit den heißen Ofenabgasen mitgerissen und in den *Calcinator* geführt. Im *Calcinator* werden Ofenabgas und Heißmehl im Gleichstrom geführt. Das Ofenabgas kühlt schlagartig von 1100 °C auf die Entsäuerungstemperatur von 830 °C ab. Um die endotherm ablaufende Entsäuerungsreaktion aufrecht zu erhalten, muss Brennstoff zugeführt werden. Anschließend wird das entsäuerte Heißmehl in der letzten Zyklonstufe abgeschieden und dem Drehrohfen zugeführt. [32]

Der *Calcinator* darf nicht mit einer Ofeneinlauffeuerung verwechselt werden die aber ebenfalls der *Calcinierung* des Heißmehles dient. Bei einer Ofeneinlauffeuerung, auch Zweitfeuerung genannt, werden die Brennstoffe in die Ofeneinlaufkammer oder in den Steigschacht zwischen Ofeneinlaufkammer und der untersten Zyklonstufe aufgegeben. Die Brennstoffe können direkt ohne Zuhilfenahme von Brennereinrichtungen aufgegeben werden. Die Feuerungswärme-



leistung der Ofeneinlauffeuerung kann bis zu 30 % der Feuerungswärmeleistung der Gesamtanlage betragen.[32]

Die Ofeneinlauffeuerung wie auch der Calcinator können mit niedrig kalorischen Brennstoffen beschickt werden, da die Anforderungen an die Verbrennung sehr niedrig sind. Es werden unaufbereitete oder nur sehr gering aufbereitete Sekundärbrennstoffe wie Altreifen, Gummischnitzel, Textilabfälle, Altholz und Klärschlamm verbrannt. Bei dem Einsatz von schwer brennbaren Stoffen kommt meist eine kohlenstaubbefeuerte Stützflamme zum Einsatz. [32]

### **Drehrohrofen**

Drehrohrofen sind unter 3 bis 4 Grad geneigte Stahlrohre, die sich mit 1,3 bis 3,5 Umdrehungen in der Minute drehen. Moderne Drehrohrofen sind zwischen 50 und 80 Meter lang und haben einen Durchmesser zwischen 3 und 7 Meter.

Um das Rohr vor den hohen Temperaturen im Inneren des Ofens zu schützen, ist es mit Feuerfestmaterial ausgemauert. Durch eine Lagerung auf Laufrollenstationen kann der Ofen um seine Längsrichtung gedreht werden. [31]

Das aus der untersten Zyklonstufe austretende, schon teilweise entsäuerte, Material gelangt mit ca. 800 bis 900 °C in das Drehrohr der Ofenanlage. Das heiße Abgas entsäuert in der Calzinierzone den Kalkstein. Aus Calciumcarbonat wird unter Freisetzung von CO<sub>2</sub> Calciumoxid. Dieser endotherme Vorgang findet bei Heißmehltemperaturen von 800 bis 900 °C statt.

In der Sinterzone wird das Brenngut von dem 2000 °C heißen Abgas auf etwa 1450 °C erhitzt. Bei Temperaturen über 1000 °C bilden sich aus dem Klinkermineral Belit und Calciumcarbonat das Klinkermineral Alit. Parallel bilden sich aus den ton- und eisenreichen Materialien Calcium-Aluminium- und Calcium-Aluminium-Eisen-Verbindungen. Diese Phasen machen die Bildung von Alit erst möglich. Sie beginnen ab 1300 °C zu schmelzen, wodurch das staubfeine Ofenmehl mit der Schmelze verklumpt. Es bilden sich die typischen zentimetergroßen Klinkergranalien aus.

Je nach Stellung des Drehofenbrenners entsteht im Drehofen eine kurze Abkühlzone (Vorkühlzone), bevor der Klinker mit etwas verminderter Temperatur den Ofen verlässt. [29] [31]

### **Drehofenfeuerung**

Die hohen Temperaturen und die benötigte Wärme für die Vorgänge in der Sinterzone müssen von der Drehofenfeuerung bereitgestellt werden. Man unterscheidet zwischen Feuerungen für feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe. Heutzutage kommen hauptsächlich Mehrstofffeuerungen zum Einsatz. Diese Brenner sind durch eine Vielzahl von Lanzen, Rohren und Ringkanälen charakterisiert, die flexibel die Verbrennung von festen gemahlene und grobstückigen, flüssigen und pastösen sowie gasförmigen Brennstoffen ermöglichen. [32]

Als Primärluft werden die durch den Brenner geführten Luftströme bezeichnet. Die Primärluft

lässt sich weiter in die Verbrennungsluft (Flammgestaltende Luftströme) und die Förder- und Zerstäuberluftströme für Brennstoffe unterteilen.

Den größte Teil der Verbrennungsluft stellt die Sekundärluft dar. Es handelt sich dabei um einen Teil der Kühlluft aus dem Klinkerkühler die eine Temperatur zwischen 700 und 1100 °C aufweist. Um möglichst hohe Flammentemperaturen zu erhalten, wird versucht, den Anteil der kalten Primärluft möglichst gering zu halten (8 bis 15 %).

Bei einer reinen Feuerung von gasförmigen Brennstoffen kann auf die Primärluft verzichtet werden, da kein Trägermedium benötigt wird. Als gasförmiger Brennstoff kommt hauptsächlich Erdgas als Zündhilfe für schwer entflammbare Flüssigkeiten und Feststoffe zum Einsatz. Gasförmige Brennstoffe müssen dem Brenner mit einem Druck von 4 bis 6 bar zugeführt werden. [32]

### **Bypassanlage**

Durch Verdampfung und anschließende Kondensation können in der Ofenanlage Anreicherungen von gewissen Stoffen durch die Bildung von Kreisläufen, entstehen. Besonders relevant ist die Alkalien-, Chlorid- und Sulfat- Anreicherung.

Man unterscheidet zwischen inneren und äußeren Kreisläufen. Bei inneren Kreisläufen (z.B. Alkalien) verdampfen die Stoffe im Ofen und gelangen über die Gase in die kälteren Zonen des Wärmetauschers, wo sie am Brenngut kondensieren. Die kondensierten Stoffe gelangen über das Brenngut, also über den Materialweg, wieder in einen Bereich höherer Temperaturen, wo sie sich wieder verflüchtigen.

Äußere Kreisläufe (z.B. leichtflüchtige Schwefelverbindungen, Quecksilber) finden zwischen Vorwärmer, Rohmühle und Abgasfilter statt. Dabei kondensieren flüchtige Komponenten auf dem Staub, der wiederum im Filter abgeschieden und mit dem Rohmehl in den Prozess zurückgeführt wird. [34]

Die Anreicherung von Kreislaufelementen muss unterbunden werden, da es bei höheren Konzentrationen zu Ansatzbildungen im Ofensystem kommen kann. Indem man einen Teil eines Stoffstroms aus dem Hauptstrom abzweigt und an diesem vorbei führt, kann ein Austrag von Kreislaufelementen erreicht werden. [34]

### **Klinkerkühler**

Der Klinkerkühler muss zwei wesentliche Aufgaben erfüllen. Zum einen muss er so schnell als möglich den Klinker unter 1000 °C abkühlen, damit sich die neu gebildeten Mineralien nicht in andere Verbindungen umwandeln, zum Anderen muss er die Sekundärluft und gegebenenfalls die Tertiärluft auf möglichst hohe Temperaturen vorwärmen, damit die notwendige Sintertemperatur von 1450 °C mit einem möglichst geringen Brennstoffeinsatz erreicht werden kann. [29] [33]

Der Kühlbereich der Ofenanlage lässt sich in drei Zonen unterteilen. In der Vorkühlzone wird

der Klinker noch im Ofen von der Sintertemperatur (1450 °C) auf ca. 1250 °C durch die eintretende Sekundärluft abgekühlt. Anschließend fällt der bereits leicht vorgekühlte Klinker in den Klinkerkühler, wo in der Rekuperationszone die Aufheizung der Verbrennungsluft stattfindet. In der Kühlzone wird der Klinker auf seine Endtemperatur auf ca. 100 bis 120 °C gekühlt. [33]

In der Klinkerkühlung finden Rostkühler, Satelliten- oder Planetenkühler und Rohrkühler Anwendung.

Heutzutage entsprechen Rostkühler dem Stand der Technik. Der Klinker fällt aus dem Drehrohr auf einen Rost der von unten mit Kühlluft durchströmt wird. Durch die Verwendung mehrerer Gebläse lassen sich in den unterschiedlichen Temperaturbereichen des Rostes unterschiedliche Luftmengen einstellen. Dadurch weisen Rostkühler einen erhöhten spezifischen Luftbedarf auf, die über die Kühlerabluft oder als Mittenluft abgeführt werden muss. Diese Abwärmequelle (bis 400°C) kann jedoch für andere Prozesse nutzbar gemacht werden. [33]

Beim Satellitenkühler fällt der Klinker durch Öffnungen im Ofenmantel in den Einlaufbereich der Kühlrohre, die auf dem Drehrohr des Ofens fest montiert sind. Der vordere Bereich der Kühlrohre ist feuerfest ausgemauert. Nach der Feuerfestausmauerung folgen unterschiedliche Einbauten, die die Grobkörner brechen sowie den Klinker zur Verbesserung der Kühlung umwälzen und in die Kühlluft einstreuen. Durch die leichte Neigung und die Drehbewegung des Kühlers durchwandert der Klinker den Kühler und wird über spezielle mitdrehende Austragschaufeln auf den Klinkertransport ausgetragen. [33]

### 2.1.1.5 Zementproduktion

Der Klinker und weitere Zementbestandteile werden in Silos gelagert. Um Zement zu erhalten, muss der Klinker zusammen mit Gips und Anhydrit vermahlen werden. [8]

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Durchlauf- und Umlaufmahlanlagen.

Bei den Durchlaufmahlanlagen wird das Mahlgut in der Mühle fertig gemahlen. Die Umlaufmahlanlagen unterscheiden sich von den Durchlaufmahlanlagen durch einen Sieb, der das aus der Mühle austretende Mahlgut in Fertiggut und Gries trennt. Die Gries werden dann erneut mit dem Frischgut in dem Mühleneinlauf aufgegeben. Diese Methode wird in der Praxis häufig eingesetzt, da sie sich als effizient erwiesen hat. [36]

Sichter trennen Feststoffpartikel nach definierten Kriterien aus einem Gasstrom. In Mahlanlagen für Zement, entfernen Sieb Feingut mit genügender Feinheit aus dem Mahlkreislauf. Dadurch wird Agglomeration und Pufferwirkung in der Mühle vermieden und die Energieausnutzung der Mahlung verbessert. [36]

Die bei dem Zementmahlprozess entstehende Wärme sowie der oft zu heiß eingesetzte Klinker,

wirken sich negativ auf die Fertigtgut Temperatur aus, weshalb eine Kühlung vorzusehen ist. Der Zement wird hauptsächlich durch Pulverkühler oder durch Wassereinspritzung im Mahlkreislauf gekühlt. [36]

### 2.1.2 Emissionen der Zementindustrie

Zu Beginn dieses Unterkapitels finden sich allgemeine Informationen über den Emissionsrechtehandel. Anschließend folgt eine Aufzählung möglicher Emissionsquellen eines Zementwerkes. Abschließend wird auf die Emissionsberechnungsmöglichkeiten für verschiedene Brennstoffe eingegangen.

#### 2.1.2.1 Emissionsrechtehandel

Zur Zeit befinden wir uns in der dritten Handelsperiode (2013 - 2020) des Emissionsrechtehandels, die im Gegensatz zu den beiden vorangehenden Handelsperioden durch EU-weit einheitliche Gesetze geregelt ist. [37] Dem Betreiber von gewissen Industrieanlagen steht pro Jahr eine begrenzte Menge von Emissionen zu. Stoßen die Betreiber mehr CO<sub>2</sub> aus als ihnen zusteht, müssen sie Emissionszertifikate von anderen Betreibern zukaufen, die ihre Zertifikate nicht benötigen. [61]

Um das Kyoto Protokoll erfüllen zu können wird in der dritten Handelsperiode die europaweite Gesamtmenge der Emissionsberechtigungen jährlich um 1,74% verringert.

Ebenfalls erfolgt die Ausgabe an Emissionsrechten für die Industrie nur mehr teilweise kostenlos. Diese wird noch dazu Jahr für Jahr schrittweise verringert.

Die Zuteilung kostenloser Emissionsrechte erfolgt auf der Grundlage von Benchmarks. Dies bedeutet, dass als Maßstab für die Zuteilung von Emissionszertifikaten die durchschnittlichen Emissionen der besten Anlagen herangezogen werden.

Industriebranchen, die durch diese Bedingungen von Abwanderung bedroht sind, bekommen auch weiterhin alle Emissionsrechte kostenlos zugeteilt. Die Zementindustrie fällt ebenfalls unter diese Regelung. Allerdings wird von der EU alle fünf Jahre entschieden, welche Branchen auf diese Art bevorzugt werden. [37] Zu berücksichtigen ist, dass diese bevorzugten Industrien nicht unbegrenzt kostenlos CO<sub>2</sub> emittieren dürfen. Wurden die zugeteilten CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate eines solchen Betriebes aufgebraucht, muss auch dieser Zertifikate zukaufen. [61]

#### 2.1.2.2 Treibhausgase der Zementindustrie

Die Treibhausgasemissionen der Zementindustrie lassen sich in direkte und indirekte Emissionen unterteilen. 69 % der direkten Treibhausgasemissionen können verfahrenstechnisch nicht vermindert werden, da sie durch die Entsäuerung des Kalksteins entstehen. Der restliche Teil der direkten Emissionen entfällt auf die Nutzung von Brennstoffen. Die indirekten Emissionen, die in etwa 10 % der Gesamtemissionen ausmachen, entstehen durch den Verbrauch von elektrischer Energie. [37]

Nach der EU Verordnung Nr. 601/2012 muss der Anlagenbetreiber eines Zementwerkes folgende potenziellen CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen berücksichtigen: Kalzinierung von Kalkstein in den Rohstoffen; konventionelle fossile Ofenbrennstoffe; alternative fossile Ofenbrennstoffe und Rohstoffe; Ofenbrennstoffe mit biogenem Anteil (Biomasse-Abfälle), andere Brennstoffe als Ofenbrennstoffe, ... [51] Zu berücksichtigen sind alle durch Prozesse entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit dem Klinkerherstellungsprozess in Verbindung stehen (z.B. die Brennstoff- oder Rohmehltrocknung oder der Betrieb von Notstromaggregaten, etc.). Nicht zu berücksichtigen sind CO<sub>2</sub>-Emissionen der Steinbruchfahrzeuge und sonstiger im Werk eingesetzter Kraftfahrzeuge. Ebenfalls noch nicht berücksichtigt werden CO<sub>2</sub>-Emissionen der Gebäudeheizung. Eine Aufnahme der durch die Raumkonditionierung entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen wird allerdings momentan diskutiert. [61]

### 2.1.2.3 Emissionsberechnungsmöglichkeiten für verschiedene Brennstoffe

Für die Bestimmung der Emissionen kann eine auf Berechnung beruhende Methodik oder eine auf Messung beruhende Methodik gewählt werden. Die auf Berechnung beruhende Methodik kann nach der Massenbilanzmethodik oder nach der Standardmethodik durchgeführt werden. Bei der Standardmethodik werden die Emissionen aus der Verbrennung für jeden Stoffstrom mit Hilfe eines entsprechenden Emissionsfaktors ermittelt. [51]

Da der Emissionsfaktor für Biomasse 0 beträgt fallen bei einer Verbrennung von reiner Biomasse keine Emissionen an. [51] Da Biogas durch die Vergärung von reiner Biomasse entsteht, ist der Emissionsfaktor für Biogas ebenfalls mit 0 anzusetzen. Die Vorkette sowie der Prozessenergieaufwand der Biogaserzeugung (Anlieferung der Substrate, elektrischer Energiebedarf der Pumpen etc.) wird nicht berücksichtigt. [52].

Liegt ein Brennstoffgemisch vor, also ein Brennstoff der sowohl Biomasse als auch fossilen Kohlenstoff enthält, wird der Emissionsfaktor durch die Multiplikation des vorläufigen Emissionsfaktors mit dem fossilen Anteil des Brennstoffs berechnet. Der Biomasseanteil und der fossile Anteil können durch Analysen oder durch Standardwerte ermittelt werden. [51]

## 2.2 Zementwerk Gmunden

Anschließend folgt eine Beschreibung des Zementherstellungsprozesses im Zementwerk Gmunden. Ebenfalls werden die eingesetzten Brennstoffe sowie Brennstoffmengen und die vorhandenen Abwärmequellen angeführt.

### 2.2.1 Zementherstellungsprozess

Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die einzelnen Prozessschritte des Zementherstellungsprozesses in Gmunden.

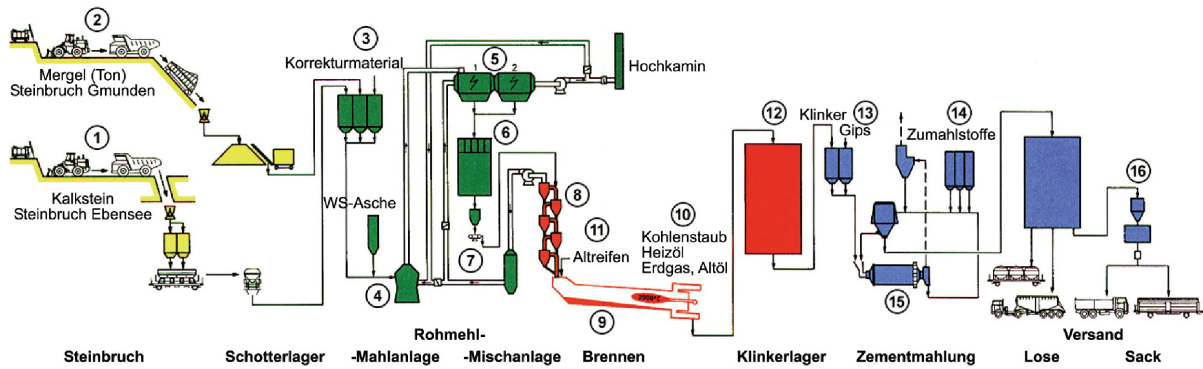


Abbildung 2.1: Schritte des Zementherstellungsprozesses in Gmunden [38]

Die Hauptkomponente Kalkstein wird durch Tiefbohrlochsprengung im Steinbruch Ebensee gewonnen. Der Kalkstein wird mit Radladern auf Schwer-LKW geladen und auf ca. 80 mm Stückgröße zerkleinert. Mit der Bahn wird der Kalkstein ins Zementwerk Gmunden transportiert.

Die zweite Hauptkomponente Mergel wird durch Tiefbohrlochsprengung im Steinbruch Gmunden gewonnen. Der Mergel wird mit Radladern auf Schwer-LKW geladen und anschließend mit einem Schrägaufzug ins Tal gebracht. Danach wird der Mergel in Vor- und Nachbrechern zerkleinert.

Um das Material zu vergleichmäßigen, wird es in einer Mischbetthalle in horizontalen Schichten der Länge nach eingebracht und vertikal am Querschnitt abgebaut.

Neben den beiden Hauptkomponenten werden in kleinen Mengen von 1 bis 5 % eisenhaltige Korrekturmateriale wie Kiesbrand oder LD-Schlacke eingesetzt. Über Dosierbandwagen werden die drei Rohmaterialbestandteile exakt gemischt und anschließend gemeinsam in einer Walzenschüsselmühle vermahlen. Das Mahlgut wird durch Ofenabgase getrocknet. Das sich im Ofenabgas befindliche Mahlgut wird über zwei Elektrofilter als Rohmehl ausgeschieden. Ein Teil des gereinigten Ofenabgases wird als Rezirkulationsluft zur Rohmühle zurückgeführt. Der restliche Teil des gereinigten Ofenabgases verlässt über den Kamin die Anlage. Das Zementwerk Gmunden verfügt über keine Anlage zur Minderung von Stickoxiden.

In einem Homogenisierungssilo wird das Rohmehl zwischengelagert und weiter vergleichmäßigt. [38]

Über eine Dosierbandwaage gelangt das Rohmehl in einen fünfstufigen Zyklonwärmetauscher. Dort wird das Rohmehl von den heißen Ofenabgasen auf Temperaturen von bis zu 900°C erhitzt. Einen Teil dieser Wärme stellt neben der Drehrohrfeuerung die Ofeneinlauffeuerung zur Verfügung, in der zerkleinerte Altreifen verfeuert werden.

Das im Zyklonwärmetauscher erwärmte Rohmehl tritt über die letzte Zyklonstufe in den Drehrohrföfen ein, in dem der Klinker erzeugt wird.

In einem Planetenkühler kühlt die angesaugte Sekundärluft den 1450 °C heißen Klinker auf circa 150 °C ab. Die durch den heißen Klinker vorgewärmte Sekundärluft dient der Drehrohr-

feuerung als Verbrennungsluft. Dabei handelt es sich um eine Mehrstofffeuerung in der Erdgas, Heizöl schwer, Staubkohle oder Flüssigabfälle thermisch genutzt werden. [38]

Gemeinsam mit Gips bzw. Anhydrit sowie weiteren Zumahlstoffen wird der Klinker in Rohrmühlen mit Kugelfüllung zu Zement vermahlen. Der Mahlprozess erfolgt in Umlaufmahlanlagen. Über einen Sichter wird die Mahlfeinheit des Zementes eingestellt. Für die Mahlung stehen 3 Mühlen mit jeweils 18 to/h, eine Mühle mit 45 to/h und eine Mühle mit 100 to/h zur Verfügung. [38]

### 2.2.2 Betriebsparameter

In folgenden Unterkapiteln wird auf den Brennstoffeinsatz und die Abwärmequellen im Zementwerk Gmunden eingegangen.

#### 2.2.2.1 Brennstoffeinsatz

Im Zementwerk Gmunden werden jedes Jahr in etwa 492.500 MWh an Brennstoffenergie benötigt. [38] Abbildung 2.2 zeigt die Anteile der in die Anlage eingebrachten Energiemengen der im Gmundner Zementwerk eingesetzten Brennstoffe.

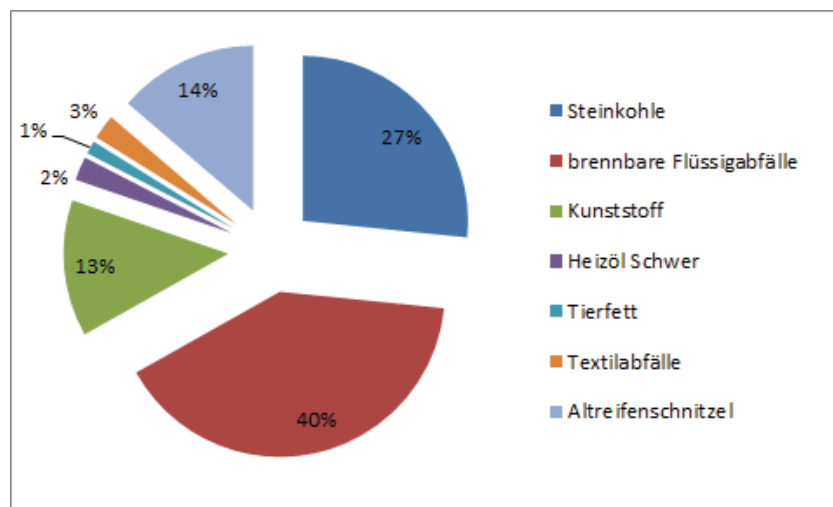


Abbildung 2.2: Prozentuale Aufteilung der im Gmundner Zementwerk eingesetzten Brennstoffe (nach energetischem Beitrag) [38]

#### 2.2.2.2 Abwärmequellen

Momentan verbleibt ein Großteil der im Gmundner Zementwerk vorhandenen Abwärme nach dem Wärmetauscherturm und ein Großteil der Klinkerkühlerabwärme ungenutzt. Alleine im Verdampfungskühler werden jedes Jahr über 66.000 MWh an thermischer Energie durch die Verdampfung von Wasser nicht genutzt. [38]

## 2.3 Zementwerk Rohrdorf

In diesem Unterkapitel findet sich eine Beschreibung des Zementherstellungsprozesses des Zementwerkes Rohrdorf. Ebenfalls werden die in Rohrdorf eingesetzten Brennstoffe sowie die vorhandenen Abwärmequellen angeführt. Neben dem Abhitzekraftwerk und der Selektiven katalytischen Reduktion von Stickoxiden (SCR) wird noch kurz auf den Lastzyklus des Rohrdorfer Werkes eingegangen.

### 2.3.1 Herstellungsprozess

Die Gewinnung, Lagerung und Aufbereitung der Rohstoffe sowie die Aufbereitung und Lagerungen der Produkte erfolgt ähnlich wie im Gmundner Zementwerk. Große Unterschiede weisen allerdings das Abgassystem, die Abgasreinigung sowie die Abwärmenutzung auf.

Abbildung 2.3 zeigt das Prozessschema des Rohrdorfer Zementwerks.

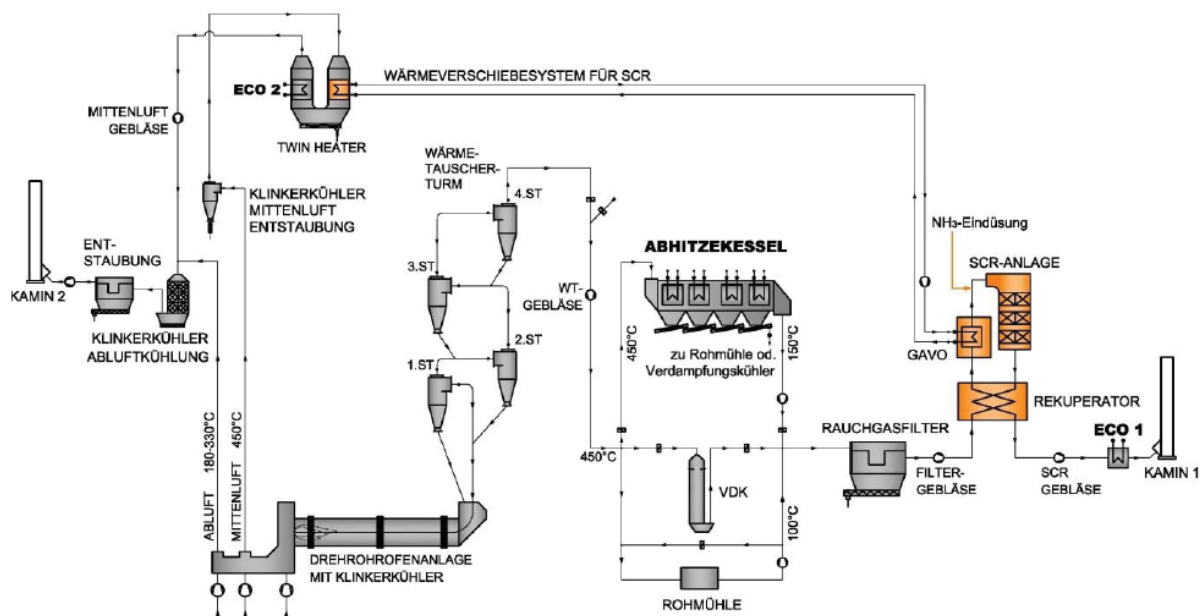


Abbildung 2.3: Prozessschema des Zementwerks Rohrdorf [9]

Wie im Gmundner Zementwerk wird auch im Rohrdorfer Zementwerk das gemahlene Rohmehl aus dem Rohmehlsilo dem vorletzten Zyklon des Wärmetauscherturms zugeführt. Es durchläuft den Wärmetauscherturm und den Drehrohrofen um schließlich als fertig gebrannter Klinker in den Klinkerkühler zu fallen.

Im Rohrdorfer Zementwerk kommt ein Pendelrostkühler der Firma IKN zum Einsatz. Der Klinker durchläuft durch Bewegungen des Vorschubrosts die Klinkerkammer. Durch Luftauslässe im Vorschubrost wird Kühlluft in die Klinkerkammer eingeblasen. Die Kühlluft im vorderen Bereich des Klinkerkühlers erreicht sehr hohe Temperaturen und dient als Verbrennungssekundärluft für die Primärfeuerung und als Verbrennungsluft für die Sekundärfeuerung.



Im mittleren Bereich des Klinkerkühlers werden Kühllufttemperaturen von circa 450 °C erreicht. Sollten aufgrund Betriebsunregelmäßigkeiten diese Temperaturen nicht erreicht werden kann zwischen dem Endluftabzug und dem Mittenluftabzug ein Hitzeschild abgesenkt werden. Die Mittenluft wird über das Mittenluftgebläse abgezogen und in einem Zyklon entstaubt. Mit der Energie der Mittenluft wird anschließend über ein Wärmeverschiebesystem das bereits vorgewärmte Abgas vor der SCR-Anlage erwärmt. Nach dem Wärmetauscher des Wärmeverschiebesystems weist die Mittenluft noch immer eine Temperatur von 325 °C auf. Über einen weiteren Wärmetauscher wird die Mittenluft auf 260 °C abgekühlt und anschließend entstaubt. Die übertragene Wärme dient der Vorwärmung des Hochdruckspeisewassers.

Im hinteren Bereich des Klinkerkühlers erreicht die Kühlluft nur mehr eine Temperatur von 180°C. Die Endluft geht als Abluft über die Klinkerkühler-Abluftkühlung und anschließend über eine Entstaubungsanlage ins Freie. [9]

Nach dem Wärmetauscherturm weist das Rauchgas aus dem Drehrohrofen noch eine Temperatur von circa 410 °C auf. Etwa ein Drittel des Rauchgases wird im Verbundbetrieb zur Trocknung des Rohmehls über die Rohmehlmühle geleitet. Befindet sich das Abhitzekraftwerk des Rohrdorfer Zementwerks in Betrieb, werden die restlichen zwei Drittel des Rauchgasstroms zur Verdampfung und Überhitzung des Kesselspeisewassers verwendet. Wird die Energie des Rauchgasstroms nicht benötigt, kühlt der Verdampfungskühler durch die Einspritzung von Wasser in den Rauchgasstrom das Rauchgas auf circa 150 °C ab. [9]

Anschließend wird das abgekühlte Rauchgas mit Schlauchfiltern entstaubt und über das Filtergebläse in den Rekuperator der SCR-Anlage gedrückt.

Im Rekuperator erwärmt sich das Rauchgas auf 230 °C. Durch das schon vorher angesprochene Wärmeverschiebesystem erreicht das Rauchgas nach einem zweiten Wärmetauscher die für die selektiv katalytische Reaktion notwendige Betriebstemperatur von 250 °C. Bevor das Rauchgas den Katalysator durchströmt, wird eine Ammoniaklösung in den Rauchgasstrom eingedüst. Im Katalysator werden anschließend die Stickoxide in  $\text{NH}_3$  und Wasser umgewandelt. Nach dem Katalysator gibt das Rauchgas im Rekuperator einen Teil seiner Wärme an das Rauchgas vor der SCR-Anlage ab.

Da das Rauchgas noch immer eine Temperatur von 160 °C aufweist, wird es zur Vorwärmung des Speisewassers für den Abhitzekessel verwendet. Das Rauchgas verlässt mit einer Temperatur von 140 °C als Abgas den Kamin. [9]

### 2.3.2 Eigenheiten des Rohrdorfer Zementwerks

Das Rohrdorfer Zementwerk betreibt als einzig westliches Zementwerk ein Abhitzekraftwerk mit Wasser-Dampf-Kreislauf und als einziges Zementwerk weltweit eine Reingas-SCR-Anlage zur Stickoxidminderung (Stand: April 2013). In Kapitel 2.3.2.1 und in Kapitel 2.3.2.2 werden beide Anlagen kurz beschrieben.

### 2.3.2.1 Abhitzekraftwerk

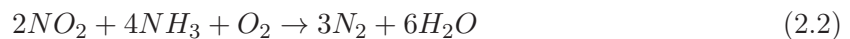
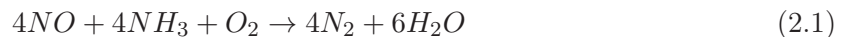
Ein Abhitzekraftwerk ist eine Anlage zur Umwandlung von Abwärme in elektrische Energie, wobei in Rohrdorf ein Abhitzekraftwerk mit Wasser-Dampf-Kreislauf zum Einsatz kommt.

Das Abhitzekraftwerk im Rohrdorfer Zementwerk weist einen thermischen Wirkungsgrad von 22 % auf und hat eine elektrische Nettoleistung von 5 bis 6 MW. Der externe Strombedarf des Werkes kann um ein Drittel reduziert werden. Dadurch wird eine jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von ca. 20.000 Tonnen erreicht. [10]

### 2.3.2.2 SCR Anlage

Die sekundäre katalytische Reduktion von Stickoxiden (SCR) ist ein Verfahren zur Entstickung von Abgasen, bei dem sehr hohe Entstickungsgrade und ein niedriger Ammoniakverlust erreichbar ist.

Unter der Zugabe von NH<sub>3</sub> werden an der Katalysatoroberfläche die im Rauchgas enthaltenen Stickoxide zu Stickstoff und Wasserdampf umgewandelt (siehe Formel 2.1 und Formel 2.2). [93]



### 2.3.3 Betriebsparameter

Neben dem Brennstoffeinsatz und den Abwärmequellen wird noch auf den Lastzyklus des Zementwerkes Rohrdorf eingegangen.

#### 2.3.3.1 Brennstoffeinsatz

Im Zementwerk Rohrdorf werden jedes Jahr in etwa 867.800 MWh an Brennstoffenergie benötigt [61]. Abbildung 2.4 zeigt die Anteile der in den Drehrohrofen eingebrachten Energiemengen der im Rohrdorfer Zementwerk eingesetzten Brennstoffe.

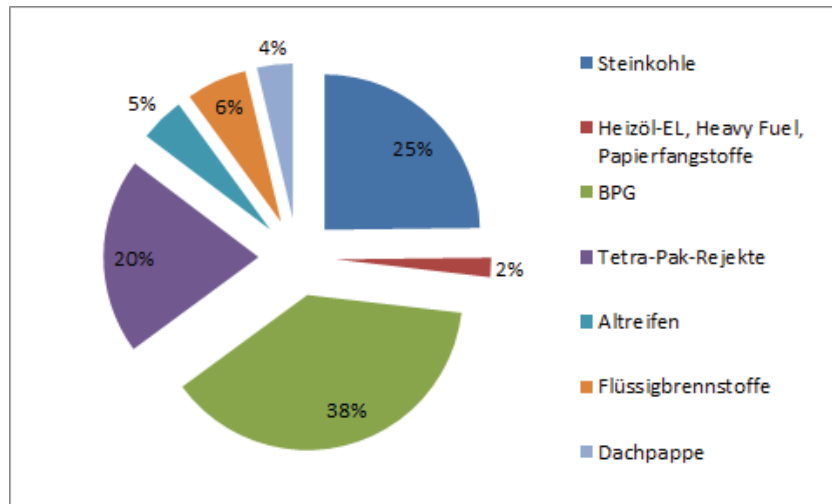


Abbildung 2.4: Prozentuale Aufteilung der im Rohrdorfer Zementwerk eingesetzten Brennstoffe (nach energetischem Beitrag) [61]

### 2.3.3.2 Abwärmequellen

Im Rohrdorfer Zementwerk wird die vorhandene Abwärme durch das Abhitzekraftwerk und die SCR-Anlage genützt. Um das Potential der noch vorhandenen Abwärmequellen zu bestimmen, wurden Temperatur- und Volumenstrommessungen an den Kaminen im Rohrdorfer Werk durchgeführt. Es wurden die Abwärmequellen der Zementmühlen eins bis vier, der Löschemühle und die Abwärme des Klinkerkühlerkamins bestimmt. Da sich die Löschemühle selten in Betrieb befindet, scheidet diese als brauchbare Abwärmequelle aus. Die vier Zementmühlen weisen eine Abgastemperatur zwischen 70 und 90 °C bei Normvolumenströme zwischen 20.000 und 60.000 m<sup>3</sup>/h auf. Die größte thermische Abwärmeleistung weist jedoch der Klinkerkühlerkamin auf, die immer dann zur Verfügung steht, wenn sich auch der Drehrohrofen im Betrieb befindet. Die Rauchgastemperatur des Klinkerkühlerkamines beträgt 145 °C bei einem stündlichen Normvolumenstrom von 150.000 m<sup>3</sup>. Kühlt man diesen Abgasstrom auf 100 °C ab, steht eine thermische Leistung von 2,3 MW zur Verfügung. [39]

### 2.3.3.3 Lastzyklus

Aufgrund betrieblicher Stillstände ist eine 100 % Auslastung eines Zementwerkes nicht möglich. Das Rohrdorfer Zementwerk ist circa 270 Tage im Jahr in Betrieb.

Am längsten steht das Werk bei der Winterrevision. Bei dieser wird die Anlage Anfang Dezember aus dem Betrieb genommen und je nach Auftragslage und Füllständen der Klinkersilos Anfang März oder etwas später in Betrieb genommen. Während der Winterrevision werden Instandhaltungsarbeiten wie z.B. die Erneuerung der Feuerfestauskleidung des Drehrohrofens durchgeführt. [61]

Neben der Winterrevision können beispielsweise durch Mauerschäden am Ofen längere Still-

standszeiten entstehen. Bricht ein Teil der Feuerfestauskleidung aus dem Ofen heraus, muss die gesamte Ofenanlage augenblicklich heruntergefahren werden, um eine Beschädigung des Drehrohrofens zu verhindern. Der Ofen braucht dann ungefähr zwei Tage, bis er weit genug abgekühlt ist, um an ihm Reparaturarbeiten durchführen zu können. Rechnet man zwei weitere Tage für die Reparaturarbeiten und zwei bis drei Tage für die Aufheizung des Ofens, dann kann erst nach einer Woche die Klinkerproduktion wieder aufgenommen werden.

Mauerschäden und andere Schäden an der Ofenanlage, die längere Stillstandszeiten erfordern, kommen allerdings eher selten vor (ungefähr einmal im Jahr).

Wesentlich öfter kommt es zu kurzen Stillständen der Ofenanlage (zwischen 2 und 8 Stunden) aufgrund Zyklonverstopfungen und Ofenanbackungen.

Die prozentuale Laufzeit der Ofenanlage in Rohrdorf beträgt in etwa 95 %. Dieser Wert bezieht sich rein auf die Sollbetriebstage, d.h. die Winterrevision und die abnahmebedingten Betriebsstillstände fließen nicht in die prozentuale Laufzeit mit ein. [61]

Die genehmigte Klinkerleistung im Zementwerk Rohrdorf liegt bei 3500 Tonnen Klinker pro Tag. Bei einer niedrigen Nachfrage nach Zement und vollen Klinkersilos wird zuerst die Produktionsmenge verringert (bis 3000 Tonnen Klinker pro Tag). Eine zu starke Verringerung der Produktionsmenge ist unwirtschaftlich, deshalb wird bei einer andauernden niedrigen Zementnachfrage die Klinkerproduktion eingestellt. [61]

Abbildung 2.5 zeigt die aufgetretenen Betriebsstillstände des Rohrdorfer Zementwerkes im Jahr 2012. Insgesamt betragen die Betriebsstillstände (inklusive Winterrevision) im Jahre 2012 2320 Stunden.

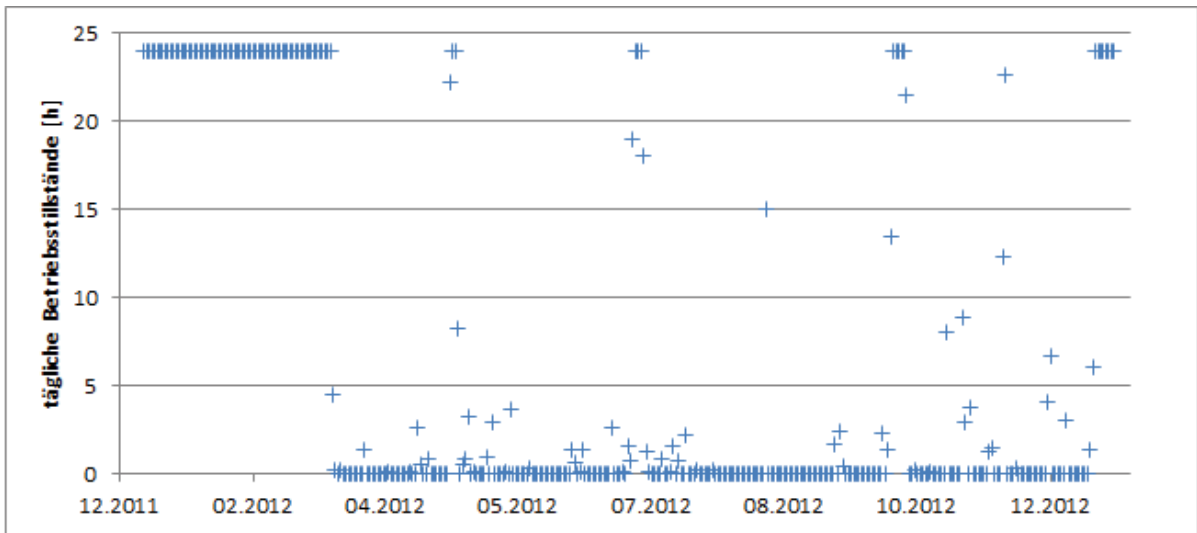


Abbildung 2.5: aufgetretene Betriebsstillstände des Rohrdorf Zementwerkes im Jahr 2012

### 3 Stand der Technik zu Biogas

Biogas ist ein brennbares Gemisch, welches zum Großteil aus Methan und CO<sub>2</sub> besteht. Biogas entsteht durch die anaerobe Vergärung von Biomasse. [11] In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Grundlagen des Biogasprozesses, auf die Eignung verschiedener Substrate und den Stand der Technik der Biogaserzeugung, -aufbereitung, -verwertung, und der Gärrestaubaufbereitung eingegangen.

#### 3.1 Grundlagen des anaeroben Abbaus

Der Gesamtprozess der Biogaserzeugung kann in vier wesentliche Einzelschritte unterteilt werden (siehe Abbildung 3.1).

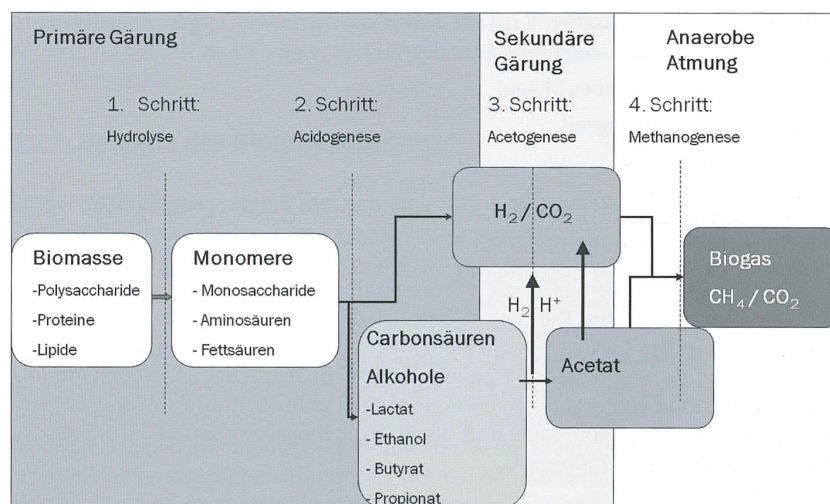


Abbildung 3.1: Schema des anaeroben Abbaus organischer Substanzen [11]

Bei der Biogaserzeugung handelt es sich um eine Mischgärung, bei der eine Vielzahl von Mikroorganismen beteiligt sind.

Der Abbau der organischen Substanz beginnt mit der primären Gärung. Primäre Gärer wie obligat oder fakultativ anaerobe Bakterien und Hefen sekretieren Exo-Enzyme, die die komplexen Makromoleküle der Ausgangsstoffe durch das Auftrennen der Wasserstoffbrückenbindungen bei gleichzeitiger Einbindung von Wasser auflösen. Dieser Schritt wird Hydrolyse genannt. [11]

Im zweiten Konversionsschritt der Acidogenese werden die von den primären Gärern aufgenommenen Einzelbausteine von den Mikroorganismen zu organischen Säuren, Alkoholen und

Kohlenstoffdioxid umgewandelt. [11]

Der optimale pH-Wert für die primären Gärer liegt zwischen pH 5,2 bis 6,3. Diese sind aber nicht zwingend auf diesen pH-Werte-Bereich angewiesen und können auch bei geringfügig höheren pH-Werten noch Substrate umsetzen. Allerdings wird ihre Aktivität geringfügig vermindert. [18]

Die sekundären Gärer setzen im dritten Schritt die gebildeten Säuren und Alkohole zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid um. Die acetogenen Bakterien können nur bei einem sehr niedrigen Wasserstoffpartialdruck Stoffwechsel betreiben. Da sie selber Wasserstoff produzieren, müssen sie in enger Symbiose mit methanogenen Bakterien leben. Diese verbrauchen den produzierten Wasserstoff, wodurch ein niedriger Wasserstoffpartialdruck erreicht wird. [11]

Die Methanogenese stellt den vierten und letzten Konversionsschritt dar. Methanogene Mikroorganismen, die der Gruppe der Archaeen zugeordnet werden können, bilden aus Essigsäure bzw. aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid das Methan und Kohlenstoffdioxid des Biogases. Während es sich bei der direkten Umwandlung von Essigsäure in Methan und Kohlenstoffdioxid um eine einfache Disproportionierung handelt, findet bei der Bildung von Methan aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff ein Vorgang der anaeroben Atmung statt. [11]

Die essigsäure-bildenden Bakterien und die methanogenen Archaeen benötigen unbedingt einen pH-Wert im neutralen Bereich bei 6,5 bis 8. [18]

## 3.2 Substrate

Zuerst wird allgemein auf Biogassubstrate und deren Vergärbarkeit eingegangen. Anschließend wird die Notwendigkeit der Hygienisierung gewisser Substratkategorien angeführt. Ebenfalls wird ein Überblick über die momentan vorhandenen oder sich in Entwicklungsstadien befindlichen Substrataufschlussverfahren geboten.

### 3.2.1 Eignung verschiedener Substrate zur Biogasgewinnung

Grundsätzlich sind alle organischen Stoffe anaerob als auch aerob teilweise abbaubar. Festes, strukturreiches Material (z.B. Baum oder Strauchschnitt) eignet sich jedoch besonders für die aerobe Behandlung (also für die Kompostierung), während flüssiges, nasses Material (z.B. Gülle, Speiseabfälle, Fette) sich hervorragend zur anaeroben Behandlung eignen. [14]

Abbildung 3.2 zeigt die Stoffgruppen, in die jedes Substrat eingeteilt werden kann.

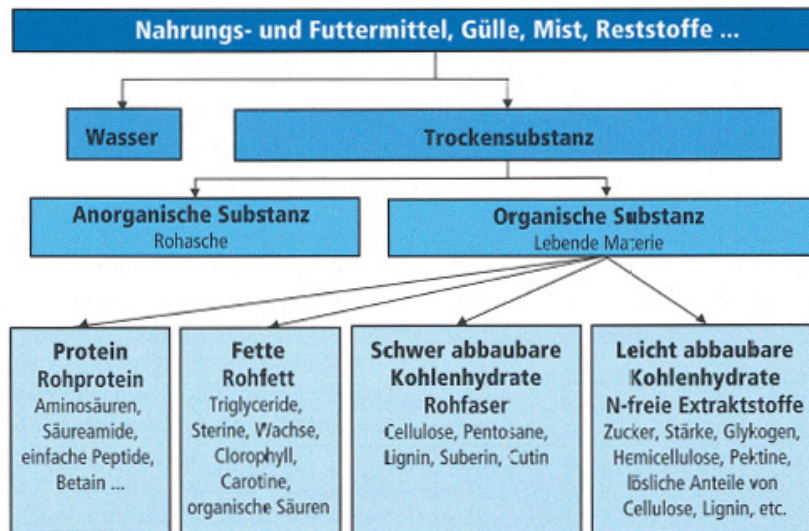


Abbildung 3.2: Einteilung der Substrate in die Stoffgruppen Proteine, Fette und Kohlenhydrate nach Kirchgeßner [14]

Jedes Substrat besteht zu einem gewissen Anteil aus Wasser und Trockensubstanz, von der aber nur der organische Anteil in Biogas umgewandelt werden kann. Der anorganische Anteil besteht aus Sand, Erde, Steinen etc. die in die organische Substanz gelangen.

Die organische Substanz lässt sich weiter in Proteine, Fette sowie leicht und schwer abbaubare Kohlenhydrate unterteilen.

Fette sind stets Gemische verschiedener Triglyceride und werden zu Fettsäuren und Glycerin abgebaut. Zu viel Fett führt zur Anhäufung von organischen Säuren, wodurch der pH-Wert sinkt und die Essigsäure- und Methanbildung gehemmt wird.

Proteine enthalten neben Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff noch Stickstoff, Schwefel und Phosphor. Sie werden in Peptide, dann in Aminosäuren und letztendlich zu organischen Säuren abgebaut.

Bei den Kohlenhydraten wird zwischen einfach abbaubaren (Zucker, lösliche Anteile von Cellulose, Hemicellulose, etc.) und schwer abbaubaren Kohlenhydraten (Cellulose, Lignin, Pentosane etc.) unterschieden. Kohlenhydrate werden von den Bakterien in Einfachzucker gespalten und bis zu niederen Fettsäuren zerlegt. Stärke und zuckerreiche Substrate führen zu einem Anstieg der Propionsäure und Buttersäure, während Cellulose, also rohfaserreiches Substrat, das Fettsäuremuster zugunsten der Essigsäure verschiebt. [14]

Der Anteil der Stoffgruppen Proteine, Fette und Kohlenhydrate bestimmt die Gasausbeute und die Methankonzentration des Biogases: [14]

- Eiweiß: 700 l Biogas pro kg oTS , 71 % Methananteil
- Fette: 1250 l Biogas pro kg oTS, 68 % Methananteil
- Kohlenhydrate: 790 l Biogas pro kg oTS, 50 % Methananteil

Zu beachten ist auch die Abbaugeschwindigkeit der Substrate. Während Zucker und Stärke aufgrund ihrer einfachen Struktur sehr schnell abgebaut werden, nimmt der Abbau von Cellulosen und Hemicellulosen viel Zeit in Anspruch, da diese eine reich verzweigte, komplexe Struktur aufweisen. [14]

Die Zugabe von leicht abbaubaren Substraten wie z.B. Getreideschrot, frischer Senfsaat oder Zuckerrüben führt zu einer Vergrößerung der Bakterienmasse, die sich wiederum positiv auf den Abbau von schwerer abbaubaren Material auswirkt. Bei der Zugabe von leichter abbaubaren Substraten sollte darauf geachtet werden, den Fermenter nicht zu übersäuern und somit die methanbildenden Bakterien zu hemmen.

Ebenfalls kann durch die Zugabe von Enzymen wie z.B. Cellulasen der anaerobe Abbau der Substrate unterstützt werden. Durch die Zugabe von Silikaten oder Tonmineralen kann die Besiedlungsfläche für Bakterien erhöht und ein höherer Abbaugrad erzielt werden. [14]

Zum Aufbau ihrer Zellsubstanz benötigen die Bakterien Vitamine, Mineralstoffe und Spurenelemente. Mist, Gülle, Panseninhalte, Küchenabfälle, Essensreste, Treber, Schlempe und Molke enthalten genügend Gesamtnährstoffe und können prinzipiell alleine vergoren werden.

Das C : N- Verhältnis gibt die Relation des Gesamtkohlenstoffgehalt zum Gesamtstickstoffgehalt an und sollte 10 : 1 bis 30 : 1 betragen. Sinkt das C : N- Verhältnis unter 8 : 1, ist eine starke Bakterienhemmung aufgrund der hohen Ammoniumgehalte im Substrat möglich.

Auch Schwermetalle sind in geringen Konzentrationen für die Bakterien wichtig. Bei größeren Konzentrationen können diese Substanzen aber auch hemmend und sogar toxisch wirken. Ein Mangel an Spurenelemente kann aufgrund der Fällung und Austragung mit Schwefel auftreten. [14]

#### 3.2.2 Anforderungen an die Hygienisierung

Werden tierische Nebenprodukte in Biogasanlagen eingesetzt, müssen die in der Tiermaterialienverordnung BGBl. II Nr. 141/2010 (Anhang IV) festgelegten, prozesstechnische Anforderungen an die Hygienisierung eingehalten werden. [69]

Gemäß EU Verordnung werden TNP in drei Risikokategorien eingeteilt.

Die Materialien der Kategorie 1 stammen sämtlich aus Risikobereichen.

Beispiele für TNP der Kategorie 1 sind: [80]

- Darmpaket (voll/leer) vom Rind
- Flotat-Siebreste aus Abwasserbehandlung über 6 mm
- TSE (Transmissible spongiforme Enzephalopathie) verdächtige oder positiv getestete Tiere

Die Materialien der Kategorie 2 stammen nicht aus Risikobereichen, betreffen jedoch sonstige, eventuell tierseuchenrelevante Herkünfte oder mögliche Kontaminationen oder es handelt sich



### 3 Stand der Technik zu Biogas

um tierische Nebenprodukte, die nicht unmittelbar aus der Lebensmittelgewinnung stammen oder Mängel aufweisen.

Beispiele für TNP der Kategorie 2 sind: [69]

- Magen- und Darminhalte vom Rind
- Magen, Dick- und Dünndarm (voll) oder nur Inhalte von Magen und Darm vom Schwein
- Tiermaterialien aus der Abwasserbehandlung
- Flotat-Schlämme bzw. Pressfilterrückstände von Mast- und Schlachtbetrieben
- Gülle und Mist
- Milch, Kolostrum

Materialien der Kategorie 3 stammen aus Verarbeitungsprozessen und weisen keine Anzeichen auf übertragbare Krankheiten auf.

Beispiele für TNP der Kategorie 3 sind: [69]

- Schlachtkörperteile ohne Anzeichen einer Krankheit
- Blut, Häute, etc. von Tieren ohne klinische Anzeichen einer übertragbaren Krankheit
- Magen und Darm (ohne Inhalt; nicht Rinderdarm!)
- Küchen- und Speisereste (einschließlich Altspisefette), die für die Biogasanlage oder Kompostierung bestimmt sind
- ehemalige Lebensmittel tierischen Ursprungs

TNP der Kategorie 1 werden nur beseitigt.

TNP der Kategorie 2 können neben der Verbrennung nach entsprechender Vorbehandlung auch in zugelassenen Verwertungsanlagen oder in Biogas- oder Kompostierungsanlagen verarbeitet und als organische Dünge- oder Bodenverbesserungsmittel verwendet werden.

TNP der Kategorie 3 aus Schlacht- bzw. Fleischverarbeitungsbetrieben werden von speziellen Verarbeitungsbetrieben oder Tierkörperbeseitigungsanlagen zu verschiedenen Produkten weiterverarbeitet. Generell können sämtliche Abfälle der Kategorie 3 in zugelassenen Biogas- und Kompostieranlagen verwertet werden.

Die verschiedenen TNP sollten vom Anfall bis zur Verwertung nach Kategorien getrennt bleiben, da bei einer Vermischung der Kategorien alle TNP der Mischkategorie entsprechend den gesetzlichen Vorgaben der niedrigeren Kategorie verarbeitet und verwertet werden müssen. [69]

Die Prozessführung der anaeroben Behandlung biogener Abfälle kann mesophil (37 bis 42 °C

[18]) oder thermophil (50 bis 60 °C [18]) erfolgen.

Um bei thermophiler Prozessführung die erforderliche Hygienisierung zu gewährleisten, sind folgende Parameter einzuhalten: [69]

- Temperatur  $\geq 55$  °C
- (rechnerisch ermittelte) hydraulische Verweilzeit 20 Tage mit (tatsächlicher) garantierter Mindestaufenthaltszeit von 24 h
- Partikelgröße  $\leq 12$  mm

Bei mesophiler Prozessführung findet die erforderliche thermische Hygienisierung nicht statt. Die Hygienisierung hat hier in einem zusätzlichen Prozessschritt vor oder nach der Fermentation durch eine Erhitzung des Materials zu erfolgen. [69]

- Variante 1: Temperatur  $\geq 70$  °C, Aufenthaltszeit 1 h, Partikelgröße  $\leq 12$  mm
- Variante 2: Temperatur  $\geq 60$  °C, Aufenthaltszeit 5 h, Partikelgröße  $\leq 12$  mm

Eine Hygienisierung kann auch durch nachfolgende Kompostierung des Gärrückstandes gemäß den Vorgaben der Kompostverordnung erreicht werden.[69]

Werden tierische Nebenprodukte der Kategorie 2 in Biogasanlagen vergoren, muss eine Hygienisierung des Materials in einer Dampfdrucksterilisationsanlage bei 133 °C, 3 bar, Partikelgröße  $< 50$  mm bei einer Aufenthaltszeit von mindestens 20 Minuten (ab Erreichen der Kerntemperatur von 133 °C) erfolgen. Gülle, Magen- und Darminhalte (von Magen und Darm getrennt), Milch und Kolostrum sind von dieser Verordnung ausgeschlossen und dürfen ohne Vorbehandlung als Inputmaterial in Biogasanlagen eingebracht werden, sofern keine seuchenrechtlichen Beschränkungen entgegenstehen [74]. [69]

Oben angeführte Hygienisierungsmaßnahmen müssen für Tierische Nebenprodukte erfüllt werden.

Tierische Nebenprodukte (TNP) sind ganze Tierkörper, Tierkörperteile oder Erzeugnisse tierischen Ursprungs, die nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind. TNP stammen aus der Milchverarbeitung, der Schlachtung, der Fleischverarbeitung, dem Lebensmittel-Einzelhandel, Restaurants, Catering-Einrichtungen sowie Groß und Haushaltsküchen (Küchen- und Speiseabfälle pflanzlichen und tierischen Ursprungs), der Landwirtschaft. [69]

#### 3.2.3 Substrataufschluss (Desintegration)

Unter einer Substrataufbereitung in Sinne eines Zellaufschlusses versteht man das Aufbrechen von organischen Zellen, um dadurch eine leichtere Fermentierung zu bewirken. [19]

Im Falle von Biogasanlagen, in die viele pflanzliche Gerüstsubstanzen wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin gelangen, ist die Hydrolyse der geschwindigkeitsbestimmende Prozess. [15] In den

meisten Fällen sind die Cellulose-Fasern in eine Matrix aus anderen strukturellen Biopolymeren, hauptsächlich Hemicellulose und Lignin, eingebettet (siehe Abbildung 3.3). Dieser Strukturaufbau wirkt einem biologischen Abbau entgegen. Durch eine Auflösung der Schutzwirkung der anderen Biopolymere kann eine schnellere Umsetzung der Cellulose und der Hemicellulose zu vergärbaren Zuckerbausteinen erreicht werden. [41] [53]

Ebenfalls führt der Zellaufschluss zu einer verbesserten Viskosität der eingesetzten Substrate, wodurch die Rührfähigkeit und Homogenisierbarkeit sowie der Stofftransport des eingesetzten Materials verbessert wird. Einer Verkleinerung des nutzbaren Reaktionsraumes durch Schwimmschichten und Ablagerungen an den Fermenterwänden und Böden, sowie möglichen Betriebstörungen durch Verstopfungen kann somit entgegengewirkt werden. Ein weiterer positiver Effekt kann die geringere Energieaufnahme des Rührwerkes durch eine verbesserte Rührfähigkeit des Substrates darstellen. [42]

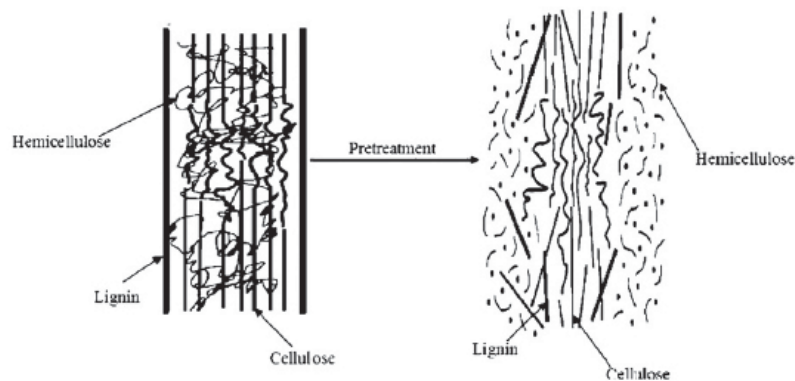


Abbildung 3.3: Aufschluss der Zellstruktur [40]

Abbildung 3.4 gibt einen Überblick über die möglichen Substratvorbehandlungen mit denen die Zellstruktur aufgeschlossen werden kann.

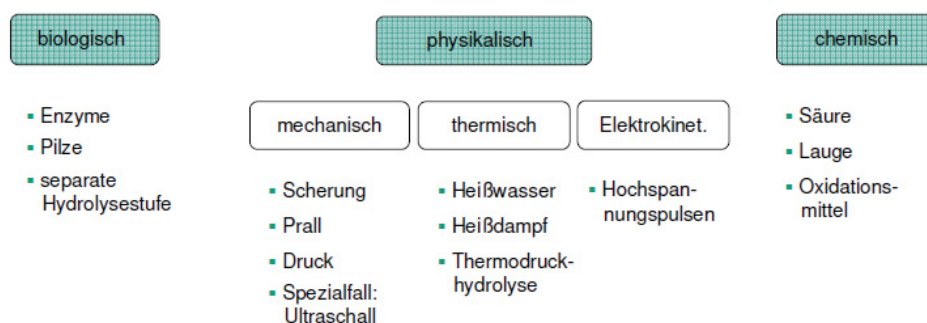


Abbildung 3.4: Überblick über die möglichen Substratvorbehandlungen, verändert nach [42]

Anschließend werden die möglichen Substratvorbehandlungen und ihre Wirkung kurz beschrieben. Auf die separate Hydrolysestufe wird nicht eingegangen, da diese im Kapitel 3.3 ausführlich

beschrieben wird. Der Zellaufschluss mittels Pilze wird in diesem Kapitel ebenfalls nicht behandelt, da diese Technologie noch von keinem Anbieter angeboten wird (Stand: April 2013).

#### 3.2.3.1 Enzyme

Ein Enzym ist ein Stoff der eine oder mehrere biochemische Reaktionen katalysieren kann. Im ersten Schritt der Biogaserzeugung spalten Enzyme die Makromoleküle (Polymere) der Ausgangsstoffe durch das Auftrennen der Wasserstoffverbindungen in Monomere (Vergleich Kapitel 3.1). Normalerweise werden diese Enzyme von den primären Gärern ausgeschieden. Durch eine externe Zugabe von Enzymen soll eine schnellere Spaltung der Makromoleküle und dadurch eine schnellere Umsetzung der Substrate zu Biogas erreicht werden. [43]

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Vorteile dieses Substrataufschlusses in dem geringen apparativen und energetischen Aufwand liegen, wodurch dieses Verfahren jederzeit ohne große Risiken ausprobiert werden kann. Die Ergebnisse des Verfahrens variieren jedoch je nach Anlage und verwendeten Substraten sehr stark. [42]

#### 3.2.3.2 Thermische Verfahren

Bei der thermisch induzierte Hydrolyse (TiH) der Firma Demetrium GmbH. handelt sich um ein kontinuierliches Verfahren bei dem die Biomasse unter hohem Druck erhitzt wird. Nach einer definierten Verweilzeit wird das Substrat abgekühlt und geregelt entspannt. Dadurch werden schwer abbaubare Substrate wie Gras, Stroh oder Mist thermisch aufgeschlossen und so für die Fermentation verfügbar gemacht. [45]

Dieses Verfahren konnte sich jedoch nicht durchsetzen, da nur bei sehr eiweißhaltigen Stoffen ein störungsfreier Betrieb gewährleistet werden konnte. Weist das zu behandelnde Substrat einen zu hohen Cellulose Anteil auf, kann es zu einer Aufkohlung des eingesetzten Materials kommen. Mittlerweile wird nicht mehr in diesem Bereich geforscht. [54]

#### 3.2.3.3 Elektrokinetische Verfahren

Als Beispiel eines elektrokinetischen Substrataufschlusses kann die Desintegration mittels Bio-Crack der Firma Vogelsang genannt werden. Bei diesem Verfahren durchfließt das Medium einen Behandlungsraum in dem ein Hochspannungsfeld erzeugt wird. Durch die auftretenden elektrischen Kräfte wird die Flockenstruktur des Schlammes aufgelöst. Durch diese Zerkleinerung des Substrates wird die Verfügbarkeit von Nährstoffen für die fermentierenden Bakterien erhöht und die organischen Frachten werden besser abgebaut. [57]

#### 3.2.3.4 Mechanische Verfahren

Der mechanische Substrataufschluss kann über Schneiden, Extrusion und Mahlen erfolgen. Durch diese Verfahren wird zum einen die Partikelgrößenverteilung und zum anderen die Partikelstruktur verändert. [42] Der Aufschluss über Ultraschall ist ebenfalls den mechanischen Verfahren zuzuordnen, wird aber in einem separaten Kapitel behandelt.

##### Lochscheibenzerkleinerer

Als Beispiel eines Schneideverfahrens kann der Lochscheibenzerkleinerer der Firma Vogelsang (Produktnahme: RotaCut) genannt werden. Bei diesem Verfahren durchströmt das Medium kontinuierlich den RotaCut. Dabei werden Schwimm- und Schwebstoffe durch rotierende Messer zerkleinert. Es erfolgt eine Homogenisierung des eingebrachten Mediums. Fremdkörper wie Steine und Metallteile werden aufgrund ihres Gewichtes abgeschieden. [46]

##### Dispergiermaschinen

Die Dispergierung wird normalerweise für die Herstellung von Farben genutzt. Die Firma Niemann hat eine Dispergiermaschine für die Substrataufbereitung entwickelt. Bei diesem Verfahren zerkleinert eine schnell laufende Messerscheibe das Substrat in einer Flüssigkeit so lange, bis ein homogenes pumpfähiges Medium entsteht. Vor jeder Homogenisierung wird zuerst die Flüssigkeit und dann das Substrat in den Mischbehälter der Dispergiermaschine eingebracht. Es handelt sich also um ein diskontinuierliches Verfahren. [47]

Die Firma EnviTec stellt ebenfalls Dispergiermaschinen für Biogasanlagen her.

##### Prallreaktoren

Der Aufschluss mittels Prallreaktor funktioniert ähnlich wie die Dispergierung mit dem Unterschied, dass bei diesem Verfahren rotierende Ketten zum Einsatz kommen.

Das Verfahren kann diskontinuierlich oder kontinuierlich betrieben werden. Durch eine kontinuierliche Betriebsweise lassen sich höhere Massedurchsätze, allerdings auf Kosten der Aufschlussleistung, erzielen. Der Ablauf des diskontinuierlichen Betriebes dauert ungefähr 30 Sekunden, wobei jeweils 10 Sekunden auf die Beschickung, den Aufschlussprozess und den Austrag entfallen.

Der Materialaufschluss erfolgt durch Aufprallen der Ketten auf das Substrat, wobei dieses zerkleinert wird. [48]

##### Doppelschneckenextruder

Die Firma Lehmann Maschinenbau GmbH hat einen Doppelschneckenextruder entwickelt, in dem das Substrat durch hohen Druck und hoher Temperatur zerkleinert und bis in die Zellstruktur aufgeschlossen wird. Neben den üblichen Vorteilen eines Substrataufschlusses wirbt die Firma mit einem verringerten thermischen Energiebedarf für den Fermenter, da das aufbereitete Substrat eine erhöhte Temperatur aufweist. Dieses Verfahren gilt aufgrund seiner guten

Aufschlussleistung als vielversprechend. [49]

#### **Hammermühlen**

Bei Hammermühlen wird das Substrat durch pendelnd aufgehängte Hämmer zerkleinert. Durch ein hydraulisch verstellbares Sieb im Auslauf der Mühle kann die Produktstruktur gezielt beeinflusst werden. Hammermühlen weisen eine hohe Störstofftoleranz auf. [50] Die Firma Huning Maschinenbau ist ein Hersteller von Hammermühlen.

#### **3.2.3.5 Ultraschallverfahren**

Das Ultraschallverfahren kommt ursprünglich aus der Klärschlammbehandlung.

Wird ein Biofeststoff mit Ultraschall behandelt, ist er einer periodischen Kompression und Dehnung ausgesetzt. Bei hoher Schallintensität zerreißt das Medium der Substanz, während der Phase des Unterdrucks. Es bilden sich, aufgrund der verringerten Siedetemperatur, kleine Wasserdampfblasen in der Flüssigkeit, die in der darauffolgenden Druckphase implodieren (Kavitation). Bei einem enormen Druck von bis zu 500 bar und einer Temperatur von bis zu 5200 Kelvin entstehen dadurch große Scherkräfte, welche die Wände von organischen Zellen, Bakterien und Pilzen aufreißen. [55]

#### **3.2.3.6 Chemische Verfahren**

Der chemische Substrataufschluss ist mittels Säuren, Laugen und durch Oxidation möglich. [42] Das Unternehmen maxbiogas hat ein Verfahren entwickelt, dass ähnlich wie bei den Verfahren aus der Papierindustrie eine Trennung von Lignin und Cellulose durch Zugabe von Chemikalien ermöglicht. Anders als bei den Verfahren aus der Papierindustrie läuft dieser Prozess jedoch drucklos bei 70 °C ab, anstatt bei 150 bar und 200 °C betrieben werden zu müssen. Angedacht ist eine Anwendung des Verfahrens auf den festen Bestandteil des Gärrestes der hauptsächlich aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin besteht. [59]

### **3.3 Stand der Technik der Biogaserzeugung**

Die Biogasverfahren lassen sich nach der Art der Beschickung (Batch-/Durchfluss-Verfahren), nach der Art der Mischung (volldurchmischt oder Pfropfenstromverfahren), nach einstufigen oder mehrstufigen Verfahren oder nach der Konsistenz des Substrates (Feststoff- oder Flüssig-/Nassverfahren) unterscheiden. [14]

Nassverfahren werden mit einem Trockenmassegehalt zwischen 5 und 15 % betrieben. Die untere Grenze von 5 % ergibt sich aufgrund der Wirtschaftlichkeit, da bei einem noch niedrigeren Trockenmassegehalt zu viel Wasser nutzlos durch die Anlage geschleppt werden müsste, während sich die obere Grenze von 15 % durch die Notwendigkeit der Pumpfähigkeit und Mischfähigkeit des Substrates ergibt. [14]

Feststoffverfahren arbeiten mit stapel- und schüttfähigem Material bei einem Trockenmassegehalt größer als 25 %. [14]

Bei zweistufigen Systemen sind zwei Fermenter in Reihe geschaltet um z.B. bei Rührkesselfermentern die Verlustraten (Kurzschlussströmung unvergorenes Material) zu reduzieren. Unter der Annahme eines vollaufmischten Fermenters sind in Abhängigkeit der Verweilzeit die Verluste bei einer einstufigen Anlage enorm. Diese können durch eine zweite Stufe deutlich reduziert werden. Da im Hauptfermenter bereits ein Großteil des Abbaus der organischen Substanz stattfindet, fällt die Raumbelastung des Nachfermenters geringer aus. Dieser kann also kleiner ausgelegt werden als der Hauptfermenter. [17]

Ebenfalls kann man noch zwischen einphasigen und zweiphasigen Systemen unterscheiden. Findet die Hydrolyse und die Methanbildung zusammen in einem Behälter statt, spricht man von einphasigen Systemen. Einphasige Systeme bringen jedoch den Nachteil mit sich, dass sie in einen für die Hydrolyse ungünstigen PH Bereich betrieben werden (siehe Kap. 3.1) Findet die Hydrolyse und Methanbildung jeweils getrennt in separaten Behältern statt, spricht man von zweiphasigen Systemen. Diese haben den Vorteil, dass beide Vorgänge im optimalen pH-Werte Bereich betrieben werden können, wodurch man sich kürzere Verweilzeiten oder höhere Gasausbeuten erwartet.[17]

### 3.3.1 Batchverfahren

Beim Batchverfahren wird der ganze Faulbehälter auf einmal gefüllt. Die Charge fault dann bis zum Ende der gewählten Verweilzeit aus, ohne dass Substrat zugefügt oder entnommen wird. Die Gasproduktion setzt nach der Füllung ein, erreicht ein Maximum und flacht dann ab. Nach Ablauf der Verweilzeit, wird der Faulbehälter in einem Zuge entleert. Ein Teil des Faulschlammes wird zurückbehalten um die neue Charge anzupfen. Bei den Batchverfahren wird zwischen den Feststoffverfahren, bei denen stapelfähige Substrate zum Einsatz kommen und den Flüssigverfahren, bei denen pumpfähige Substrate eingesetzt werden, unterschieden. [14]

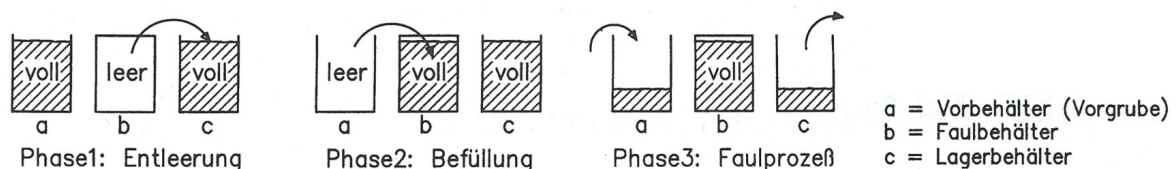


Abbildung 3.5: Funktionsschema des Batchverfahrens [14]

### 3.3.2 Wechselbehälterverfahren

Das Wechselbehälterverfahren ist den Flüssig-Verfahren zuzuordnen. Dieses Verfahren arbeitet mit 2 Faulbehältern. Während ein Faulbehälter ausfault wird aus einer Vorgrube der zweite Faulbehälter langsam befüllt. Ist der zweite Faulbehälter vollständig befüllt wird das ausgefaulte Substrat des ersten Behälters auf einmal entleert um anschließend aus der Vorgrube wieder langsam befüllt zu werden. [14]

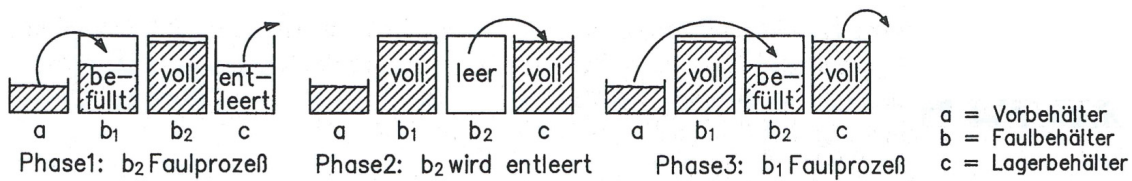


Abbildung 3.6: Funktionsschema des Wechselbehälterverfahrens [14]

### 3.3.3 Speicherverfahren

Bei diesem Verfahren ist der Lagerbehälter und der Fermenter zu einem Behälter zusammengefasst. Ist das Substrat ausgefault, wird dieser Behälter bis zu einen kleinen Rest entleert, der zur Animpfung für das frische Substrat benötigt wird. Anschließend wird der Behälter langsam befüllt.

In der Praxis spielen diese Anlagen kaum noch eine Rolle.

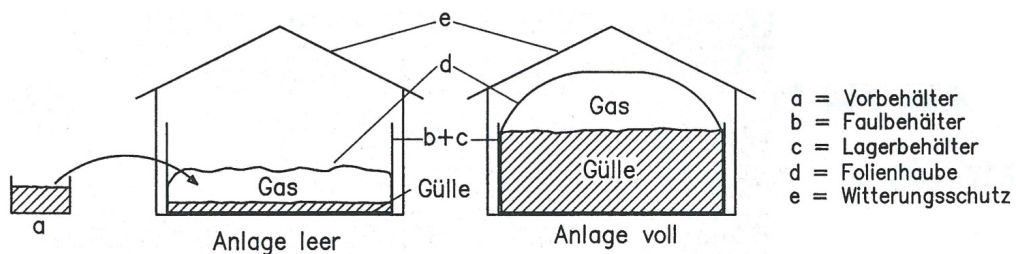


Abbildung 3.7: Funktionsschema des Speicherverfahrens [14]

### 3.3.4 Durchflussverfahren

Beim Durchflussverfahren ist der Faulbehälter immer gefüllt und muss nur bei Reparatur oder bei Entfernung von Sinkschichten gelegentlich entleert werden. Aus einem kleinen Vorbehälter wird mehrmals täglich frisches Substrat in den Behälter eingebracht. Zeitgleich wird am Überlauf des Behälters die selbe Menge an ausgefaultem Substrat abgezogen.



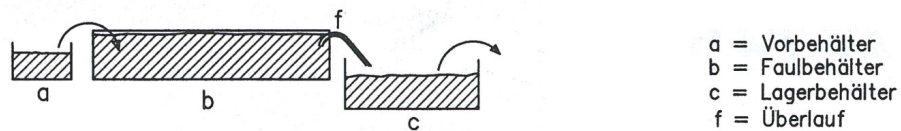


Abbildung 3.8: Funktionsschema des Durchflussverfahrens [14]

### 3.3.5 Durchfluss-Speicher-Verfahren

Diese Kombination aus Durchfluss- und Speicherverfahren werden in Deutschland am häufigsten eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird neben dem Durchflussfermenter auch der Lagerbehälter mit einem Rührwerk und eventuell einer Heizung versehen und gasdicht ausgeführt. Besonders bei hoch belasteten Fermentern kann bei langen Lagerzeiten von bis zu 7 Monaten 20 bis 40 % des gesamten Gasertrages aus dem Lagerbehälter kommen.

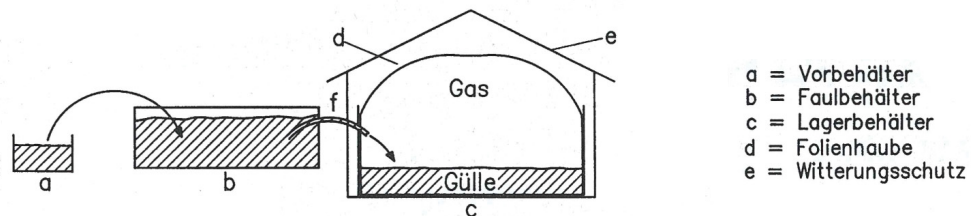


Abbildung 3.9: Funktionsschema des Durchflussspeicherverfahrens [14]

### 3.3.6 Pfropfenstromverfahren

Liegende Fermenter, bei denen der Transport des Inhaltes in horizontaler Richtung ausschließlich durch den Verdrängungseffekt des immer wieder frisch eingebrachten Materials erfolgt, werden als Pfropfenstromreaktoren bezeichnet. Das Substrat wird wie ein Pfropfen durch den Fermenter geschoben, wodurch eine räumliche Trennung von verschiedenen Abbauphasen im gleichen Behälter erreicht wird.

Für eine vertikale Durchmischung des Materials sorgen langsam drehende mechanische Rührwerke, die quer zur Durchflussrichtung arbeiten. Da eine horizontale Durchmischung praktisch nicht vorkommt, muss das neue eingebrachte Substrat angeimpft werden. Dies geschieht über eine teilweise Rückführung des ausgegorenen Substrates.

Nach dem Pfropfenstromfermenter ist üblicherweise ein großer Nachgärbehälter nachgeschaltet, um lange Verweilzeiten zu ermöglichen. [15] [14]

## 3.4 Stand der Technik der Biogasaufbereitung

Die Biogasaufbereitung beinhaltet vor allem die Entfernung von Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Schwefelwasserstoff. [11]

### 3.4.1 Entschwefelungsverfahren

Es werden drei Arten von Entschwefelungsverfahren angewandt, die biologische Entschwefelung, die chemische Entschwefelung und eine Mischform der beiden Entschwefelungsarten - die chemisch-biologische Entschwefelung.

#### 3.4.1.1 Biologische Entschwefelung

Bei der biologischen Entschwefelung wird  $\text{H}_2\text{S}$  mit Hilfe von Sauerstoff und Mikroorganismen wie z.B. Thiobazillen über Schwefel hin zu Sulfaten abgebaut. Über die biologische Entschwefelung ist eine  $\text{H}_2\text{S}$ -Senkung im Rohbiogas auf 50 ppm möglich. Wirtschaftlich sinnvoll sind Werte von 100 bis 200 ppm. Da für die Einspeisung ins Erdgasnetz wesentlich geringere Konzentrationen (kleiner als 3,3 ppm) gefordert werden, können biologische Entschwefelungsverfahren nur für eine Grobentschwefelung eingesetzt werden. Es gibt drei gängige biologische Entschwefelungsverfahren: die biologische Entschwefelung direkt im Fermenter und einstufige sowie zweistufige Biowäscher. [11]

#### 3.4.1.2 Biofilter

Ein Biofilter ist eine feuchte, bioaktive Schüttung, an der Mikroorganismen angesiedelt sind, die das  $\text{H}_2\text{S}$  des Biogases verstoffwechseln. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Pufferwirkung des Biofilters sowie die hohen Abbaugrade von über 98 % bei ausreichend langen Verweilzeiten (ab circa 30 sec.). Theoretisch sind mit Biofilter  $\text{H}_2\text{S}$ -Volumenanteile im entschwefeltem Biogas von unter 1 ppm erreichbar.

Aufgrund des großen Flächenbedarfs, der schwierigen Handhabung sowie des notwendigen Eintrags von Luft sollten diese Systeme nur für die Reinigung von Strippgasen eingesetzt werden. [11]

#### 3.4.1.3 Chemische Entschwefelung

Eine Möglichkeit der chemischen Entschwefelung besteht in dem Austrag von  $\text{H}_2\text{S}$ , durch die Fällung mit Eisensalzen, in der Flüssigphase. Als Fällungsmittel können aktive Substanzen, wie z.B. Eisenchelate, Eisen(III)-hydroxid, Eisen(III)-oxid oder  $\text{FeCl}_2$  verwendet werden. Bei diesem Verfahren setzt sich elementarer Schwefel bzw.  $\text{FeS}$  am Fermenterboden ab. Der Gärrest wird zusammen mit dem  $\text{FeS}$  aus dem Fermenter ausgebracht und kann üblicherweise bedenkenlos als Dünger für landwirtschaftliche Flächen verwendet werden. [63]

Mit diesem Verfahren können theoretisch  $\text{H}_2\text{S}$ -Volumenanteile kleiner als 50 ppm erreicht werden, da dafür aber sehr große Mengen an Fällungsmittel nötig sind, sollte dieses Verfahren nur als Grobentschwefelung eingesetzt werden. [11]

Für eine mögliche Feinentschwefelung von Biogas eignet sich mit KJ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  und  $\text{KMnO}_4$  dotierte oder imprägnierte Aktivkohle. Bei der Dotierung wird z.B. KJ während der Aktivkohle-

herstellung eingemischt, während bei der Imprägnierung z.B.  $K_2CO_3$  oder  $KMnO_4$  nachträglich auf die Aktivkohle aufgebracht wird.

Die auf Aktivkohle basierenden Entschwefelungsverfahren sollten lediglich zur Feinentschwefelung verwendet werden, um möglichst lange Standzeiten des Adsorbers bei vertretbaren Kosten zu gewähren. [63]

#### 3.4.1.4 Chemisch-biologische Entschwefelung

Das unaufbereitete Biogas wird durch eine  $FeO(OH)$ -haltige Granulatschüttung in eine Adsorberkolonne geleitet. Dort wird das  $H_2S$  in Form von  $FeS$  an einem geeigneten Feststoff adsorbiert. Das beladene Adsorbens wird in einem in-situ-Regenerationszyklus mit Umgebungsluft und unter Mitwirkung entsprechend auf dem Filtergranulat angesiedelter Mikroorganismen zu Schwefelsäure umgewandelt. Diese wird als Kondensat abgetrennt, um einer weiteren Verwendung zugefügt oder entsorgt zu werden. [11]

#### 3.4.2 $CO_2$ -Abtrennungsverfahren

Auf das Kyrogen Verfahren zur  $CO_2$ -Abtrennung wird in diesem Kapitel nicht eingegangen.

##### 3.4.2.1 Druckwechseladsorption

Bei der Druckwechseladsorption handelt es sich um ein quasi kontinuierliches Aufbereitungsverfahren zur gleichzeitigen Trocknung und  $CO_2$ -Entfernung. Als Adsorbentien werden üblicherweise Kohlenstoffmolekularsiebe und Zeolithe verwendet. Üblicherweise erfolgt die  $CO_2$ -Adsorption bei Drücken von 4 bis 10 bar. Um eine schleichende Deaktivierung des Adsorbens zu verhindern sollte der  $H_2S$ -Volumenanteil am Eintritt der DWA unter 3 ppm betragen, da  $H_2S$  dauerhaft an den Adsorbentien adsorbiert wird. [11]

##### 3.4.2.2 Physikalische Wäschen

Alle physikalischen Wäscher benötigen eine Waschflüssigkeitsaufbereitung die meist durch Druckabsenkung und Luftstrippung realisiert wird. Bei sehr guter Löslichkeit einzelner Gasbestandteile (z.B. bei  $H_2S$ ) kann jedoch auch ein „Auskochen“ der Gasbestandteile notwendig werden. Weist das Biogas einen sehr hohen Anteil an  $H_2S$  auf, kann deshalb eine Grobentschwefelung vor dem Wäscher sinnvoll sein (je nach Hersteller zwischen 2000 ppm und 100 ppm) [11]

Eine weit verbreitete physikalische Wäsche ist die Druckwasserwäsche (DWW). Bei diesem Verfahren durchströmt das auf circa 9 Bar verdichtete Biogas ein mit  $H_2S$  beaufschlagte Absorptionskolonne im Gegenstrom. Im Washwasser lösen sich  $H_2S$ ,  $CO_2$  und geringe Mengen an  $CH_4$ . Bei einer anschließenden Entspannung und Strippung des Washwassers mit Luft, wird die Löslichkeit der gelösten Substanzen verringert, wodurch das Washwasser wieder regeneriert

wird. [11]

### 3.4.2.3 Chemische Wäscher

Amin-Wäschen sind die am weitesten verbreiteten chemischen Wäschen zur CO<sub>2</sub>-Entfernung in Biogasanlagen. Amine sind flüchtige Verbindungen mit relativ hohen Dampfdrücken. Bei den eingesetzten Waschflüssigkeiten handelt es sich meist um ein Gemisch aus Wasser und dem jeweils gewählten Amin wie MEA (Monoethanolamin), DEA (Diethanolamin) und MDEA (Methyldiethanolamin). [11]

Bei Amin-Wäschen handelt es sich um ein chemisches Absorptionsverfahren, bei dem das Biogas drucklos mit einer Waschflüssigkeit in Kontakt gebracht wird. Dabei geht das CO<sub>2</sub> von der Gasphase in das Waschmedium über. In der Regenerationskolonne wird die Waschflüssigkeit bei Temperaturen zwischen 120 und 180 °C entweder mit Wasserdampfstrippung oder durch Auskochen regeneriert. [18] [11]

### 3.4.2.4 Membran-Biogasaufbereitung

Die Membran-Biogasaufbereitung lässt sich prinzipiell in zwei verschiedene Verfahren unterteilen: erfolgt die Trennung nach unterschiedlichen Molekül- oder Teilchengrößen spricht man von einer Porenmembrane, die nur wirtschaftlich eingesetzt werden kann, wenn geringe Trennwirkungen akzeptiert werden. Erfolgt die Trennung aufgrund der unterschiedlichen Löslichkeiten der Gasbestandteile und deren unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeiten im Membranmaterial spricht man von einer Diffusionsmembrane oder Polymermembrane. [63]

## 3.4.3 Gastrocknungsverfahren

Bei den Gastrocknungsverfahren unterscheidet man zwischen der Gasvortrocknung, die meist als Kondensationstrocknung ausgeführt wird und der Gasnachrocknung.

### 3.4.3.1 Vortrocknung

Da das Rohbiogas am Ausgang des Fermenters nahezu mit Wasserdampf gesättigt ist, ist eine Vortrocknung gleich nach dem Fermenter vorzusehen, um weiterführende Rohrleitungen oder Apparate vor Kondensation und Korrosion zu schützen. Dafür eignet sich eine Kondensationstrocknung bei der das Biogas auf eine Temperatur von 5 bis 10 °C abgekühlt wird. Ein Großteil des Wasserdampfes kondensiert bei dieser Temperatur aus. [11]

### 3.4.3.2 Nachrocknung

Große Anlagen trocknen oft mit einer Gaswäsche, die mit Triethylenglykol (TEG) betrieben wird. Als nachteilig erweist sich die notwendige thermische Regeneration des TEG bei Temperaturen zwischen 160 und 200 °C, der erhöhte Eingangsdruck sowie der apparative Aufbau. [11]

Für kleine Gasströme eignen sich meist adsorptive Trocknungsverfahren. Bei diesen Verfahren durchströmt der Gasstrom ein Festbett, das aus hydrophilen Material besteht. Dieses Material belädt sich beim Durchströmen mit Wasserdampf weshalb es bei vollständiger Beladung ausgetauscht oder in situ regeneriert werden muss. Die Regeneration erfolgt thermisch bei Temperaturen von 110 bis 140 °C oder physikalisch durch Druckabsenkung. Mit diesem Verfahren können H<sub>2</sub>O Taupunkte von bis zu -100 °C erreicht werden. [11]

Die Membrantrocknung soll an dieser Stelle nur kurz erwähnt werden, da dieses Verfahren mit den etablierten Trocknungsverfahren noch nicht konkurrieren kann. [11]

## 3.5 Stand der Technik der Biogasverwertung

Grundsätzlich kann Biogas auf drei verschiedenen Wegen verwertet werden. Die einfachste Biogasnutzung stellt die reine Wärmeerzeugung dar. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird Biogas in elektrischen Strom umgewandelt und die dabei anfallende Wärme für einen anderen Prozess nutzbar gemacht. Zu guter Letzt kann Biogas noch zu Biomethan aufbereitet werden. Das aufbereitete Biomethan kann dann als Kraftstoff für Fahrzeuge dienen oder ins öffentliche Gasnetz eingespeist werden. [19]

### 3.5.1 Kraft-Wärme-Kopplung

Bei der Nutzung von Biogas mittels Kraft-Wärme-Kopplung haben sich heutzutage vor allem der auf Gasbetrieb umgerüsteten Benzinmotor, der auf Gas/Otto-Betrieb umgerüstete Dieselmotor (Gasmotor), der Zündstrahlmotor sowie die Mikrogasturbine etabliert. [14] Auf die Brennstoffzelle wird in diesem Kapitel nicht eingegangen.

#### 3.5.1.1 Motoren für Biogasanlagen

Bei den auf Gasbetrieb umgerüstete Benzinmotoren handelt es sich um veränderte PKW-Motoren. Diese werden aufgrund ihrer geringen Leistung nur bei sehr kleinen Biogasanlagen eingesetzt. [14]

Gasmotoren sind Dieselmotoren, die anstelle der Einspritzanlage eine Fremdzündung und einen Gasmischer aufweisen. Größere Motoren werden mit Abgas-Turboladern und im Einzelfall mit Ladeluftkompressoren ausgestattet. Diese Motoren werden aufgrund ihrer robusten Bauweise und ihrer damit verbundenen Langlebigkeit geschätzt. Es sind Wirkungsgrade von 40 % erreichbar. [14]

Bei Zündstrahlmotoren handelt es sich um Seriidieselmotoren, bei denen dem verdichteten

Gas-Luft-Gemisch ständig über Einspritzdüsen geringe Mengen Zündöl zugeführt wird. Die Zündung des Gasgemisches erfolgt über Verdichtung. Der Zündölanteil kann zwischen 4 und 30 % betragen. [14]

Ein Betrieb der Motoren mit einem Lambda von 1 ist nicht möglich, da in diesem Bereich die Emissionswerte für  $\text{NO}_x$  und CO zu hoch liegen würden. Da der Einsatz von Oxidationskatalysatoren noch nicht ausgereift ist, werden Biogas Motoren im Einstellungsbereich des „Magermotors“ betrieben. Dadurch werden die Emissionswerte von  $\text{NO}_x$  und CO gering gehalten. Der Betrieb des Gasmotors im mageren Bereich ist jedoch mit Leistungseinbußen verbunden. [15]

Bei einem reinen Vergleich eines Gasmotors mit einem Zündstrahlmotor kann allgemein festgehalten werden, dass im unteren Leistungsbereich der Zündstrahlmotor aufgrund niedrigerer Kosten und höherer Wirkungsgrade im Vorteil ist. Ab einer elektrischen Leistung von 300  $\text{kW}_{el}$  überwiegen allerdings die Vorteile des Gas/Otto-Motors. [14]

#### 3.5.1.2 Mikrogasturbine

Mikrogasturbinen sind kleine, schnelllaufende Gasturbinen im unteren elektrischen Leistungsbereich bei denen der Verdichter und die Turbine auf einer Welle angebracht sind. Über den Verdichter wird Luft angesaugt. Diese strömt über den Rekuperator, der die Luft vorwärmt, in die Brennkammer, wo Biogas eingebracht wird. Durch die Verbrennung entsteht heißes Abgas, das über die Turbine expandiert wird. Bevor die heißen Abgase die Mikrogasturbine verlassen, werden diese noch über den Rekuperator geleitet, um die verdichtete Verbrennungsluft vorzuwärmen.

Bei einer Mikrogasturbine ist eine Gasdruckerhöhung von circa 6 bar notwendig, da das Biogas in die Brennkammer eingebracht werden muss, in der ein Überdruck vorherrscht. [18]

Mikrogasturbinen weisen gegenüber Gasmotoren eine höhere Toleranz gegenüber Schwefelgasen auf (bis 5000 ppm [60]). Ebenfalls können Mikrogasturbinen Biogas mit einem sehr niedrigen Methangehalt (bis zu 35 %) verarbeiten. [18] Der Wirkungsgrad der Mikrogasturbine ist unabhängig vom Methangehalt. Um die Turbine bei einer gewissen Leistung betreiben zu können, ist immer der gleiche Energieinput erforderlich. Dies hat bei verschiedenen Methangehalten unterschiedliche Volumenströme zur Folge. [60]

Unerwünschte Begleitstoffe wie Wasser und Siloxane (bei Siloxangehalte über 10  $\text{mg}/\text{m}^3 \text{CH}_4$ ) können die Mikrogasturbine allerdings schädigen, weshalb eine Gastrocknung bzw. Filterung durchgeführt werden muss.

Mikrogasturbinen weisen sehr geringe Abgasemissionen auf. Die gesamte Abwärme wird über das Abgas transportiert, was eine einfache und kostengünstige Nutzung der Wärme möglich macht. [18]

### 3.5.2 Verwertungsmöglichkeiten des aufbereiteten Biogases

Das aufbereitete Biogas kann als Kraftstoff für Fahrzeuge dienen oder in das Erdgasnetz eingespeist werden.

#### 3.5.2.1 Einspeisung des Biomethans ins Erdgasnetz

Die Einspeisung des Biomethans kann in unterschiedliche Netztypen mit verschiedenen Druckstufen erfolgen. Es wird zwischen Nieder- (bis 100mbar), Mittel- (100 mbar bis 1 bar) und Hochdrucknetzen (1 bis 120 bar) unterschieden. Um die Kosten der Nachverdichtung möglichst gering zu halten, sollte das Aufbereitungsverfahren mit seinem Ausgangsdruck an den vorhandenen Netzdruck angepasst sein. Jeder Einspeisepunkt muss eine Druck-Regel-Messstation zur Überwachung des Druckniveaus aufweisen. [18]

Abbildung 3.10 zeigt das Blockschaltbild einer Biogaseinspeiseanlage (BGEA) die im Wesentlichen aus einer Einlaufstrecke in die Analyse, einer eichfähigen, volumetrischen Mengenerfassung, einer Biogasanalyse am Eintritt und vor dem Verlassen der BGEA (nur bei Konditionierung erforderlich), einer Konditionierung (falls erforderlich), einer eichfähigen, volumetrischen Mengenerfassung im Ausgang (nur bei Konditionierung erforderlich), einer Odorierung, einer Druckregelung oder Verdichtung und einem Öl- und Kondensatabscheider besteht. [11]

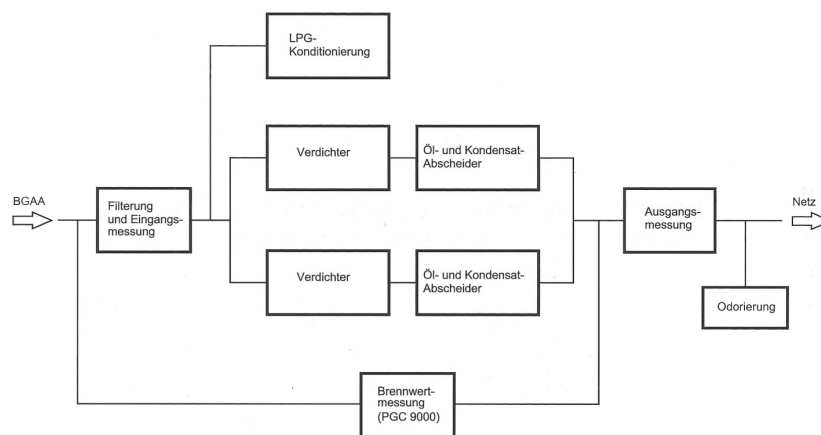


Abbildung 3.10: Blockschaltbild einer Biogaseinspeiseanlage [11]

#### 3.5.2.2 Treibstoff für Kraftfahrzeuge

Erdgasfahrzeuge können sowohl mit Erdgas als auch mit Biomethan betrieben werden. Es wird zwischen zwei Fahrzeugtypen unterschieden. Bivalente Fahrzeuge können sowohl mit dem Treibstoff Erdgas/Biomethan als auch mit Benzin fahren, während monovalente Fahrzeuge nur mit einem Kraftstoff betrieben werden können. Da monovalente Fahrzeuge auf einen Kraftstoff optimiert sind, erreichen diese bessere Wirkungsgrade. [20] Um sehr große Tanks zu vermeiden und vernünftige Reichweiten zu erzielen, wird Erdgas oder Biomethan mit einem

Druck von 200 bis 250 bar in geeigneten Tanks gespeichert. Trotz des hohen Drucks sind diese Tanks immer noch fünf mal größer als normale Benzintanks, um die selbe Reichweite zu erzielen. [19] Neben dem Druckgasbehälter weist ein Erdgasauto verglichen mit einem Benzinauto noch einen Druckregler, Einspritz- und Rückschlagventile sowie eine auf den Erdgasbetrieb abgestimmte, elektronische Motorsteuerung auf. [21]

Um Dieselmotoren von Nutzfahrzeugen mit Erdgas betreiben zu können, wurde der DING-Motor (Direct Injection Natural Gas Motor) entwickelt, ein effizienter und schadstoffarmer Fahrzeugantrieb. [21]

In konventionellen Treibstoff-Einspritzsystemen wird Erdgas über Single Point Injection Systems oder Multipoint Injection Systems in den Zylinder eingebracht. Bei diesen Einspritzsystemen weist der Gasmotor verglichen mit einem Benzinmotor geringere Leistungen auf. Durch die Entwicklung des DING-Motors ist es möglich, Erdgas mit hohem Druck in den Zylinder einzubringen. Verglichen mit einem Benzinmotor lassen sich durch dieses System sogar höhere Leistungen erreichen. [22]

#### 3.5.3 Vergütungssätze

Anschließend wird ein Überblick über die Vergütungssätze der Biogasverstromung in Deutschland und Österreich geboten.

##### 3.5.3.1 Vergütungssätze nach dem EEG 2012

Tabelle 3.1 zeigt einen Auszug aus dem EEG 2012. In Tabelle 3.1 finden sich nur Angaben die für diese Arbeit relevant sind.

Die Vergütung für Strom aus Biomasse nach dem EEG 2012 setzt sich aus einer Grundvergütung, einer Rohstoffvergütung und einen Gasaufbereitungs- und Bioabfallvergärungsbonus zusammen. Die Grundvergütung sowie die Boni unterliegen einer jährlichen Degression von 2 %. Die Rohstoffvergütung gliedert sich in eine Einsatzstoffvergütungsklasse 1 in der nachwachsende Rohstoffe aufgelistet sind sowie einer Einsatzstoffvergütungsklasse 2 in der ökologisch vorteilhafte Einsatzstoffe wie Gülle oder Landschaftspflegematerial angeführt sind. [84]

Der in Tabelle 3.1 angeführte Vergütungsanspruch besteht nur, so lange 60 % des in dem jeweiligen Kalenderjahres erzeugten Stromes in Kraft Wärme Kopplung erzeugt wird. In der Anlage 2 des EEG 2012 finden sich in Punkt 3 folgende Anwendungen die als KWK Anwendungen gelten (Positivliste): Nutzung von Prozesswärme zur Hygienesierung und Pasteurisierung von Gärresten; Nutzung von Prozesswärme zur Aufbereitung von Gärresten zur Düngemittelherstellung; Nutzung der Abwärme aus Biomasseanlagen, zur Strom Erzeugung, insbesondere Organic-Rankine- und Kalina-Cycle-Prozesse; etc. [13]



### 3 Stand der Technik zu Biogas

		Vergütungshöhe [Cent/kWh <sub>el</sub> ]			
Grundvergütung <sup>(1)</sup>		2012	2013	2014	2015
	bis 150 kW <sub>el</sub>	14,3	14,01	13,73	13,46
	150 bis 500 kW <sub>el</sub>	12,3	12,05	11,81	11,58
	500 kW <sub>el</sub> bis 5 MW <sub>el</sub>	11	10,78	10,56	10,35
Sondervergütung <sup>(2)</sup> bis 75 kW <sub>el</sub>		25	24,50	24,01	23,53
<b>Rohstoffvergütung</b>					
ESK 1	bis 500 kW <sub>el</sub>	6	6	6	6
	500 bis 750 kW <sub>el</sub>	5	5	5	5
ESK 2	bis 500 kW <sub>el</sub>	8	8	8	8
	500 kW <sub>el</sub> bis 5 MW <sub>el</sub>	8   6 <sup>(3)</sup>	8   6 <sup>(3)</sup>	8   6 <sup>(3)</sup>	8   6 <sup>(3)</sup>
<b>Gasaufbereitungsbonus</b>					
	bis 700 Nm <sup>3</sup> /h	3	2,94	2,88	2,82
<b>Bioabfallvergärung <sup>(4)</sup></b>					
	bis 500 kW <sub>el</sub>	16	15,68	15,37	15,06
	500 kW <sub>el</sub> bis 20 MW <sub>el</sub>	14	13,72	13,45	13,18

(1) einschließlich Wärmenutzungsverpflichtung, d.h. mindestens 60 % des in der Anlage erzeugten Stroms muss in KWK erzeugt werden und die Wärme muss entsprechend Anlage 2 EEG genutzt werden; Ausnahmen: Anlagen mit 60 Masse-% Gülleeinsatz und Anlagen, die an der Direktvermarktung teilnehmen

(2) Güllekleinanlagen, Einsatz von 80 Masse-% Gülle/ Mist (ohne Geflügelmist/ Hühnertrockenkot)

(3) für Gülle/ Mist 6 ct/kWh<sub>el</sub> bei Anlagen > 500 kW<sub>el</sub> bis 5 MW<sub>el</sub>

(4) 90 Masse-% Bioabfälle der Abfallschlüssel Nummer 20 02 01, 20 03 01 und 20 03 02 der Nummer 1 des Anhangs 1 der Bioabfallverordnung, mit Einrichtung zur Nachrotte

Tabelle 3.1: Auszüge aus dem EEG 2012 [13]

Eine Einordnung der für das Rohrdorfer Zementwerk relevanten Substrate in die jeweiligen Vergütungsklassen erfolgt in Kapitel 4.1.2.4.

#### 3.5.3.2 Vergütungssätze nach der Ökostromverordnung

Tabelle 3.2 zeigt einen Auszug aus der Ökostromverordnung 2012. Es handelt sich ebenfalls um einen Auszug von relevanten Werten für diese Arbeit.

	Vergütungs- höhe [Cent/kWh <sub>el</sub> ]	KWK Zuschlag [Cent/kWh <sub>el</sub> ]
<b>bei Einsatz von tierischen Wirtschaftsdüngern mit einem Massenanteil von mindestens 30%</b>		
bis 250 kW <sub>el</sub>	18,5	2
250 bis 500 kW <sub>el</sub>	16,5	2
über 500 kW <sub>el</sub>	13,0	2
<b>bei Einsatz von anderen als rein landwirtschaftlichen Substrateinsatzstoffen</b>		
bis 250 kW <sub>el</sub>	14,8	2
250 bis 500 kW <sub>el</sub>	13,2	2
über 500 kW <sub>el</sub>	10,4	2

Tabelle 3.2: Auszüge aus der Ökostromverordnung 2012 [95]

Im KWK Gesetz ist der Begriff KWK definiert. Demnach entspricht eine Nachverstromung in

einem eventuell vorhanden Abhitzekraftwerk nicht einer KWK Anwendung wodurch der KWK Zuschlag nicht bezogen werden kann. In Paragraph 7 Punkt 2 des Gesetzes wird darauf hingewiesen, dass die Erzeugung von Prozesswärme auch als KWK Anwendung gilt, jedoch nur, wenn die Engpassleistung 2 MW übersteigt. Eine Umgehung des Gesetzes unter dem Argument, dass im Abhitzekraftwerk Prozesswärme erzeugt wird (heißes Wasser Dampf Gemisch und überhitzter Dampf) ist aufgrund der vorgegebenen Engpassleistung sinnlos, da es für die gegebenen Standorte unrealistisch ist, die zum Überschreiten dieser Engpassleistung notwendigen Mengen an Biogas zu erzeugen.

## 3.6 Stand der Technik der Gärrestaufbereitung

Die Gärrestverwertung, die von den Gärresteigenschaften beeinflusst wird, stellt einen wichtigen Punkt eines funktionierenden Biogasanlagenkonzeptes dar.

### 3.6.1 Eigenschaften der Gärreste

Die Eigenschaften von Gärresten und deren Inhaltsstoffe werden wesentlich durch den Gärprozess und die dabei eingesetzten Substrate bestimmt. Allgemein kann man jedoch folgende positive Eigenschaften von Gärresten im Vergleich zu Gülle nennen: [18]

- Minderung der Geruchsemission durch Abbau flüchtiger organischer Verbindungen
- Minimierung des Risikos von Blattverätzungen durch Abbau kurzkettiger organischer Säuren
- Verbesserung der Fließeigenschaften, dadurch Minimierung der Blattverschmutzung
- Verbesserung der kurzfristigen Stickstoffwirkung durch die Erhöhung des Gehaltes an schnell wirksamem Stickstoff
- Bessere Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe durch bessere Löslichkeit
- Abtötung von Unkrautsamen und Krankheitskeimen

Für Gärreste können folgende weitere typische Eigenschaften genannt werden: [18]

- Das C/N-Verhältnis liegt in etwa zwischen 5,1 und 6,8
- Der Abbau an organischer Substanz bewirkt eine Überführung von organisch gebundenem Stickstoff in anorganisch gebundenen Stickstoff

Neben wichtigen Nährstoffen können jedoch auch erhebliche Konzentrationen an Schwermetallen (wie Zink, Kupfer, Quecksilber, Blei, Cadmium, etc.) und organischen Schadstoffen im Gärrest enthalten sein. Organische Schadstoffe kommen in Gärresten aus nachwachsenden Rohstoffen nur in geringen Konzentrationen vor. Werden jedoch Substrate wie Gülle, Fette, Speisereste

etc. eingesetzt, können organische Schadstoffe wie Tenside, Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder Adsorbierbare Organische Halogenverbindungen (AOX) in ähnlichen Konzentrationen wie in Klärschlamm vorkommen. [11] [18]

Um gefährliche Krankheitserreger wie Salmonellen, Clostridien, etc. nicht wieder mit dem Gärrest auszubringen und somit Infektionskreisläufe zu schließen, kann eine Hygienisierung des Gärrestes erforderlich werden. [18]

#### 3.6.2 Verwertungswege der Gärreste

Bei der Gärrestverwertung unterscheidet man prinzipiell zwischen der stofflichen und der thermischen Verwertung. Die stoffliche Verwertung umfasst die direkte Ausbringung auf landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Düngung, die Herstellung von Kompost sowie die Gärrestaufbereitung zur Herstellung von Düngemitteln oder anderen Produkten.

Ist eine stoffliche Verwertung aufgrund fehlender Absatzmöglichkeiten oder anderer wirtschaftlicher Gründe nicht möglich, kann der Gärrest thermisch verwertet werden. [11]

##### 3.6.2.1 Behandlung der Gärrestmischphase

###### Landwirtschaftliche Ausbringung von Gärresten

Am einfachsten und kostengünstigsten lassen sich Gärreste durch die direkte Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen verwerten. Dies ist auch im Sinne einer Kreislaufführung der beim Pflanzenwachstum benötigten Nährstoffe wünschenswert.

Aufgrund der niedrigen Nährstoffkonzentration der Gärreste ist eine Ausbringung jedoch nur sinnvoll, wenn ausreichend viele Flächen in der Nähe der Biogasanlage zur Verfügung stehen und so die Transportkosten gering gehalten werden können. Ab einer Transportentfernung von 5 Kilometern werden anstatt einphasigen Fahrzeugen, zweiphasige Fahrzeuge, also Fahrzeuge mit getrennten Transport- und Ausbringmechanismen eingesetzt. Der Einsatz von einphasigen Fahrzeugen ist zu bevorzugen, da die Ausbringung der Gärreste ohne Umladung durchgeführt werden kann, was sich positiv auf die Ausbringkosten auswirkt. [62]

Eine weitere Einschränkung der Gärrestausbringung kann durch die Einhaltung von gesetzlichen Vorgaben auftreten. Jeweils in Abhängigkeit von den in der Biogasanlage eingesetzten Substraten, der Verwendung des Gärrestes und seiner Weiterverarbeitung, ergeben sich die rechtlichen Anforderungen an den Gärrest aus dem Düngemittel-, Hygiene- und Abfallrecht. [18]

###### Feststoffabtrennung

Durch eine Feststoffabtrennung wird eine Reduzierung des Lagervolumens für flüssige Gärreste und eine Verminderung von Sink- und Schwimmschichten bei der Lagerung erreicht. Vor allem aber kommt es zu einer Auftrennung der Nährstoffe, da der mineralische Stickstoff großteils in der Flüssigphase verbleibt, während der organisch gebundene Stickstoff und Phosphor mit der Festphase abgeschieden werden. [18]

Zur Feststoffabtrennung werden Pressschneckenseparatoren, Siebtrommel- oder Siebbandpressen und Dekanter eingesetzt. [90]

Die Feststoffe aus dem Abtrennprozess sind vergleichbar mit Frischkompost und können als Dünger und zur Erhöhung der Gehalte an organischer Substanz in Böden eingebracht werden. Frischkompost wird vorwiegend in der Landwirtschaft eingesetzt, da bei der Lagerung und Ausbringung Geruchsprobleme auftreten können. Durch eine Stabilisierung der Gärreste (wie durch die Kompostierung) kann einem Geruchsproblem sowie einer Immobilisierung von Stickstoff und der Verbreitung von Unkrautsamen entgegengewirkt werden. [62]

#### 3.6.2.2 Behandlung der festen Gärrestphase

##### **Kompostierung**

Bei der Kompostierung handelt es sich um eine aerobe Behandlung des eingesetzten Materials, die zu einem stabilen Produkt (Kompost) führt. Da es sich bei Gärrest um ein strukturarmes Material handelt, muss ausreichend Strukturmaterial zugegeben werden, um die nötige Sauerstoffzufuhr zu gewährleisten. Durch den schon in der Biogasanlage erfolgten anaeroben Abbau von Kohlenstoff wird die Selbsterwärmung des kompostierbaren Materials verringert. Es können nur mehr Temperaturen von maximal 55 °C erreicht werden. Für eine erfolgreiche Hygienisierung sind 75 °C notwendig. [18]

##### **Trocknung**

Für die Trocknung des vorentwässerten Gärrestes können Trommel-, Band- oder Schubwendetrockner verwendet werden. Die für die Trocknung benötigte Wärme wird meistens durch heiße Luft übertragen, die das Trockengut über- oder durchströmt. Da das in der Festphase enthaltene Ammonium bei der Trocknung zum großen Teil als Ammoniak in die Trocknerabluft übergeht, kann eine Abluftbehandlung notwendig sein. Eine Abluftbehandlung kann auch der Emission von Geruchsstoffen aus dem Trocknungsprozess entgegenwirken.

Durch die Trocknung sind Trockensubstanzgehalte von mindestens 80 % erreichbar. [18]

Die Trocknung bietet den Vorteil ein gut lagerfähiges (aufgrund geringer Stickstoffverluste) und transportwürdiges (aufgrund hoher TS Gehalte) Gut zu erhalten. Getrocknete Gärückstände können vor allem zur gezielten Einbringung von Phosphat und Kalium in Bereichen hoher Stickstoffbelastung agrarisch genutzter Flächen Verwendung finden. [62]

Ist eine stoffliche Verwertung des getrockneten Gärgutes nicht möglich, kann dieses thermisch verwertet werden.

#### 3.6.2.3 Behandlung der flüssigen Gärrestphase

##### **Membrantechnik**

Die Membrantechnik besteht aus einem Filtrationsverfahren mit abnehmender Porengröße gefolgt von einer Umkehrosmose. Durch das Aufbereitungsverfahren entsteht aus dem flüssigen

Gärrest ein einleitfähiges Permeat und ein stark mit Nährstoffen angereichertes Konzentrat. Der TS-Gehalt in der Flüssigphase sollte einen Wert von 3 % nicht überschreiten, um eine frühzeitige Verstopfung der Membrane zu verhindern. Dies erfordert in den meisten Fällen eine Fest-Flüssig-Trennung mit einem Dekanter. [18]

#### **Eindampfung**

Das Verfahren erfolgt meist in einem mehrstufigen Prozess. Zuerst wird das Material erwärmt und anschließend die Temperatur bei Unterdruck schrittweise bis zum Siedepunkt erhöht. Um Ammoniak-Verluste zu vermeiden wird der pH-Wert in der Flüssigphase durch Säurezugabe gesenkt. In einer Vakuum-Eindampfanlage wird die Menge des Gärrestes um rund 70 % reduziert. Im Vergleich zum Zulauf kann eine 4 fach höhere Feststoffkonzentration erreicht werden. Aufgrund der Erwärmung der Gärreste auf 80 bis 90 °C erfolgt während der Eindampfung eine Hygienisierung des Materials. Eine direkte Einleitung des gereinigten Kondensats in den Vorfluter ist nicht möglich, da die gesetzlichen Grenzwerte nicht eingehalten werden können. Pro  $\text{m}^3$  verdampftes Wasser werden in etwa 300  $\text{kWh}_{\text{th}}$  an thermischer Energie benötigt, deshalb handelt es sich bei der Eindampfung um ein sehr energieintensives Verfahren. [18]

#### **Strippung**

Bei der Strippung werden Inhaltsstoffe aus Flüssigkeiten entfernt, indem Gase durch die Flüssigkeit geleitet werden. Dabei werden die in der Flüssigkeit enthaltenen Inhaltsstoffe in die Gasphase überführt. Das in der Flüssigkeit enthaltene Ammonium geht als Ammoniak in die Gasphase über. Dieser Prozess kann durch Temperaturerhöhung und pH-Wert-Erhöhung unterstützt werden. In einem nachgeschalteten Desorptionsschritt wird durch Kondensation, Wäsche mit Säuren oder Reaktion mit wässrigen Lösungen aus Gips, das sich in der Gasphase befindliche Ammoniak in ein verwertbares bzw. entsorgungsfähiges Produkt überführt. Eine direkte Einleitung des gereinigten Wassers ist nicht möglich, da die gesetzlichen Grenzwerte nicht eingehalten werden können. [18]

## 4 Substratstudie

In diesem Kapitel werden Substrate hinsichtlich prozessrelevanter und wirtschaftlicher Eigenschaften kurz beschrieben. Ebenfalls wird die Biogas Konkurrenzsituation im Umkreis des Gmundner Zementwerkes beleuchtet. Anschließend folgt eine Zusammenfassung der vom Autor durchgeführten Substratstudie. Ziel ist es, anhand dieser Daten, die Substratversorgung der Biogasanlage abschätzen zu können.

### 4.1 Substratspezifische Eigenschaften

Für die Auslegung einer Biogasanlage sowie deren Betrieb, ist es erforderlich, über die wichtigsten prozess relevanten Substrateigenschaften, wie den Gasertrag, die Trockensubstanz, etc. und über die von den Substraten abhängende Vergütung Bescheid zu wissen. Eine Zusammenfassung dieser Daten findet sich in diesem Unterkapitel. Ganz zu Beginn dieses Kapitels findet sich eine allgemeine Beschreibung bedeutender Substrate.

#### 4.1.1 Substratbeschreibung

Anschließend werden relevante Substrate kurz beschrieben und auf deren Vor- und Nachteile eingegangen. Zur Biogaserzeugung werden ebenfalls konkurrierende Verwertungsoptionen angeführt.

##### 4.1.1.1 Wirtschaftsdünger

Gülle (Flüssigmist) ist ein Gemisch aus Kot und Harn von Tieren, die ohne oder mit nur wenig Einstreu auf Spaltböden oder Gitterrosten gehalten werden. Dieses System hat sich vor allem bei der Haltung von Milchkühen, Mastrindern, Mastschweinen und Hühnern durchgesetzt.

Bei der Haltung von Mutterkühen, Kälbern, Zuchtsauen und Pferden oder in Betrieben, die ökologisch wirtschaften, wird hingegen so viel Einstreu verwendet, dass stapelfähiger Festmist anfällt, der meist kompostiert wird.

Ebenfalls unterscheidet man noch zwischen Laufhofmist (besonders gut für Biogasanlagen geeignet) und Tretstallmist, dessen Zusammensetzung zwischen reiner Gülle und Festmist liegt.

Wird der Betrieb einer Biogasanlage mit Wirtschaftsdünger angedacht, sollte auf jeden Fall eine möglichst repräsentative Probe gezogen werden, da die Zusammensetzung und somit auch der Gasertrag von Gülle und Mist von sehr vielen verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel die Nutzungsrichtung, die Aufstellungsform, dem Leistungsniveau, etc. abhängen. Ebenfalls sollte

beachtet werden, dass die Zusammensetzung und Menge der Wirtschaftsdünger über das Jahr stark schwanken können (z.B. andere Futtermittel im Winter als im Sommer oder Stallhaltung im Winter und Weidenhaltung im Sommer etc.) [14]

### 4.1.1.2 Ernterückstände

Unter Stroh versteht man ausgedroschene und trockene Halme und Blätter von Getreide, Ölpflanzen, Faserpflanzen und Hülsenfrüchten.

Meist wird Stroh als Humus- und Nährstoffquelle in den Boden landwirtschaftlicher Nutzflächen eingearbeitet. Dies kann direkt nach der Ernte oder nach einer Nutzung als Einstreu erfolgen. Ebenfalls kann Stroh noch energetisch als Brennmaterial, als Rohstoff für synthetische Biokraftstoffe oder zur Erzeugung von Biogas verwendet werden. Stroh findet noch dazu in der Bauindustrie als Bau- und Dämmstoff Anwendung.

Das Problem bei der Strohvergärung liegt in der schweren Vergärbarkeit von lignozellulosehaltigem Material. Stroh besteht zum überwiegenden Teil aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Erfolgt kein ausreichender Aufschluss des Materials, sind sehr lange Verweilzeiten von Nöten, um das Material biologisch abzubauen.

Ein Vorteil des Strohs liegt in der sehr guten Lagerfähigkeit, die nur mit geringen Verlusten verbunden ist. [79]

### 4.1.1.3 Speisereste

Speisereste sind gewerbliche Substrate der Kategorie 3 der EU-Hygiene-Verordnung 1774/2002. Gewerbliche Speisereste fallen in Firmenkantinen, in Krankenhäusern, in Hotels, in Restaurants etc. an. Verpackte Lebensmittel, deren Ablaufdatum überschritten wurde, werden ebenfalls als Speisereste bezeichnet. [17]

Die Entsorgung gewerblicher Speiseabfälle ist über die Biotonne nicht zulässig. Die Abfallerzeuger müssen in Eigenverantwortung die Entsorgung bewerkstelligen, wie zum Beispiel durch die Beauftragung privater Unternehmen.

Basierend auf der Schweinepestrichtlinie der EU ist zum 01.01.2006 endgültig das Verfütterungsverbot für Speiseabfälle in Kraft getreten. Dementsprechend hat sich der Entsorgungsweg für Speiseabfälle zu einer biologischen Behandlung hin verlagert und wird überwiegend Biogasanlagen zugeführt.[64]

Speiseabfälle weisen einen niedrigen-pH Wert auf. Liegt der pH-Wert von Speiseabfällen unter 4, sind erhöhte Anforderungen an die Prozesskontrolle der Biogasanlage zu stellen, um einer Versäuerung des Reaktorinhaltes entgegenzuwirken.

In Speiseresten finden sich erhöhte Salz- und Nährstoffgehalte. Aufgrund des mit dem Gärprozess verbundenen Masseverlustes kommt es speziell in der flüssigen Gärrestphase zu einer Anreicherung der Salze. [64]

Problematisch ist, dass in Speiseresten nicht nur Mineral- und Nährstoffe enthalten sind, sondern oft auch ein erheblicher Anteil an Schwermetallen (besonders in den Verpackungen). [17] Eine wesentliche Rolle spielt der Fettgehalt der Speisereste. Speisereste, die einen hohen Fettgehalt aufweisen, können sehr hohe Biogaserträge erzielen. [64]

### 4.1.1.4 Fettabscheider

In Betrieben, in denen fetthaltiges Abwasser anfällt, sind Fettabscheider nach DIN 4040 einzubauen, um die Zurückhaltung von Fetten und Ölen organischen Ursprungs aus dem Schmutzwasser zu gewährleisten.

In einem Fettabscheider verringert sich die Fließgeschwindigkeit des Wassers aufgrund einer Querschnittserweiterung. Aufgrund der geringen Dichte steigen Fette nach oben, während schwere Abwasserinhaltsstoffe wie Speisereste nach unten sinken. Fette wie auch Speisereste können dann separat abgezogen werden. [68]

Neben der Biogasgewinnung ist der Einsatz von Fettabscheidern noch bei der Erzeugung von Biotreibstoffen sowie bei der Erzeugung von Sekundärrohstoffen (z.B. Seifen oder Schmiermittel) zulässig. [70]

### 4.1.1.5 Schlachtabfälle

Bei den Schlachtabfällen handelt es sich um eine Vielzahl unterschiedlicher Abfälle, die bei verschiedenen Tätigkeiten im Rahmen der Fleischproduktion anfallen. Bei der Reinigung der Transportbehälter und der Aufstallung vor der Schlachtung fällt Festmist an. Bei der Schlachtung selbst fallen Panseninhalte (das sind unverdaute Zelluloseverbindungen), Blutgerinsel, Knochenspäne, Nägel, Borsten, Hörner, Fette, Sehnen und schlecht verwertbare Körperteile wie Ohren an. In der Kuttlerei fallen Fett, Darminhalt und Bindegewebe an. Bei der Reinigung der Apparate entsteht Washwasser mit teilweise festen Inhaltsstoffen. Bei der mechanischen Vorreinigung dieser Abwässer fallen feste Abfälle und Fett aus der Flotation an (Flotatschlämme). Die meisten der vorher aufgezählten Abfälle spielen mengenmäßig eine untergeordnete Rolle. Den größten Anteil der Schlachtabfälle stellen Magen- und Darminhalt sowie Blut dar. [91]

### 4.1.1.6 Molke

In Molkereien fallen große Mengen überschüssiger Molke an. Diese besteht in etwa zu 4,8 % aus Laktose, zu 0,6 % aus Molkenprotein und zu 0,6 % aus Mineralsalzen. Der Rest und somit größte Anteil der Molke ist Wasser.

Molke dient als Ausgangsprodukt für Molkegetränke (die absetzbaren Mengen sind sehr begrenzt), Molkenpulver und Molkenproteine. Ein Großteil der Molke (71 %) dient als Futtermittelergänzung in der Schweinemast. [72]



### 4.1.1.7 Biotonne

Die Biotonne wurde für die Sammlung einer Vielzahl an biogenen Abfallstoffen, wie verdorbene Lebensmittel, Obst und Gemüseabfälle, Schnittblumen und Gartenunkraut, aber auch Sägespäne, Erden, Einwickelpapier, Kaffeefilter etc. ins Leben gerufen. Häufig findet man jedoch auch Störstoffe, bei denen es sich in der Regel um Kunststoffe, Glas oder Steine handelt, die nicht in die Biotonne gegeben werden sollten. Allgemein kann man sagen, dass das Biotonnenmaterial eher schlecht vergärbbar ist. Dies ist auch der Grund, weshalb dieses Material zur Zeit nahezu vollständig in die Kompostierung geht. [78]

Wie auch bei anderen potentiellen Substraten für Biogasanlagen unterliegt der Inhalt der Biotonne starken jahreszeitlichen Schwankungen. Während in den Monaten Mai bis September ein sehr hoher Anteil an Gartenabfällen in der Biotonne zu erwarten ist (bis zu 80 %), werden in den Wintermonaten überwiegend häusliche Küchenabfälle gesammelt.

Das Verhältnis der Gartenabfälle zu Küchenabfällen hängt nicht nur von der Jahreszeit sondern auch von der Bebauungsstruktur ab. In städtischen Gebieten findet man überwiegend Materialien mit hohem Feuchteanteil, die sich gut zur Vergärung eignen würden, während in ländlichen Gebieten der Anteil der Gartenabfälle sehr hoch ist. Allerdings weist das Biotonnenmaterial in städtischen Gebieten den höchsten Anteil an Störstoffen auf (bis zu 10 %). [64]

### 4.1.1.8 Grün- und Strauchschnitt

Grün- und Strauchschnitt fällt durch Pflegemaßnahmen im Bereich der Straßen, Schienen, Ufer und anderen Grünflächen (z.B. Parks, private Gärten, etc.) an.

Die Schwermetallkonzentration von Straßenbegleitgrün liegt in der Regel unter den Grenzwerten der BioAbfV und darf deshalb für die Kompostierung oder für den Einsatz in einer Biogasanlage verwendet werden. Zu berücksichtigen sind aber die höheren Chlorid-, Schwefel- und Stickstoffwerte in halmartigem Straßenbegleitgrün verglichen mit anderer Biomasse.

Ebenfalls problematisch für die Nutzung in Vergärungsanlagen ist der hohe Verholungsgrad (hohe Ligningehalt) des Strauchschnittes aufgrund des fortgeschrittenen Wachstumsstadiums der Pflanze. [64] Der Strauchschnitt dient bei der Kompostierung als Strukturmaterial. Deshalb stellt er bei dieser eine besonders wichtige Komponente dar.

## 4.1.2 Substratbewertung

In diesem Kapitel werden verschiedene technische, rechtliche und wirtschaftliche Eigenschaften der Substrate angegeben.

### 4.1.2.1 Gaserträge

Tabelle 4.1 zeigt den TS-Gehalt, oTS-Gehalt, Biogausbeute, Methankonzentration und Methanausbeute sowie die verwendeten Quellen relevanter Substrate.

## 4 Substratstudie

	TS-Gehalt	oTS-Gehalt	Biogas- ausbeute	Methan- konzentration	Methanausbeute		Quelle
	[% d. FM]	[% d. TS]	[Nm <sup>3</sup> / kg <sub>oTS</sub> ]	[Vol.-%]	[l / kg <sub>oTS</sub> ]	[l / kg <sub>FM</sub> ]	
Rindergülle	10	80	0,38	55	209	17	[1]
Rinderfestmist	25	85	0,45	55	248	53	[1]
Fettabscheider	5	90	1,00	68	680	31	[1]
Speisereste	16	87	0,87	60	522	73	[1]
Blut	18	96	0,68	70	476	82	[2]
Darm- und Mageninhalte	14	81	0,35	65	228	25	[3]
Flotatschlämme	15	90	1,00	60	600	81	[2]
Grünschnitt	12	87	0,62	60	369	39	[3]
Biotonne	32	67	0,37	63	233	50	[4]
Weizensroh	86	93	0,39	51	196	156	[5]
Mais Restpflanze	35	93	0,49	52	251	81	[5]

Tabelle 4.1: TS-Gehalt, oTS-Gehalt, Biogasausbeute, Methankonzentration und Methanausbeute relevanter Substrate

Die in Tabelle 4.1 angegebenen Werte sind Richtwerte. Die Biogasausbeute, sowie die Methankonzentration kann je nach Herkunft der Substrate, je nach Jahreszeit, etc. stark schwanken. Um mögliche Fehlentscheidungen und Fehlplanungen zu vermeiden, sollte auf jeden Fall der Methanertrag einzelner Substrate mittels im Labor durchgeführter Gärtests überprüft werden.

### 4.1.2.2 Nährstoffgehalte

Tabelle 4.2 zeigt die Stickstoff-, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte sowie die verwendeten Quellen relevanter Substrate.

	N	NH <sub>4</sub> Gärrest	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Quellen
	[% TS Frischgut]				
Rindergülle	5,20	3,38	2,10	6,70	[1]
Rinderfestmist	2,20	1,43	1,40	3,40	[1]
Fettabscheider	1,86	1,21	0,36	0,30	[1]
Speisereste	3,20	2,08	1,10	1,60	[1]
Blut	33,13	21,53	0,00	0,00	[6]
Darm- und Mageninhalte	5,33	3,46	0,00	0,00	[6]
Flotatschlämme	6,05	3,93	1,95	0,13	[7]
Grünschnitt	2,50	1,63	4,00	2,00	[3]
Biotonne	1,60	1,04	0,50	0,00	[3]
Weizensroh	0,60	0,39	0,19	1,33	[5]
Mais Restpflanze	1,06	0,69	0,46	1,20	[5]

Tabelle 4.2: Stickstoff-, Phosphor-, Kaliumgehalte relevanter Substrate

Die in Tabelle 4.2 angegebenen Werte sind Richtwerte. Die tatsächlichen Nährstoffwerte können von den Richtwerten abweichen.

#### 4.1.2.3 Gliederung der Substrate nach dem Abfallverzeichnis

Die Klassifizierung von Abfällen mittels Abfallschlüsselnummer ist unentbehrlich wenn es um rechtliche Belange jeder Art geht. Deshalb findet sich in Tabelle 4.3 eine Auflistung relevanter Substrate mit der Abfallschlüsselnummer für Österreich und Deutschland.

	Abfallschlüsselnummern für Österreich	Abfallschlüsselnummern für Deutschland
	[-]	[-]
Rindergülle		02 01 06
Rinderfestmist		02 01 06
Fettabscheider	92121	19 08 09
Speisereste	92402	20 01 08
Blut	92510	02 02 03
Darm- und Mageninhalt	92409	02 02 03
Flotatschlämme	92504	02 02 04
Grünschnitt	92102	20 02 01
Biotonne	92450	20 03 01

Tabelle 4.3: Abfallschlüsselnummern relevanter Substrate für Österreich und Deutschland [109]  
[110]

#### 4.1.2.4 Einteilung der Substrate nach der Vergütungsmöglichkeit des EEG 2012

Tabelle 4.4 zeigt die Vergütungskategorie relevanter Substrate, sowie die Einspeisevergütung dieser Substrate für eine BHKW-Leistung von 150 kW<sub>el</sub> und eine BHKW-Leistung von 500 kW<sub>el</sub>. Details zum EEG 2012 finden sich in Kapitel 3.5.3.

	Vergütungskategorie	E. V. bis 150 kW	E. V. 150 kW bis 500 kW
	[Cent/kWh <sub>el</sub> ]	[Cent/kWh <sub>el</sub> ]	[Cent/kWh <sub>el</sub> ]
Rindergülle	ESK 2	21,46	19,58
Rinderfestmist	ESK 2	21,46	19,58
Fettabscheider	Grundvergütung	13,46	11,58
Speisereste	Grundvergütung	13,46	11,58
Blut	Grundvergütung	13,46	11,58
Darm- und Mageninhalt	Grundvergütung	13,46	11,58
Flotatschlämme	Grundvergütung	13,46	11,58
Grünschnitt	Grundvergütung	13,46	11,58
Biotonne	Grundvergütung	13,46	11,58
Weizensroh	ESK 2	21,46	19,58
Mais Restpflanze	ESK 2	21,46	19,58

Tabelle 4.4: Vergütungskategorie und Einspeisevergütungen relevanter Substrate für eine BHKW-Leistung von 150 kW<sub>el</sub> und einer BHKW-Leistung von 500 kW<sub>el</sub>

Da die Ökostromverordnung nur zwischen tierischen Wirtschaftsdüngern und anderen als rein

landwirtschaftlichen Substrateinsatzstoffen unterscheidet, ist für österreichische Biogasanlagen eine ähnliche Einteilung der Substrate wie in Tabelle 4.4 nicht sinnvoll.

#### 4.1.2.5 wirtschaftliche Substratbewertung

In diesem Kapitel werden Substrate nach wirtschaftlichen Kriterien bewertet, indem die durch die Substrate verursachten Kosten und Erlöse auf deren Energieertrag bezogen werden.

#### Durchführung der Berechnungen

Um die Aufkonzentrierung von Nähr- und Schadstoffen in Gärresten sowie die anfallenden Gärrestmassen berechnen zu können, muss der Abbaugrad der einzelnen Substrate bestimmt werden.

Die ungefähren Gaserträge der einzelnen Substrate sowie der Methangehalt des produzierten Biogases sind bekannt (siehe Tabelle 4.1). Ausgehend von diesen Werten kann über die ideale Gasgleichung die Menge an  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  die je kg organische Trockensubstanz freigesetzt wird, berechnet werden. Über die molare Masse der  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$ -Moleküle lässt sich der Massenverlust der Substrate ermitteln. Es kann davon ausgegangen werden, dass beinahe der gesamte Sauerstoff aus dem Gärsubstrat stammt, da die Sauerstofflöslichkeit des Wassers äußerst gering ist.

Anschließend wird beispielhaft die Abbaugradberechnung von Rindergülle angegeben.

$$\text{Molmenge}_{\text{Biogas}} = \frac{0,38\text{m}^3(i.N.)}{\text{kg}_{\text{oTS}}} * \frac{101325\text{N}}{\text{m}^2} * \frac{1}{273,14\text{K}} * \frac{\text{mol}}{8,3145\text{Nm}} = 17 \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{oTS}}} \quad (4.1)$$

$$\text{Abbaugrad}_{\text{Rindergülle}} = \frac{17\text{mol}}{\text{kg}_{\text{oTS}}} * (55\% * \frac{0,016\text{kg}}{\text{mol}} + (1 - 55\%) * \frac{0,044\text{kg}}{\text{mol}}) * 100\% = 48,5\% \quad (4.2)$$

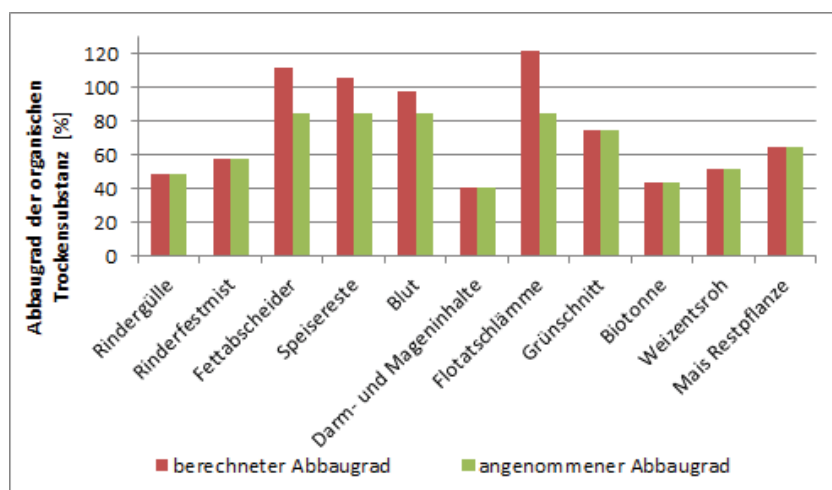


Abbildung 4.1: Minimaler, Maximaler, und angenommener Abbaugrad relevanter Substrate

Fettabscheider, Speisereste, Flotatschlämme und Blut weisen einen sehr hohen organischen Trockensubstanzabbaugrad auf. Der errechnete Abbaugrad der ersten 3 Substrate liegt sogar über

#### 4 Substratstudie

100 %. Dies kann darin begründet liegen, dass die betrachteten Substrate einer schwankenden Zusammensetzung unterliegen und es sich bei den in Tabelle 4.1 angegebenen Werten um Anhaltswerte handelt. Bei allen vier Substraten wurde daher ein Abbaugrad der organischen Trockensubstanz von 85 % angenommen.

Die anorganische Substanz sowie das in den Substraten enthaltene Wasser bleibt während des Gärprozesses erhalten. Die Masse der Gärreste errechnet sich deshalb aus der Summe des durch die Substrate eingebrachten Wassers, die eingebrachte anorganische Masse und die verbliebene organische Masse.

Während des Gärprozesses bleiben ebenfalls die durch die Substrate eingebrachten Nährstoffe erhalten. Lediglich beim Stickstoff kann es bei der Lagerung und der Ausbringung zu Verlusten kommen. Durch die während des Gärprozesses auftretende Massenabnahme, kommt es zu einer Aufkonzentrierung der Nährstoffe im Gärrest. [14]

Für die Ermittlung des Gärrest- und Substratdüngerwertes wurden die in Tabelle 4.5 angegebenen Werte herangezogen.

P2O5	K2O	CaO	N
[€/kg]			
1,25	0,69	0,13	0,90

Tabelle 4.5: für die Berechnung verwendete Nährstoffkosten [96]

Für die Ermittlung der spezifischen Substratinvestkosten wurden Angebote bei der Firma UTS Biogas, 2G und Pondus eingeholt. Abbildung 4.2 zeigt ein beispielhaftes Schema der angebotenen Biogasanlage.

#### 4 Substratstudie

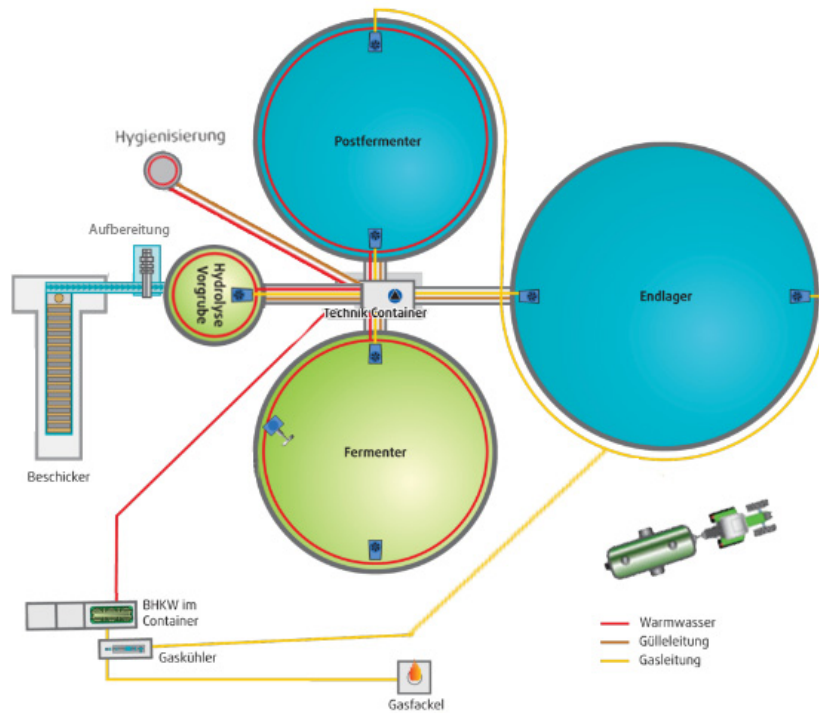


Abbildung 4.2: Biogasanlagenschema, verändert nach [107]

Die Nutzungsdauer der Biogasanlage wurde mit 12 Jahren und die des Blockheizkraftwerkes mit 8 Jahren angenommen. Die Investkosten und Zinskosten des Fermenters und des restlichen Investes (Baumaßnahmen, Substrataufbereitung, Hydrolyse, Fahrzeuge, Sonstiges) wurden auf die innerhalb der Lebensdauer insgesamt behandelte Substratmasse bezogen. Dieser Wert wurde mit der spezifischen Fermenterbelastung und mit der energiebezogenen Substratmasse der einzelnen Substrate multipliziert, um die spezifischen Substratinvestkosten des Fermenters und des restlichen Investes zu erhalten. Um die spezifische Fermenterbelastung genau berechnen zu können, müsste man über den Abbauverlauf und über die Abbaugeschwindigkeit der einzelnen Substrate genau Bescheid wissen. Der Einfachheit halber wurde die spezifische Fermenterbelastung der einzelnen Substrate durch Mittelung der energiebezogenen Substrat- und Gärrestmassen berechnet.

Die Investkosten und Zinskosten der Hygienisierung, wurden auf die innerhalb der gesamten Nutzungsdauer durch die Hygienisierung behandelte Substratmasse, bezogen. Dieser Wert wurde anschließend mit der energiebezogenen Substratmasse multipliziert, um die spezifischen Substratinvestkosten der Hygienisierung zu erhalten.

Die spezifischen Substratinvestkosten des Blockheizkraftwerkes, wurden durch den Bezug der Invest- und Zinskosten des BHKWs, auf die innerhalb der Blockheizkraftwerksnutzungsdauer verstromten Biogasenergie, ermittelt. Diese Kosten betragen für jedes Substrat  $1,4 \text{ Cent/kWh}_{\text{Biogas}}$ .

Für die Ermittlung der spezifischen Substrattransportkosten wurden im Falle der Speisereste

und der Fettabscheider ein Anlieferweg von 20 Kilometer angenommen. Im Falle der anderen Substrate wurden die Anlieferwege der einzelnen Mengen über die angenommenen Mengen gewichtet und durch die insgesamt bezogene angenommene Menge dividiert, um so den durchschnittlichen Anlieferweg zu erhalten.

Im Falle der Wirtschaftsdünger, des Strohs und des Maisstrohs (Mais Restpflanze) wird angenommen, dass spezifische Gärrestentsorgungskosten durch die Rückführung der Nährstoffe durch das Gärsubstrat an den Landwirt entstehen. Weist das Gärsubstrat eine höhere oder niedrigere Nährstoffkonzentration als die bezogenen Substrate auf, muss mehr oder weniger Gärsubstrat rückgeführt werden, wie Substrate bezogen worden sind. Dies wird in der Berechnung für die Wirtschaftsdünger, das Stroh sowie dem Maisstroh berücksichtigt. In der weiteren Berechnung wird für alle anderen Gärreste angenommen, dass diese aufgrund der guten Düngewirkung kostenneutral von den Landwirten auf deren Feldern ausgebracht werden. Der Vollständigkeit halber wurden die Gärrestentsorgungskosten der anderen Substrate in Abbildung 4.3 aufgelistet.

Für die Substrataufbereitung fiel die Wahl auf einen Prallreaktor, da mit diesem auch verpackte Lebensmittel sehr gut aufgeschlossen werden können. Die Verpackung wird meist nicht so fein wie das Substrat aufgeschlossen und kann dadurch durch einen anschließenden Siebvorgang leicht von dem aufgeschlossenen Substrat entfernt werden. Ursprünglich wurde der Prallreaktor für den Aufschluss von Metallverbunden entwickelt. Es handelt sich deshalb um ein robustes Gerät, dass relativ unempfindlich auf Störstoffe wie Metalle und Steine reagiert (besonders relevant für das Biotonnenmaterial). Für die Ermittlung der spezifischen Aufbereitungskosten mittels Prallreaktor wurde ein Angebot der Firma ANDRITZ herangezogen, aus dem alle relevanten Werte entnommen wurden. Im Falle der spezifischen Aufbereitungskosten wurden nicht nur die Investkosten, sondern auch die Verschleiß-, Strom-, und Lohnkosten berücksichtigt. Momentan wurden die spezifischen Aufbereitungskosten für eine jährliche Auslastung von 2037 Stunden gerechnet. Kann eine größere Auslastung erreicht werden, sinken die spezifischen Aufbereitungskosten, da die spezifischen Investkosten der Aufbereitung sinken.

Grünschnitt, Biotonnenmaterial und Stroh (auch Mais Restpflanze) sollten auf jeden Fall aufgeschlossen werden, um Prozessstörungen im Fermenter vorzubeugen. Ebenfalls kann ein Aufschluss von Rinderfestmist (bei hohem Strohanteil), von Mageninhalten (bei Zugabe zusätzlicher Schlachtkörperteile der Kategorie 3) und von Speiseresten sinnvoll sein. Handelt es sich bei den Speiseresten um ein grobstückiges, inhomogenes Material, ist ein ausreichender Aufschluss vor der Hygienisierung gesetzlich vorgeschrieben (siehe Kapitel 3.2.2). Ebenfalls ist eine Hygienisierung der Mageninhalte vorzusehen, wenn diese mit anderen Abfällen der Kategorie 3 verunreinigt wurden.

Ein Mehrertrag an Energie aufgrund des Substrataufschlusses wurde nicht in der Berechnung berücksichtigt, da es diesbezüglich von ANDRITZ nur sehr wenig Informationen gibt. Die Fir-

ma Lehmann Maschinenbau GmbH, die ein anderes Aufschlussverfahren entwickelt hat, gibt über Gasmehrerträge jedoch ausreichend Auskunft. In Kapitel 5.2.2 wird die Sinnhaftigkeit des Aufschlussverfahrens mit dem Bio Extruder der Firma Lehmann Maschinenbau GmbH geprüft, wenn als Entscheidungskriterium nicht die Stabilität des Fermentationsprozesses, sondern alleine die Wirtschaftlichkeit aufgrund der erzielbaren Gasmehrerträge zählt.

**Ergebnisse der wirtschaftlichen Substratbewertung**

Abbildung 4.3 zeigt die spezifischen Investkosten der Hygienisierung, des Fermenters und des restlichen Investes und die spezifischen Substrattransport- und Gärrestentsorgungskosten. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die spezifischen Investkosten und die spezifischen Aufbereitungskosten in Abhängigkeit der sich über die gesamten Nutzungsdauer ergebenden Auslastung des Fermenters, der Hygienisierungsanlage und der Aufbereitungsanlage, anteilmäßig ändern. Die gewählte Darstellung eignet sich jedoch sehr gut, um Substrate miteinander zu vergleichen.

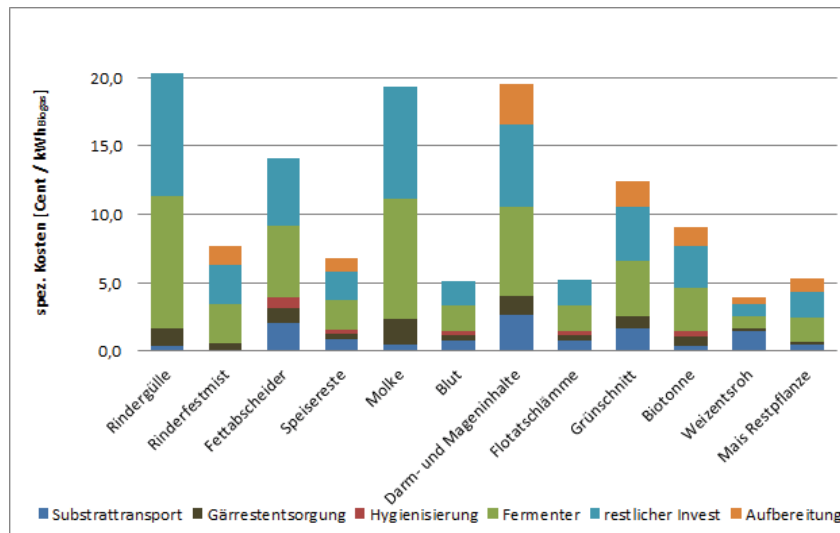


Abbildung 4.3: spezifische Investkosten der Hygienisierung, des Fermenters und des restlichen Investes, spezifische Substrattransport- und Gärrestentsorgungskosten

Aufgrund des sehr geringen Biogasertes der Rindergülle (bezogen auf die Frischmasse), weist dieses Substrat die höchsten spezifischen Investkosten des Fermenters und des restlichen Investes auf. Ebenfalls fallen bei der Ausbringung der vergorenen Rindergülle auf landwirtschaftliche Flächen hohe spezifische Gärrestentsorgungskosten an. Die spezifischen Substrattransportkosten der Rindergülle fallen aufgrund des ausreichend vorhandenen Angebotes in unmittelbarer Umgebung des Werkes gering aus.

Molke ist eine wässrige Substanz mit geringem Trockensubstanzanteil und deswegen der Rindergülle sehr ähnlich. Aufgrund der Nähe zur Gmundner Molkerei würden im Falle eines Molkebezuges ebenfalls sehr geringe spezifische Transportkosten anfallen.



#### 4 Substratstudie

Die spezifischen Kosten des Rinderfestmistes liegen weit unter den Kosten der Rindergülle. Dies liegt vor allem an dem höheren Trockensubstanzgehalt und dem höheren organischen Trockensubstanzgehalt bei einer etwa 20 % höheren Methanausbeute der organischen Trockensubstanz. Dadurch ergeben sich auf die Frischmasse bezogen höhere Biogaserträge.

Die Fettabscheider- und die Mageninhalte weisen ebenfalls noch sehr hohe spezifische Investkosten auf. Ein weiterer Nachteil beider Substrate sind die sehr hohen spezifischen Substrattransportkosten, die jedoch durch die Annahmeerlöse kompensiert werden können (siehe Abbildung 4.4). Die bei den Fettabscheidern notwendige Hygienisierung verursacht zusätzliche spezifische Investkosten. Die spezifischen Aufbereitungskosten der Darm- und Mageninhalte kommen nur zu tragen, wenn das Material mit anderen, grobstückigen Schlachthausabfällen der Kategorie 3 verunreinigt ist.

Alle weiteren Substrate weisen aufgrund der auf die Frischmassen bezogenen sehr hohen Gaserträge niedrige spezifische Investkosten auf.

Die aufgrund der schweren Vergärbarkeit des Strohens eventuell zusätzlich entstehenden Prozesskosten wurden nicht berücksichtigt. Ebenfalls wurde bei der Bewertung der Substrate nicht der Trockensubstanzgehalt der Substrate berücksichtigt. Wird zum Beispiel eine Nassfermentation betrieben, sind die in Abbildung 4.3 aufgelisteten Kosten nur gültig, wenn bei Einsatz eines bestimmten Substrates der Trockensubstanzgehalt des Fermenterinhaltens nicht über 15 % steigt. Ansonsten müsste Prozesswasser dem Fermenter zugegeben werden, was zu einer zusätzlichen Fermenterraumbelastung führen würde.

Weiters wurden die spezifischen Flotatschlammkosten nicht korrekt dargestellt. Diese sind als tierische Nebenprodukte der Kategorie 2 einzuordnen und müssen deshalb vor oder nach der Fermentierung einer Dampfdrucksterilisation unterzogen werden. Die Hygienisierungskosten der Flotatschlämme würde aufgrund des aufwändigen Prozesses ein vielfaches der in Abbildung 4.3 abgebildeten momentanen Hygienisierungskosten betragen.

Abbildung 4.4 zeigt die spezifischen Annahmeerlöse relevanter Substrate sowie weitere wirtschaftliche Kennwerte.

## 4 Substratstudie

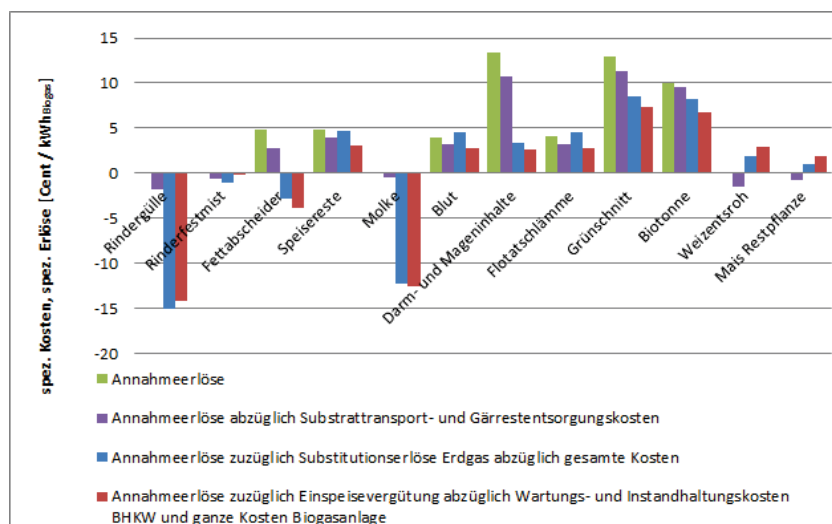


Abbildung 4.4: wirtschaftliche Kennwerte relevanter Substrate

Die Annahmeerlöse abzüglich den Substrattransport- und Gärrestentsorgungskosten, sollte bei den Wirtschaftsdüngern und bei den Ernterückständen nicht über dem Erdgaspreis von 5,29 Cent/kWh (bei einer thermischen Verwertung des Biogases) oder über der Einspeisevergütung abzüglich den Betriebskosten des BHKWs (bei Verstromung des Biogases) liegen. Für eine österreichische Biogasanlage mit einer maximalen elektrischen Leistung von 250 kW<sub>el</sub> und dem momentanen Substratmix, würde die Einspeisevergütung abzüglich den Betriebskosten 5,08 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> betragen. Liegen die Kosten über den genannten Grenzen, verursacht alleine die Beschaffung der Substrate und die Entsorgung der Gärreste höhere Kosten, als durch das entstehende Produkt Erlöse erzielt werden können. Ist der Differenzbetrag negativ, liegt aber noch unter den genannten Grenzen, kann bei schlechter Auslastung des Fermenters Substrat bezogen werden.

Für alle anderen Substrate gilt selbiges mit dem einzigen Unterschied, dass die Gärrestentsorgungskosten nicht berücksichtigt werden müssen.

Die Annahmeerlöse zuzüglich den Substitutionserlösen des Erdgases abzüglich den gesamten Kosten (gesamte Kosten sind Kosten: der Biogasanlage, des Substrattransportes und im Falle der Wirtschaftsdünger und Ernterückstände der Gärrestentsorgung) gibt Aufschluss, ob mit dem jeweiligen Substrat bei einer thermischen Verwertung des Biogases, die Biogasanlage langfristig wirtschaftlich betrieben werden kann. Substrate, die diesbezüglich einen positiven Wert aufweisen, sollten bei der Substratauswahl bevorzugt werden.

Die Annahmeerlöse zuzüglich der Einspeisevergütung abzüglich den Wartungs-, Instandhaltungs- und Investkosten des BHKWs und abzüglich den gesamten Kosten gibt Aufschluss, ob mit dem jeweiligen Substrat bei einer Verstromung des Biogases, die Biogasanlage langfristig wirtschaftlich betrieben werden kann. Für Abbildung 4.4 wurde die Einspeisevergütung nach dem EEG 2012 herangezogen, da im EEG 2012 ein Unterschied zwischen „normalen“ und ökologisch vor-

teilhaften Einsatzstoffe getroffen wird. Die Einspeisevergütung nach der Ökostromverordnung würde für eine Biogasanlage, die mit den in Kapitel 5.1 aufgelisteten Substratmix betrieben wird, für jedes Substrat dieselbe Vergütungshöhe von 5,65 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> vorsehen. Somit würden die Annahmeerlöse zuzüglich der Einspeisevergütung abzüglich der Biogasanlagen- und BHKW Anlagenkosten immer über den Annahmeerlösen zuzüglich des Erdgaspreises abzüglich den Biogasanlagenkosten liegen.

Im Falle einer Einspeisevergütung nach dem EEG 2012 wäre nach Abbildung 4.4 die Verstromung der Biogaserträge der Wirtschaftsdünger und der Ernterückstände gegenüber einer thermischen Verwertung im Vorteil.

## 4.2 Biogasanlagen im Umkreis des Zementwerkes Gmunden

In Oberösterreich sind mit Stand 1.1.2010 insgesamt 76 Biogasanlagen in Betrieb. Davon sind 25 Biogasanlagen Abfallvergärungsanlagen, die 2009 insgesamt 150.976 Tonnen Abfälle vergoren haben. [81] Abbildung 4.5 zeigt die prozentuale Massenaufteilung der im Jahre 2009 in Oberösterreich insgesamt vergorenen Abfälle.

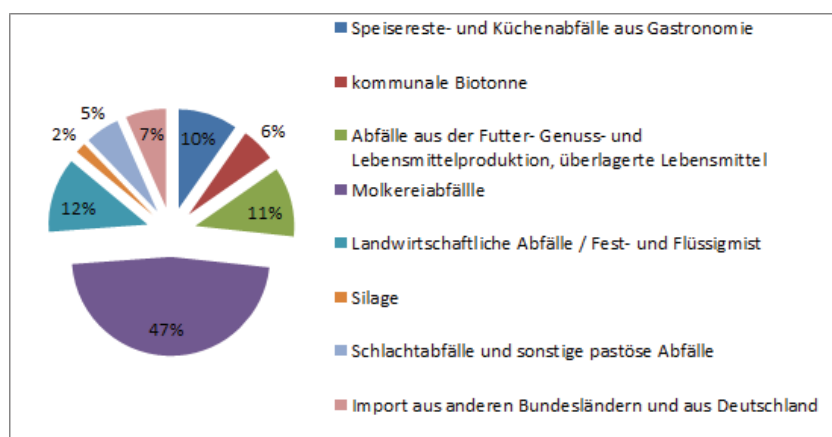


Abbildung 4.5: Massenaufteilung der im Jahre 2009 in Oberösterreich insgesamt vergorenen Abfälle [81]

Abbildung 4.6 zeigt die sich im Umkreis des Gmundner Zementwerkes befindlichen Abfallvergärungsanlagen (braune Symbole) und Kompostierungsanlagen (grüne Dreiecke).

## 4 Substratstudie

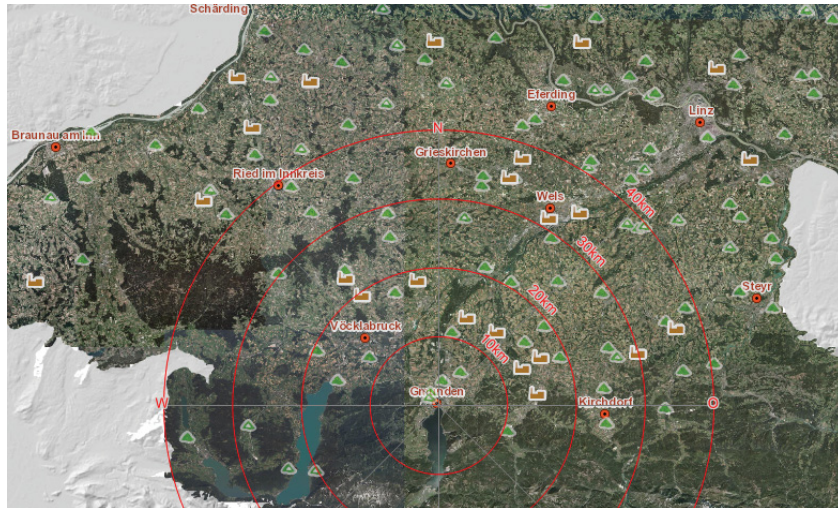


Abbildung 4.6: Abfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen im Umkreis des Gmunder Zementwerkes [92]

Gerade in unmittelbarer Umgebung zu Gmunden befinden sich acht Abfallvergärungsanlagen in Betrieb.

Aufgrund der schwierigen Substratverfügbarkeit im Umkreis des Zementwerkes Rohrdorf, wurde die Biogaskonkurrenz für den Rohrdorfer Standort nicht ermittelt.

### 4.3 Theoretisches und realistisches Substratpotential im Umkreis der Zementwerke

Abbildung 4.7 gibt einen Überblick über die möglichen Substrate für Biogasanlagen und deren Herkunft.

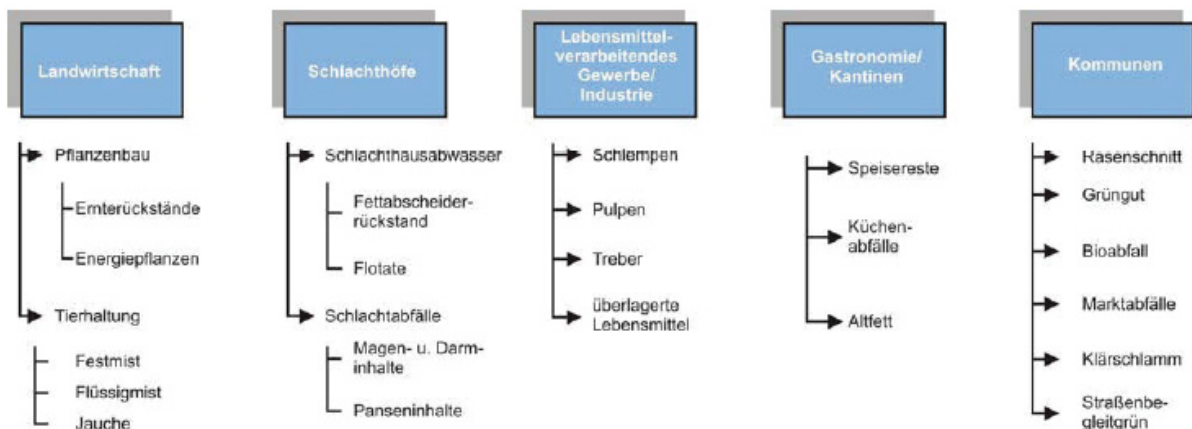


Abbildung 4.7: Substrate für Biogasanlagen und deren Herkunft [94]

Um eine möglichst hohe Akzeptanz in der Bevölkerung zu erreichen, wurde festgelegt, die Bio-

gasanlage nicht mit Substraten, die in Konkurrenz mit der Lebensmittelindustrie stehen, wie z.B. Mais, Zuckerrüben, etc., zu betreiben. Energiepflanzen sollen deshalb als Substrat für die Rohrdorfer und Gmundner Biogasanlage ausgeklammert werden.

### 4.3.1 Theoretisches Substratpotential im Umkreis des Gmundner Zementwerkes

Für die nachfolgende Potentialerhebung wurden interessante Betriebe und Sammler im Umkreis des Gmundner Zementwerks betrachtet. Aufgrund der zu großen Entfernungen zum Zementwerk oder der großen Nutzungskonkurrenz mit anderen reststoffverarbeitenden Betrieben (hauptsächlich die Schweineproduktion), fließen die biogenen Abfälle der Brauereien und der Fruchtsaftindustrie nicht in diese Studie ein.

Zu Beginn der nachfolgenden Unterkapitel findet sich eine Zusammenfassung der für die Substratstudie relevanten Betriebe, Gemeinden etc. in je einer Tabelle (siehe Tabelle 4.6 bis 4.13). Über die Entfernungen des Betriebes / der Gemeinde zum Zementwerk, konnten die Transportkosten der Substrate ermittelt werden. Richtwerte zu den Substrattransportkosten wurden nach [111] bestimmt. Es wurde angenommen, dass für den Substrattransport 4-achsige LKWs mit 20 Tonnen Ladegewicht und einem Ladevolumen von 40 m<sup>3</sup> zum Einsatz kommen. Die angenommenen Transportkosten betragen 2,5 Euro je Kilometer. In diesen Kosten ist die Arbeitskraft, der Treibstoffverbrauch und der LKW inkludiert. Für die durchgeführten Berechnungen wurde eine Ladegewichts- oder eine Ladevolumenausnutzung von 80 % angenommen. Wurde im Text nicht extra auf die Berechnung der Substrattransportkosten hingewiesen, wurde die Substrattransportkosten Berechnung mit den obigen Annahmen durchgeführt. Die Summe der auf die Energieausbeute bezogenen Substratannahmeken und Substrattransportkosten ergeben die variablen Substratkosten. Handelt es sich bei den Substratannahmeken um Substraterlöse, wurden die auf die Energieausbeute bezogenen Substratannahmeken mit einem Preisverfall von 30 % versehen (Kalkulationssicherheit). Die variablen Substratkosten stellen ein erstes Entscheidungskriterium über einen möglichen Substratbezug dar. Liegen diese Kosten über dem Erdgaspreis (5,29 Cent/kWh<sub>Erdgas</sub> [98]), ist von einem Substratbezug abzusehen (falls eine thermische Verwertung des Biogases im Drehrohrofen vorgesehen ist). Die Gärrestentsorgungskosten wurden abgesehen von den Wirtschaftsdüngern und den Ernterückständen nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wurde, dass die Gärreste aufgrund des hohen Nährstoffgehaltes, von den umliegenden Landwirten kostenneutral auf die Felder ausgebracht werden (Näheres dazu im Kapitel 5.2.1). Aufgrund weiterer Kriterien die in Kapitel 4.1.2.5 erarbeitet wurden und vor allem aufgrund der persönlichen Einschätzung der befragten Betriebe, wurde eine für das Gmundner Zementwerk beziehbare Substratmenge geschätzt. Über die geschätzte, jährlich beziehbare Substratmenge können die jährlichen Substratkosten ermittelt werden, die ebenfalls in den Tabellen 4.6 bis 4.13 ausgegeben wurden. Diese Substratkosten beinhalten jedoch nur die Substratannahmeken und die Substrattransportkosten.

Neben dieser Tabelle findet sich in den folgenden Unterkapiteln eine kurze Beschreibung der

befragten Betriebe mit einer persönlichen Einschätzung bezüglich der Substratbeziehbarkeit.

#### 4.3.1.1 Landwirtschaftliche Substrate

Das Substratpotential der Wirtschaftsdünger wurde über die Viehbestände der jeweiligen Gemeinden ermittelt. Diese Daten wurden von der Landwirtschaftskammer Oberösterreich zur Verfügung gestellt. In Tabelle 4.6 findet sich ein Auszug der ersten 4 Gemeinden von insgesamt 17 betrachteten Gemeinden.

Gemeinden	Entfernung zu Zementwerk [km]	Rinder (0,5 bis 2 Jahre) [-]	Rindergülle (10% TS) [m <sup>3</sup> /Jahr]	spez. Substratkosten [€/kWh]	Menge an Biogasanlage [%]	[t/Jahr]	Kosten [€/Jahr]
Pinsdorf	1,5	187	1.964	0,016	5	98	263
Gmunden	2,6	491	5.156	0,018	2	103	312
Altmünster	3,1	1.961	20.591	0,019	0	0	0
Ohlsdorf	5,7	569	5.975	0,024	0	0	0

Tabelle 4.6: Entfernung der Gemeinden zum Zementwerk, Anzahl der Rinder, jährlich anfallende Güllemenge, spezifische Substratkosten, angenommene beziehbare Substratmenge, jährliche Substratkosten

Da es der Landwirtschaftskammer OÖ nicht möglich war Rückschlüsse auf die Viehhaltung und sich der daraus ergebenden Mistqualität zu ziehen, wurde für die Potentialerhebung der Einfachheit halber reine Gülle angenommen. Ebenfalls konnte die Anzahl der Ferkel, Mastschweine und Zuchtschweine nicht getrennt angegeben werden. Deshalb wurde ein mittleres Gewicht der Tiere zwischen 20 bis 45 kg angenommen.

In Tabelle 4.6 sind die Entfernungen der Gemeinden zum Zementwerk und die Anzahl der Rinder der jeweiligen Gemeinden aufgelistet. Ebenfalls ist die pro Jahr anfallende Güllemenge, die spezifischen Substratkosten und die angenommene beziehbare Substratmenge angegeben.

Die Anzahl der Tiere wurde über die in Klammer angegebenen Werte in Großvieheinheiten umgerechnet (Jungrindvieh 1 bis 2 Jahre alt GV/Stück = 0,7 [14]). Über die Großvieheinheiten konnte anschließend die anfallende Güllemenge ermittelt werden (jährliche Güllemenge Rind = 15 m<sup>3</sup>/GV).

Die Substratannahmekosten der Rindergülle wurden mit 0 Euro angesetzt. Diese Annahme ist nur legitim, wenn der Landwirt im Gegenzug Gärreste zur Düngung seiner Felder erhält. Geschieht dies nicht, müssen dem Landwirt die entgangenen Nährstoffkosten der Gülle ersetzt werden. Die Summe der Substrattransportkosten und der Gärrestentsorgungskosten beträgt für Gülle aus der Gemeinde Pinsdorf 1,7 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>. Eine Annahme der Gülle ist also bei geringer Fermenterraumauslastung möglich. Aufgrund der positiven spezifischen Substratkosten wurde nur eine sehr geringer Bezug von Rindergülle angenommen. Da die Schweinegülle

#### 4 Substratstudie

aufgrund der auf die Frischmasse bezogenen niedrigeren Methanerträge noch höhere Transport- und Gärrestausbringungskosten als die Rindergülle aufweist, wurde für die Substratstudie die angenommene Menge an Schweinegülle mit null angesetzt. Der Bezug von Festmist ist aufgrund der etwas geringeren spezifischen Substratkosten vorteilhafter und sollte falls möglich der Rinder- und Schweinegülle vorgezogen werden (siehe Kapitel 4.1.2.5).

Laut [100] fallen Ernterückstände wie Kartoffelkraut und Rübenblatt nur in sehr geringen Mengen an, da ein Anbau dieser Lebensmittel in den betrachteten Gemeinden eher unüblich ist. Allerdings fällt in den betrachteten Gemeinden aufgrund des Anbaus von Weizen, Gerste, Raps und Mais Stroh an.

Die in den Gemeinden anfallende jährliche Strohmenge konnte durch die von [101] zur Verfügung gestellten Daten zur Ackerflächennutzung eruiert werden. Über den Strohertrag der verschiedenen Getreidearten wurde die jährliche Strohmenge ermittelt, die in Tabelle 4.7 angegeben ist.

Gemeinden	Distanz zum Zementwerk [km]	Strohmenge Winterweizen	Strohmenge Wintergerste	Strohmenge Winterraps	Strohmenge Körnermais [t/Jahr]	Gesamtstrohmenge	Strohbedarf Tiere	überschüssige Strohmenge
Pinsdorf	1,5	84	168	0	0	251	272	-21
Gmunden	2,6	0	114	0	0	114	654	-540
Altmünster	3,1	0	0	0	0	0	2631	-2631
Ohlsdorf	5,7	2128	2117	2110	3697	10052	2218	7834
Gschwandt	7,1	836	931	520	948	3235	2365	870
Laakirchen	9,3	2067	3042	1100	3171	9380	3849	5531
Traunkirchen	10,8	0	0	0	0	0	405	-405

Tabelle 4.7: jährlicher Anfall verschiedener Strohsorten, jährliche Gesamtstrohmenge, jährlicher Strohbedarf Tiere, jährliche überschüssige Strohmenge

Über einen durchschnittlichen Rinder- und Schweinestrohbedarf konnte der jährliche Strohbedarf der Tiere je Gemeinde ermittelt werden. Die Kalkulation ergab, dass im näheren Umkreis des Zementwerkes keine überschüssigen Strohmenge vorhanden sind. Allerdings könnte von den Gemeinden Ohlsdorf, Gschwandt und Laakirchen Stroh für die Vergärung bezogen werden. Ein Problem des nicht verdichteten Strohs stellt dessen geringe Dichte und der damit verbundenen hohen Transportkosten dar ( $0,13 \text{ Cent}/(\text{kWh}_{\text{Biogas}} \cdot \text{km})$ ). Wird das Stroh zu Rundballen verdichtet, entstehen Kosten von  $1,1 \text{ Cent}/(\text{kWh}_{\text{Biogas}})$  (Gewicht des Rundballen: 350 kg, Verdichtungskosten: 6 Euro je Rundballen [105]). Da bei der Auflösung der Rundballen weitere Kosten entstehen, wird sich eine Verdichtung des Strohs auf Rundballen zu Gunsten eines kostengünstigen Transportes nicht rechnen. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der Nährstoffwert des Strohs, der aufgrund der im Stroh enthaltenen Nährstoffe (Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium und Stickstoff) je nach Getreideart zwischen 13,9 und 22,7 Euro je Tonne Stroh beträgt [96] [106] (Energiebezogene Nährstoffkosten:  $0,93 \text{ Cent}/\text{kWh}_{\text{Biogas}}$  -  $1,43 \text{ Cent}/\text{kWh}_{\text{Biogas}}$ ). Die

#### 4 Substratstudie

Nährstoffkosten des Strohs müssen mindestens als Annahmekosten angesetzt werden, wenn keine Rückführung der Nährstoffe durch die Gärreste erfolgt. Aufgrund des langen Transportweges von 5,7 Kilometer sollte die Gärrestausbringung 2-phasig erfolgen (siehe Kapitel 3.6.2.1). Durch dieses Ausbringungsverfahren können im Falle der Nährstoffrückführung des Strohs Gärrestentsorgungskosten von 0,12 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> erreicht werden. Die spezifischen Substrattransport und Gärrestentsorgungskosten des Strohs betragen also in Summe 1,6 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>. In diesen Kosten nicht enthalten sind die Aufbereitungskosten des Strohs und sonstige Kosten die durch die zusätzliche Prozesskomplexität aufgrund der schweren Vergärbarkeit des Strohs anfallen. Aufgrund dieser Gegebenheiten und aufgrund der noch sehr unausgereiften Strohvergärung, wurde der Einsatz von Stroh trotz des relativ großen Potentials nicht weiter verfolgt.

##### 4.3.1.2 Schlachthöfe

Die Tabellen 4.8 und 4.9 zeigen eine Auflistung der sich im Umkreis des Gmundner Zementwerkes befindlichen Schlachthöfe, deren jährlich anfallende Menge an biogenen Abfällen, die spezifischen Substratkosten und die angenommene beziehbare Substratmenge. Es konnten nur von einem Schlachthof die Entsorgungskosten von Blut, Margen- und Darminhalte ermittelt werden. Für alle anderen Schlachthöfe wurden diese Entsorgungskosten in der Höhe von 33 Euro/Tonne in die Kalkulation übernommen. Als Kalkulationssicherheit wurde ein Preisverfall der Entsorgungskosten von 25 % angenommen.

Schlachthöfe	Entfernung zu Zementwerk	Därme- und Mageninhalte		spez. Substratkosten	Menge an Biogasanlage		Kosten
	[km]	[t/Jahr]	[t/Arbeitstag]	[€/kWh]	[%]	[t/Jahr]	[€/Jahr]
Friedrich Pöll	14,3	960	4,4	-0,074	95	912	-16.673
Scheinecker	27,8		0,0	-0,057	0	0	0
Artmayr	31,1	985	4,5	-0,054	60	591	-7.908
Strasser	38,1	548	2,5	-0,045	0	0	0
Oberndorfer	42,3		0,0	-0,037	0	0	0

Tabelle 4.8: Im Umkreis des Gmundner Zementwerkes befindliche Schlachthöfe, deren jährlich anfallende Menge an Darm- und Mageninhalten, spezifische Substratkosten, angenommene beziehbare Substratmenge, jährliche Substratkosten



#### 4 Substratstudie

	Entfernung zu Zementwerk	Blut	spez. Substrat- kosten	Menge an Biogasanlage	Kosten		
	[km]	[t/Jahr]	[t/Arbeitstag]	[%]	[t/Jahr]	[€/Jahr]	
Friedrich Pöll	14,3	688	3,1	-0,022	95	654	-11.949
Scheinecker	27,8		0,0	-0,017	0	0	0
Artmayr	31,1	365	1,7	-0,016	60	219	-2.854
Strasser	38,1	272	1,2	-0,013	30	82	-885
Oberdorfer	42,3		0,0	-0,012	0	0	0
Schestauber	51,7	250	1,1	-0,008	0	0	0
Zeilinger	57,5	540	2,5	-0,006	0	0	0

Tabelle 4.9: Im Umkreis des Gmundner Zementwerkes befindliche Schlachthöfe, deren jährlich anfallende Menge an Tierblut, spezifische Substratkosten, angenommene beziehbare Substratmenge, jährliche Substratkosten

Die Firma Friedrich Pöll GesmbH und Co KG aus Vorchdorf schlachtet überwiegend Schweine. Pro Jahr fallen in etwa 960 Tonnen Schweinedärme und Mageninhalte an. Ebenfalls muss jährlich eine Menge von 688 Tonnen Blut entsorgt werden. Der Entsorgungspreis pro Tonne Schweinedärme und Blut beläuft sich zwischen 30 und 35 Euro. Momentan übernimmt die Entsorgung der Abfälle die Tierkörperverwertung Regau. Ab Juni 2013 ist eine höherwertige Verwertung der Därme als Dünger oder Futtermittel durch die TKV Regau angedacht.

Ein weiterer Abfallstoff des Betriebes sind Flotatschlämme von denen 5 m<sup>3</sup> pro Monat anfallen. Momentan werden diese Schlämme von einer nahegelegenen Biogasanlage abgenommen.

Der Eigentümer der Firma Friedrich Pöll GesmbH und Co KG steht dem Biogasanlagenprojekt des Gmundner Zementwerkes sehr positiv gegenüber und ist an einer Kooperation mit dem Gmundner Zementwerk interessiert.

Beim Schlachthof Artmayr müssen pro Tag 1000 kg Blut und 2700 kg Magen- und Darminhalt entsorgt werden. Da bei Magen- und Darminhalt ähnliche Mengen wie bei Pöll anfallen wird angenommen, dass bei Artmayr ebenfalls 5 m<sup>3</sup> an Flotatschlämmen pro Monat anfallen. Laut Artmayr fallen bei der Entsorgung von Blut Kosten von 6 Cent pro Liter und bei der Entsorgung von Därmen und Darminhalt keine Kosten an. Da diese Angaben aus Sicht des Autors nicht realistisch sind, können sie für die Substratstudie nicht herangezogen werden.

Bei der Familie Zeilinger GmbH konnten Informationen über die angefallenen Abfallstoffe im Mai 2008 eingeholt werden. Für die Substratstudie wurden diese Werte auf ein Jahr hochgerechnet. Die Abfallmengen der Familie Zeilinger GmbH sind deshalb mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Ebenfalls wurden die Abfallmengen der Firma Strasser von einem Monat, über die Anzahl der in diesem Monat geschlachteten Schweine, auf die normalerweise in einem Jahr geschlachteten Schweine hochgerechnet.

#### 4.3.1.3 Molkereien

Die Gmundner Molkerei ist, nach persönlicher Kontaktaufnahme, nicht daran interessiert, biogene Reststoffmengen dem Gmundner Zementwerk zur Verfügung zu stellen. Der Vollständigkeit halber wird jedoch kurz auf die Molkerei eingegangen.

Die Gmundner Molkerei ist die zweitgrößte Molkerei Österreichs (Stand: 2006 [72]). Dies und die Tatsache, dass die Molkerei nur 2,8 Kilometer vom Zementwerk entfernt liegt, würde die Gmundner Molkerei zu einem interessanten Reststofflieferanten machen.

Andere Molkereien wurden aufgrund der zu großen Entfernungen zum Zementwerk nicht in der Studie berücksichtigt.

#### 4.3.1.4 Gastronomie / Kantinen

Die Tabellen 4.10 und 4.11 zeigen eine Auflistung der im Umkreis des Gmundner Zementwerkes tätigen Sammler, deren jährlich gesammelte Menge an biogenen Abfällen, den spezifischen Substratkosten und die angenommene beziehbare Substratmenge. Als Kalkulationssicherheit wurde bei der Firma AVE ein Preisverfall der Entsorgungskosten von 25 % angenommen.

Sammler	Entfernung zu Zementwerk	Fettabscheider	Substratkosten	spez. Substratkosten	Menge an Biogasanlage	Kosten	
	[km]	[t/Jahr]	[€/t]	[€/kWh]	[%]	[t/Jahr]	[€/Jahr]
UWEG	47,7	70	-30	-0,020	0	0	0
Fischer	n.r.	800	0	0,000	10	80	0
AVE	n.r.	1.800	-15	-0,034	2	36	-378

Tabelle 4.10: Im Umkreis des Gmundner Zementwerkes tätige Sammler, deren jährlich gesammelte Menge an Fettabscheider, spezifische Substratkosten, angenommene beziehbare Substratmenge, jährliche Substratkosten

Sammler	Entfernung zu Zementwerk	Speisereste	Substratkosten	spez. Substratkosten	Menge an Biogasanlage	Kosten	
	[km]	[t/Jahr]	[€/t]	[€/kWh]	[%]	[t/Jahr]	[€/Jahr]
AVE	n.r.	1.500	-35	-0,034	1	15	-368

Tabelle 4.11: Im Umkreis des Gmundner Zementwerkes tätige Sammler, deren jährlich gesammelte Menge an Speiseresten, spezifische Substratkosten, angenommene beziehbare Substratmenge, jährliche Substratkosten

Das Substratpotential der Gastronomie wurde durch direkte Anfrage der jeweiligen Sammler, die in der Region um die Zementwerke tätig sind, erhoben. Gastronomiebetriebe, die für die Entsorgung ihrer Speisereste selbst aufkommen, wurden demnach nicht in der Studie erfasst. Es wird aber davon ausgegangen, dass die meisten Gastronomiebetriebe die anfallenden Speisereste und Fettabscheider über Sammler entsorgen lassen.

#### 4 Substratstudie

Einige Sammler gaben keine Auskunft über die von Ihnen gesammelten biogenen Abfälle. Ebenfalls stellte sich heraus, dass einige Sammler nur sehr schwach in dem Gebiet um Gmunden vertreten sind. Der Vollständigkeit halber werden diese Sammler kurz aufgelistet.

Die Firma Saubermacher übernimmt in dem Gebiet um Gmunden nur Aufträge die österreichweit ausgeschrieben sind. Die zu erwartenden Mengen liegen unter 100 Tonnen im Jahr. Die Firma sammelt überwiegend pflanzliche Lebens- und Genussmittelreste.

Die Aktiengesellschaft A.S.A. Abfallservice gab keine Auskünfte über die von Ihnen gesammelten Reststoffe. Hauptsächlich werden jedoch Altfette gesammelt. Es werden aber auch andere biogene Reststoffe wie z.B. Grünschnitte gesammelt.

Die Firma Vorwagner GmbH erteilte ebenfalls keine Auskünfte.

Firmen wie die Freudenthaler GmbH und die Reststofftechnik GmbH kommen aufgrund der zu großen Entfernungen zum Zementwerk als Lieferanten nicht in Frage.

Die Firma AVE Entsorgung sammelt im Bezirk Gmunden jährlich 1500 Tonnen Speisereste und 1800 Tonnen Fettabscheider. 80 % des gesammelten Materials geht in firmeninterne Biogasanlagen. Mit den restlichen 20 % werden landwirtschaftliche Biogasanlagen beliefert, die teilweise früher selbst als Sammler tätig waren. Da die Firma davon ausgeht, dass die Betreiber dieser Anlagen wieder selbst als Sammler tätig werden, wenn diese nicht ausreichend beliefert werden, wird angenommen, dass von dieser Firma keine bis nur sehr geringe Mengen an Substraten zu erwarten sind.

Die Firma Fischer Entsorger könnte 800 Tonnen aufbereiteten Fettabscheider aus dem Großraum Gmunden und Umgebung zur Verfügung stellen. Die Firma besitzt zwei stationäre Aufbereitungsanlagen, die jedoch beide über 150 Kilometer von Gmunden entfernt liegen. Dank den drei mobilen Aufbereitungsanlagen die der Firma zur Verfügung stehen, könnte Fischer Entsorger trotzdem Fettabscheider dem Gmundner Zementwerk liefern ohne lange Transportwege in Kauf nehmen zu müssen. Die Firma Fischer Entsorger würde laut Auskunft bei einer Selbstabholung der Substrate durch das Zementwerk eine Entschädigung von 18 Euro/Tonne und bei Zustellung eine Entschädigung von 60 Euro/Tonne verlangen. Diese Werte widersprechen einer ersten Anfrage bei Fischer Entsorgung, in der von einem Anlieferpreis von Durchschnittlich 0 Euro/Tonne die Rede war (für die Substratstudie wurde ein Anlieferpreis von 0 Euro/Tonne angenommen). Der theoretische Gasertrag ihres Fettabscheiders ist der Firma Fischer Entsorgung zwar bekannt, die Daten dürfen jedoch nicht an Dritte weitergegeben werden. Die Firma Fischer Entsorger beliefert neben Biogasanlagen auch noch andere Fettabscheiderverwerter, über die die Firma ebenfalls keine Auskunft gibt.

Die Firma UWEG GmbH sammelt nur gelegentlich im Umkreis von Gmunden Fettabscheider. Die Aufbereitungsanlage der Firma liegt nicht ganz 50 Kilometer vom Zementwerk entfernt. In dieser werden die Fettabscheider biologisch behandelt. Der fetthaltige Schlamm setzt sich gravimetrisch ab, woraufhin die Flüssigkeit über dem Schlamm abgezogen werden kann. Bei Selbstabholung des Schlammes vergütet UWEG GmbH die Abnahme mit 20 bis 40 Euro/Tonne. Im

#### 4 Substratstudie

Jahr 2012 lieferte UWEG GmbH 70 Tonnen aufbereiteten Schlamm an Biogasanlagen. Über die Zusammensetzung, den Wassergehalt sowie den Gasertrag des behandelten Schlammes liegen der Firma keine Daten vor.

##### 4.3.1.5 Kommunen

Über den Bezirksabfallverband Gmunden und Vöcklabruck läuft unter anderem die Biotonnen-sammlung sowie die Sammlung des Grün- und Strauchschnitts.

Gemeinden	Distanz zum Zementwerk	Biotonnenmaterial	spez. Substratkosten	Menge an Biogasanlage	Kosten	
	[km]	[t/Jahr]	[€/kWh]	[%]	[t/Jahr]	[€/Jahr]
Pinsdorf	1,5	391	-0,080	30	117	-3.708
Gmunden	2,6	1.516	-0,080	30	455	-14.228
Altmünster	3,1	517	-0,079	30	155	-4.825
Ohlsdorf	5,7	514	-0,078	30	154	-4.671
Gschwandt	7,1	296	-0,077	30	89	-2.653
Laakirchen	9,3	345	-0,076	30	103	-3.018
Traunkirchen	10,8	171	-0,075	30	51	-1.477
St. Konrad	10,9	31	-0,075	30	9	-269
Aurach am Har	12,9	42	-0,073	20	8	-236
Regau	13,1	167	-0,073	20	33	-936
Kirchham	15,7	109	-0,072	20	22	-593
Ebensee	16	455	-0,071	20	91	-2.465
Attnang Puchh	16,1	231	-0,071	20	46	-1.251
Vöcklabruck	17,3	314	-0,071	20	63	-1.674

Tabelle 4.12: Umliegende Gemeinden und deren Entfernung zum Zementwerk, jährliche Menge an Biotonnenmaterial, spezifische Substratkosten, angenommene beziehbare Substratmenge, jährliche Substratkosten

Aufgrund der sehr hohen Annahmeerlöse von beinahe 50 Euro je Tonne kann das Biotonnenmaterial und der Grün- und Strauchschnitt auch von weiter entfernt liegenden Gemeinden bezogen werden. Das Biotonnenmaterial ist teilweise mit Störstoffen belastet und gilt eher als schwer vergärbar. Deswegen fallen erhöhte Kosten bei der Substrataufbereitung an, die in Tabelle 4.12 noch nicht berücksichtigt wurden. Bei der Annahme des Biotonnenmaterials steht das Zementwerk in Konkurrenz mit den Kompostierern. Aufgrund dessen wurde ein Anteil der beziehbaren Substratmenge von weniger als 30 % angenommen. Tendenziell ist die verfügbare Menge an Biotonnenmaterial steigend. Laut dem Oberösterreichischen Abfallwirtschaftsplan 2011, soll das Holsystem der Biotonne bis 2015 ausgebaut werden. Der Anschlussgrad des Bezirkes Gmunden soll von 60 % auf 68 % erhöht werden. Durch diese Maßnahme wird eine zusätzliche Menge von 410 Tonnen Biotonnenmaterial im Bezirk Gmunden zur Verfügung stehen. [81]

Wie auch bei der Biotonne geht die gesamte Menge des im Bezirk Gmunden gesammelten

## 4 Substratstudie

Gemeinden	Distanz zum Zementwerk	Mähgut Laub	spez. Substratkosten	Menge an Biogasanlage		Kosten
	[km]	[t/Jahr]	[€/kWh]	[%]	[t/Jahr]	[€/Jahr]
Pinsdorf	1,5	204	-0,072	30	61	-1.896
Gmunden	2,6	729	-0,070	30	219	-6.599
Altmünster	3,1	531	-0,069	30	159	-4.748
Ohlsdorf	5,7	274	-0,064	30	82	-2.293
Gschwandt	7,1	149	-0,061	30	45	-1.199
Laakirchen	9,3	532	-0,057	30	160	-4.030
Traunkirchen	10,8	91	-0,054	30	27	-661
St. Konrad	10,9	61	-0,054	30	18	-442
Aurach am Har	12,9	89	-0,050	20	18	-404
Regau	13,1	355	-0,050	20	71	-1.595
Kirchham	15,7	110	-0,045	20	22	-451
Ebensee	16	433	-0,044	20	87	-1.758
Attnang Puchh	16,1	491	-0,044	20	98	-1.987
Vöcklabruck	17,3	667	-0,042	20	133	-2.579

Tabelle 4.13: Umliegende Gemeinden und deren Entfernung zum Zementwerk, jährliche Menge an Mähgut und Laub, spezifische Substratkosten, angenommene beziehbare Substratmenge, jährliche Substratkosten

Grün- und Strauchschnitt in die Kompostierung. Anders als bei der Biotonne erfolgt jedoch beim Grün- und Strauchschnitt keine getrennte Erfassung der gesammelten Mengen je Gemeinde. Es liegen lediglich die Gesamtmengen des im Bezirk Gmunden gesammelten Grün- und Strauchschnitts getrennt vor. Über die Einwohnerzahl wurden die in den jeweiligen Gemeinden anfallenden Mengen an Grünschnitt rechnerisch ermittelt. Im Grünschnitt ist nicht nur Mähgut sondern auch Laub enthalten. Das gesammelte Biotonnenmaterial der Gemeinden des Bezirkes Vöcklabruck, konnte ebenfalls nur über die Einwohnerzahl rechnerisch ermittelt werden. Diese Daten sind deshalb mit großer Unsicherheit behaftet.

### 4.3.2 Theoretisches Substratpotential im Umkreis des Rohrdorfer Zementwerks

#### 4.3.2.1 Landwirtschaftliche Substrate

Das Substratpotential der Wirtschaftsdünger wurde über die Viehbestände der jeweiligen Gemeinden ermittelt. Das Rosenheimer Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten stellte sehr ausführliche Daten zur Verfügung. Es wurden bis zu 8 Tierarten aufgelistet, die jeweils in Unterkategorien unterteilt waren. Die Tierart Rind stellte nicht nur die am ausführlichsten untergliederte Kategorie dar (8 Unterkategorien), sondern auch die zahlenmäßig größte. Ansonsten werden im Umkreis von Rohrdorf noch Schafe und einige Pferde gehalten. Alle anderen Tiere kommen entweder in verschwindend geringen Stückzahlen vor (Schweine, Ziegen), oder sie produzieren nur sehr geringe Mistmengen (Hühner).

### 4.3.2.2 Gastronomie, Kantinen und Schlachthöfe

Anders als im Gmundner Bereich ist im Landkreis Rosenheim nur ein Sammler namens Berndt tätig. Die Firma Berndt GmbH recycelt in Obererding (Distanz zu Rohrdorf = 98 Kilometer) und Wünschendorf (Distanz zu Rohrdorf = 422 Kilometer) neben Speiseresten noch Restaurantfette und Speiseöle, Fettabscheiderinhalte und tierische Nebenprodukte der Kategorie 3. Es werden Tierfette der Kategorie 3 erzeugt, die an Nutztiere (mit Ausnahme an Wiederkäuer) verfüttert werden oder zu anderen Futtermitteln weiterverarbeitet werden können. Ebenfalls eignet sich das von Berndt erzeugte „verarbeitete tierische Protein“ zur Weiterverarbeitung von Futtermitteln. Es wird noch Biodiesel, Brennstoff und Biogassubstrat namens ProFermo erzeugt.

Das ProFermo Gärsubstrat wird aus Speiseresten hergestellt und nach Vorgaben der Verordnung (EG) Nr. 142/2011 hygienisiert. Eine Tonne ProFermo enthält in etwa 790 kg Wasser, 180 kg organische Trockensubstanz und 30 kg anorganische Trockensubstanz. Pro Tonne Gärsubstrat kann in etwa 140 m<sup>3</sup> Biogas mit einem Methananteil von 60 % erzeugt werden.

In Obererding werden pro Monat etwa 5000 bis 6000 Tonnen ProFermo erzeugt mit denen 20 Biogasanlagen versorgt werden. Bei einer Entfernung von 100 Kilometern würde eine Tonne ProFermo 12 Euro kosten.

### 4.3.2.3 Kommunen

#### Grün- und Strauchschnitt

Die Stadt Rosenheim sammelt jährlich eine Menge von 6000 Tonnen an Grün- und Strauchschnitt. Von diesen 6000 Tonnen werden 4000 Tonnen an Wertstoffinseln abgegeben. Aufgrund der schlechten Trennmoral sind diese 4000 Tonnen stark verunreinigt. Die restlichen 2000 Tonnen Grün- und Strauchschnitte sind kaum verunreinigt, da sie direkt am Entsorgungshof gesammelt werden. Je nachdem wie stark verunreinigt das Material ist, werden dem Abnehmer zwischen 15 und 30 Euro bezahlt. Über die genaue Zusammensetzung des Materials, die noch dazu sehr stark mit der Jahreszeit schwankt, konnte keine Auskunft gegeben werden. Laut [99], fällt jährlich ungefähr gleich viel Grün- wie Strauchschnitt an. Es wird beobachtet, dass immer mehr Biomüll wie Essensabfälle über die Grün- und Strauchschnittsammlung entsorgt werden. Eine getrennte Sammlung von Biomüll und Grün- und Strauchschnitt ist in Rosenheim noch nicht vorgesehen. Der Versuch eine nahegelegene Biogasanlage mit den biogenen Abfällen aus der Grün- und Strauchschnittsammlung zu betreiben ist gescheitert. Momentan wird das ganze Material in der Kompostieranlage Rosenheim verwertet.

Die Mengen an Grün- und Strauchschnitt, die im Landkreis Rosenheim anfallen, gehen an drei Kompostieranlagen in Bruckmühl, Aschau und Wasserburg. Grün- und Strauchschnitt aus der Stadt Rosenheim werden durch diese Kompostieranlagen nicht erfasst.

Da die Kompostieranlage Wasserburg 35 Kilometer vom Werk entfernt liegt wird auf diese An-

lage nicht näher eingegangen.

Die Kompostieranlage Aschau liegt in etwa 14 Kilometer vom Zementwerk entfernt. Pro Jahr fallen circa 3500 Tonnen reiner Grünschnitt und 3700 Tonnen gemischtes Material (Grünschnitt + Strauchschnitt) an.

Die Kompostieranlage Bruckmühl liegt in etwa 25 Kilometer vom Zementwerk entfernt. Pro Jahr fallen ungefähr 4200 Tonnen reiner Grünschnitt und 10000 Tonnen gemischtes Material an. Der Grünschnitt wird in beiden Kompostieranlagen überwiegend an Biogasanlagen zur Vergärung abgegeben (Preis 1 bis 2 Euro pro Tonne; Tendenz aufgrund wachsender Nachfrage steigend). Das gemischte Material wird kompostiert.

#### 4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung der Substratstudie

Abbildung 4.8 zeigt das theoretische Substratpotential und die angenommene beziehbare Substratmenge. Bei der Rindergülle wurde das theoretische Substratpotential der Gemeinden Pinnsdorf und Gmunden angegeben. Bei den Fettabseidern bezieht sich das theoretische Substratpotential auf die Sammler AVE und Fischer Entsorger und bei den Speiseresten nur auf die AVE. Das theoretische Substratpotential des Blutes und der Darm- und Mageninhalte sind die maximal verfügbaren Mengen der Schlachthöfe Friedrich Pöll, Artmayr und Strasser. Bei dem Biotonnenmaterial und dem Grünschnitt wurde das theoretische Substratpotential der Gemeinden Pinnsdorf bis Vöcklabruck angegeben (siehe Tabellen 4.12 und 4.13).

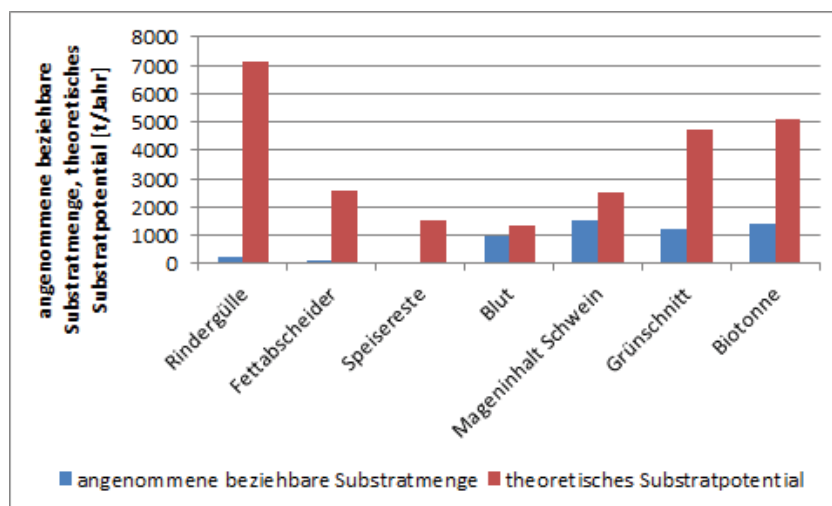


Abbildung 4.8: Vergleich des theoretischen Substratpotentials mit der angenommenen Substratmenge

Aufgrund der sehr großen Biogaskonkurrenz in Oberösterreich ist es schwierig, „klassische“ Substrate wie Speisereste und Fettabseider für eine Abfallvergärungsanlage zu beziehen. Selbst ein aggressives Eindringen in den Markt über Substratzuzahlungen ist kaum möglich da viele Sammler selbst eine Biogasanlage betreiben oder andere Biogasanlagenbetreiber durch konti-

#### 4 Substratstudie

nuierliche Belieferung davon abhalten wollen zu Sammlern zu werden.

Unter diesen Bedingungen bleiben dem Zementwerk Gmunden zwei Möglichkeiten doch noch ein Biogasprojekt umzusetzen. Zum einen könnte sich das Zementwerk auf schwer vergärbare und dadurch leichter zu beschaffende Substrate spezialisieren (Biotonnenmaterial, Grünschnitt, Stroh). Ein Nachteil dieser Option ist jedoch die hohe Prozesskomplexität und die noch nicht vorhandenen oder sich erst in Entwicklungsstadien befindlichen Verfahren. Zum anderen könnte das Zementwerk selbst zum Sammler werden und auf diese Weise versuchen leicht vergärbare Substrate (Speisereste, Fettabscheider, etc.) für die Biogasanlage zu beschaffen. Diese Option ist jedoch auch mit sehr hohen Risiken verbunden, da das Zementwerk von den Sammlern und deren Belieferung mit Sekundärbrennstoffen abhängig ist. Eine eigenständige Sammlung von biogenen Abfällen könnte die Beziehungen zu den Sammlern stören, was direkte Auswirkungen auf das Kerngeschäft, nämlich die Produktion von Klinker und Zement, haben könnte.

Das Ergebnis der Substratstudie des Rohrdorfer Zementwerkes ist noch ernüchternder als das Substratstudienresultat des Gmundner Zementwerkes. Hauptsächlich liegt dies an der Firma „Berndt“, die im Landkreis Rosenheim flächendeckend die Sammlung durchführt und eine sehr hochwertige Abfallverwertung aufweist. Die Firma „Berndt“ produziert zwar ein Biogassubstrat, verbraucht dies aber hauptsächlich für die eigene Biogasanlage. Ein Bezug der überschüssigen Substratmenge ist aufgrund der großen Entfernung zu der Aufbereitungsanlage und der momentanen Biogasanlagenkonkurrenz unrealistisch.

Aufgrund dessen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das Hauptaugenmerk auf das Gmundner Zementwerk gelegt.



# 5 Ermittlung eines Biogasanlagenkonzeptes

Zu Beginn des Kapitels werden die realistisch beziehbaren Substratmengen aufgelistet und die für die Auslegung einer Biogasanlage relevanten Kennzahlen ermittelt. Es folgen Konzeptvorüberlegungen bezüglich der Möglichkeit und Sinnhaftigkeit der Gärrestausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen und der Sinnhaftigkeit eines Substrataufschlusses. Abschließend folgt die Grobdimensionierung einer Biogasanlage für den Standort Gmunden und der damit verbundenen Ermittlung wichtiger technischer und wirtschaftlicher Anlagenparameter.

## 5.1 Angenommene, bezogene Substratmenge für die Biogasanlage

Aufgrund der durchgeführten Substratstudie in Kapitel 4.3.1 wird davon ausgegangen, dass die in Abbildung 5.1 aufgelisteten Substrate bezogen werden können. Insgesamt werden 5388 Tonnen Frischmasse je Jahr bezogen. Der Anteil des Methanertrages der einzelnen Substrate ist in Abbildung 5.2 gegeben. Insgesamt kann ein jährlicher Methanertrag von 239768 m<sup>3</sup> erzielt werden. Dies entspricht einer Leistung von 274 kW<sub>th</sub>, wenn die Biogasanlage 365 Tage im Jahr ohne Ausfälle in Betrieb ist.

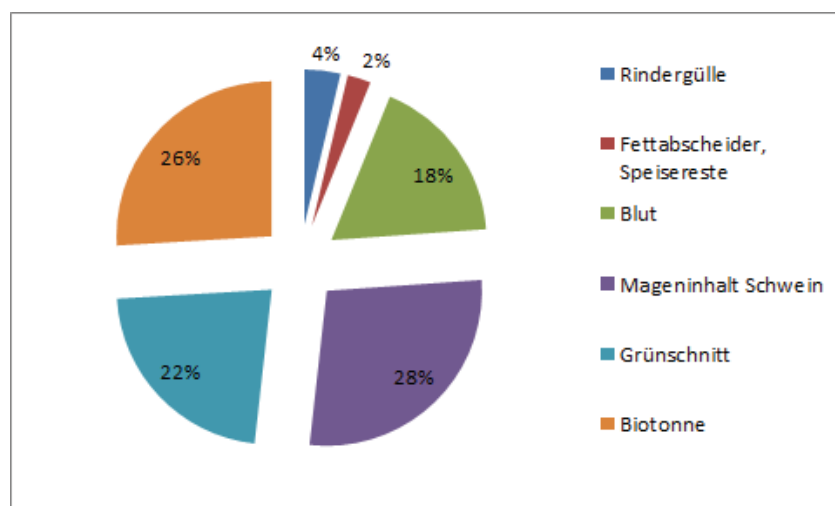


Abbildung 5.1: Massenprozent der jährlich angenommenen bezogenen Frischmasse einzelner Substrate

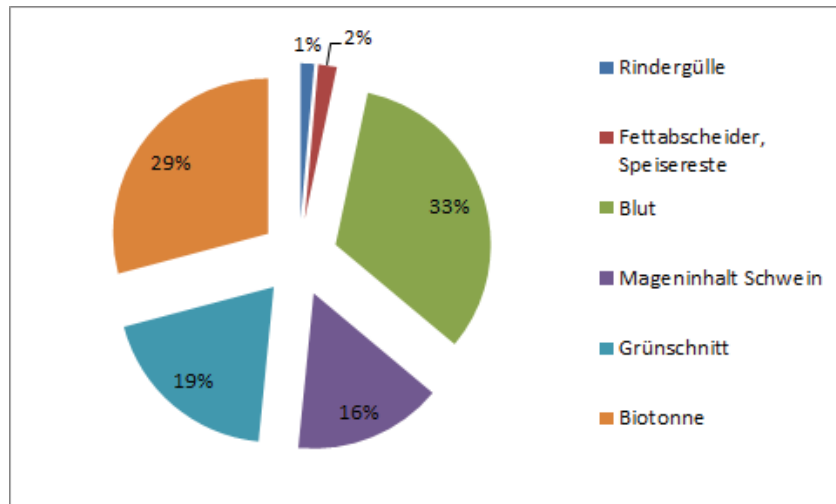


Abbildung 5.2: Volumsprozent des jährlichen Methanertrages einzelner Substrate

Die Substrataufgabe weist einen TS-Anteil von 18,5 % auf. Für einen voll durchmischten Reaktor ist dies kein Problem, solange der gesamte Trockensubstanzgehalt des Fermenterinhalt nicht über 15 % liegt und der TS Anteil der Substrataufgabe 25 % nicht überschreitet. [14]. Das C : N Verhältniss der Substratmischung weist mit 25 : 1 einen sehr guten Wert auf (siehe Kapitel 3.2.1).

Aufgrund der in Abbildung 5.1 angeführten bezogenen Substratzusammensetzung und Substratmenge ergibt sich eine jährlich zu entsorgende Gärrestmenge von 4962 Tonnen. Die Gärreste weisen einen TS Anteil von 11,5 % auf. 62 % der Trockensubstanz der Gärreste ist organisch. Eine Tonne Gärrest enthält 16 kg Stickstoff, 1,7 kg  $P_2O_5$  und 0,9 kg  $K_2O$ . Diese Werte wurden durch eigens durchgeführte Massenbilanzen ermittelt.

## 5.2 Konzeptvorüberlegungen

Es wurden Konzeptvorüberlegungen bezüglich der Möglichkeit und Sinnhaftigkeit der Gärrestausringung auf landwirtschaftlichen Flächen und der Sinnhaftigkeit eines Substrataufschlusses durchgeführt.

### 5.2.1 Gärrestausringung auf landwirtschaftliche Flächen

#### 5.2.1.1 Einführung in die Problemstellung

Die Gärrestausringung auf landwirtschaftliche Flächen stellt eine einfache und kostengünstige Möglichkeit der Gärrestentsorgung dar. Durch die hohe Nährstoffkonzentration der Gärreste vermindert eine Gärrestausringung auf landwirtschaftliche Flächen den Düngbedarf dieser Flächen. Somit kann bei einer landwirtschaftlichen Verwertung der Gärreste eine Win-Win Situation für den Biogasanlagenbetreiber und den Landwirt entstehen.

In folgendem Kapitel wird überprüft, welche Gärrestmenge auf die umliegenden landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden kann, welche Kosten dabei entstehen und welcher Nutzen sich für den Landwirt ergibt.

### 5.2.1.2 Durchführung der Berechnung

In Österreich dürfen pro Jahr und Hektar auf Grün und Ackerflächen nicht mehr als 170 kg Stickstoff ausgebracht werden. Die Ausbringungsmengenberechnung erfolgt ab Lager. Dies bedeutet, dass bei der Berechnung der je Hektar ausbringbaren Menge nur die Lagerstickstoffverluste berücksichtigt werden dürfen. Ab 2015 darf nur mehr eine bedarfsgerechte Düngung erfolgen. Bei einer bedarfsgerechten Düngung variiert die ausbringbare jährliche Stickstoffmenge je nach Fruchtfolge und Ertrag. Es ist anzunehmen, dass aufgrund der neuen Regelung ab 2015 durchschnittlich weniger Stickstoff auf die Felder ausgebracht werden kann. [100]

Über die jährlich anfallenden Güllemengen in den Gemeinden, der durchschnittlichen Stickstoffmenge je m<sup>3</sup> Gülle und einen angenommenen Stall- und Güllelagerstickstoffverlust von 25 %, konnte die für die Ausbringung der Wirtschaftsdünger notwendige Fläche je Gemeinde ermittelt werden. Die in den Gemeinden verbliebenen Flächen wurden aus Gründen der Kalkulationssicherheit (möglicherweise haben einige Landwirte kein Interesse an einer Kooperation) mit einem Faktor von 0,6 (Flächenminderungsfaktor) multipliziert. Ausgehend von der zum Zementwerk nächstliegenden Gemeinde, kann die ausbringbare Menge an Stickstoff ermittelt werden. Über die Entfernungen der Gemeinden zu dem Zementwerk und den in den Gemeinden ausgebrachten Mengen an Stickstoff wird ein durchschnittlicher Gärrestausbringungsweg errechnet.

Die Kosten der landwirtschaftlichen Gärrestausbringung wurden beim Maschinenring Gmunden angefragt. Wie in Kapitel 3.6.2.1 beschrieben, kommen zwei Arten der Gärrestausbringung zum Einsatz. Aufgrund der geringen Mengen anfallender Gärreste (siehe Kapitel 5.1) und ausreichend zur Verfügung stehender Flächen ist nur die einphasige Gärrestausbringung von Bedeutung.

Bei der einphasigen Gärrestausbringung mit einem 12 m<sup>3</sup> Fass, fallen Kosten in der Höhe von 85 Euro je Stunde an. In diesen Kosten ist der Traktor, das Güllefass und die Arbeitskraft inkludiert. Die Ausbringung erfolgt über ein Drallteller. Für eine bodennahe Ausbringung der Gärreste durch Schleppschläuche, fallen aufgrund der aufwändigen Technik zusätzliche Kosten in der Höhe von 25 Euro je Stunde an. Befinden sich die Ausbringungsflächen sehr nahe am Gärrestlager, können 3 12 m<sup>3</sup> Fässer je Stunde ausgebracht werden. Liegen die Ausbringungsflächen 3 Kilometer vom Gärrestlager entfernt, schafft man in etwa 2 12 m<sup>3</sup> Fässer je Stunde.

Die für die Düngewertrechnung verwendeten Nährstoffkosten finden sich in Tabelle 4.2.

Die für die Nährstoffbilanz verwendeten Stickstoffverluste und Stickstoffverlustminderungen wurden aus der zweiten Auflage des Handbuches „Faustzahlen Biogas“ für die Berechnung entnommen. Diese Werte finden sich in Tabelle 5.1.

## 5 Ermittlung eines Biogasanlagenkonzeptes

	Ammoniakverluste in % des verbliebenen NH <sub>4</sub> nach Lagerung			Emissionsminderung in % bei der Gärrestausbringung mittels Schleppllauch		
	5 °C	10 °C	15 °C	Ackerland unbewachsen	Grünland niedriger Bew.	Ackerl./Grünl. hoher Bewuchs
dickflüssige Gärreste	30,0	40	50	8	10	30
dünnflüssige Gärreste	10,0	20	25	30	30	50

Tabelle 5.1: Stickstoffverluste und Stickstoffverlustminderungen durch bodennahe Ausbringung dickflüssiger (10 % TS) und dünnflüssiger (7 % TS) Gärreste

Die Mineralisierungsrate des organisch gebunden Stickstoffes beträgt im ersten Jahr 5 % und in den Folgejahren jeweils 3 %. Man kann davon ausgehen, dass nach der Vergärung 65 % des Gesamtstickstoffes in Form von Ammonium vorliegen. [90]

Durch die Ausbringung der Gärreste geht Stickstoff in Form von Ammoniak verloren. Für die Kosten / Nutzen-Rechnung darf nur der Ammoniumstickstoff je Tonne Gärrest berücksichtigt werden, der auch tatsächlich der Pflanze zur Verfügung steht. Aufgrund biologischer Vorgänge im Boden, wird jedes Jahr ein Teil des organisch gebundenen Stickstoffs pflanzenverfügbar. Die Berechnung berücksichtigt den sofort nach der Ausbringung wirksamen Ammoniumstickstoff, sowie die Mineralisierung des organischen gebundenen Stickstoffs nach fünf Folgejahren.

### 5.2.1.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Für die momentan angenommene bezogene Substratmenge ergibt sich ein durchschnittlicher Ausbringungsweg der Gärreste von 2,6 Kilometer. Die mit dem Flächenminderungsfaktor beaufschlagten verbliebenen Flächen der Gemeinden Pinsdorf und Gmunden werden zu 100 % für die Gärrestausbringung benötigt. Die mit dem Flächenminderungsfaktor beaufschlagten verbliebenen Grünlandflächen der Gemeinde Altmünster werden zu 60 % für die Gärrestausbringung benötigt, während die verbliebenen Ackerflächen der Gemeinde Altmünster nicht mehr für die Gärrestausbringung benötigt werden. Mit dieser Berechnung wurde gezeigt, dass eine „zementwerksnahe“ Ausbringung der Gärreste möglich ist. Abbildung 5.3 zeigt für die jeweilige Gemeinde die benötigten Grün- und Ackerflächen zur Ausbringung der Wirtschaftsdünger, die verbrauchten Grün- und Ackerflächen zur Ausbringung des Gärsubstrates und die verbliebenen ungenutzten Grün- und Ackerflächen.

## 5 Ermittlung eines Biogasanlagenkonzeptes

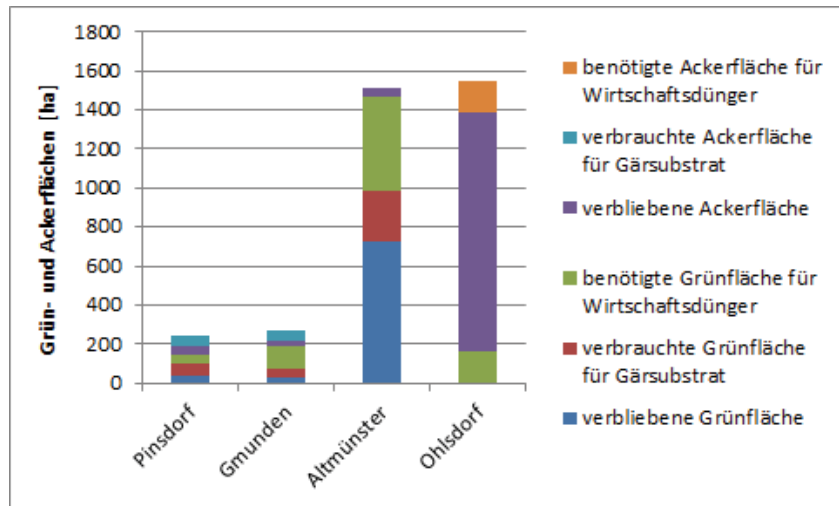


Abbildung 5.3: benötigte landwirtschaftliche Ausbringungsflächen für Wirtschaftsdünger und Gärreste und verbliebene ungenützte landwirtschaftliche Ausbringungsflächen der jeweiligen Gemeinden

Für die Kosten Berechnung der Feldausbringung wird angenommen, dass je Stunde 2 12 m<sup>3</sup> Fässer ausgebracht werden können, da im Umkreis des Zementwerkes ausreichend viele Flächen zur Verfügung stehen. Bei einer bodennahen Gärrestausringung ergeben sich demnach Kosten in der Höhe von 4,6 Euro/m<sup>3</sup> Gärrest. Die Kosten der Ausbringung mittels Drallteller liegen mit 3,5 Euro/m<sup>3</sup> Gärrest etwas niedriger.

Abbildung 5.4 zeigt die auf die Tonne Gärrest bezogenen Stickstoffnährstofflerlöse des pflanzenverfügbaren Stickstoffes bei der Ausbringung dickflüssiger Gärreste mit und ohne Schleppschlauch bei verschiedenen Ausbringungsflächen und verschiedenen Temperaturen.

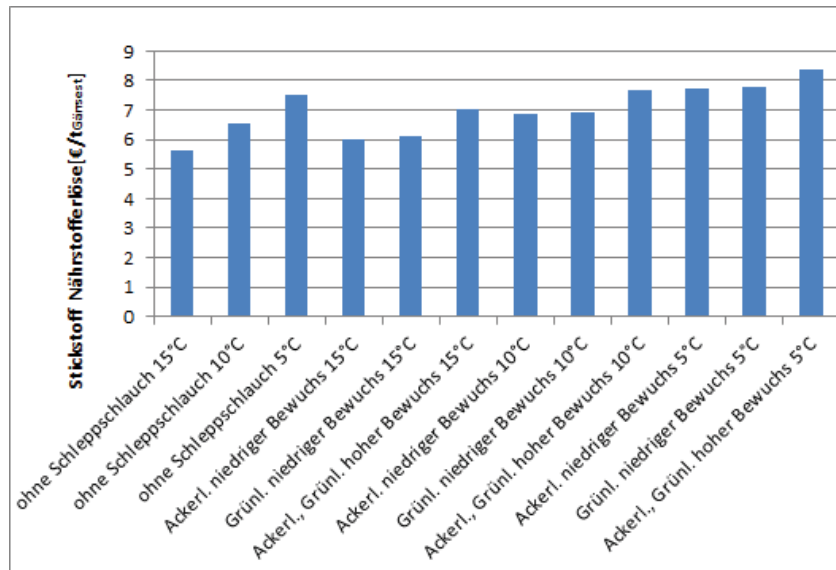


Abbildung 5.4: auf die Tonne Gärrest bezogene Stickstoffnährstoffverluste des pflanzenverfügbaren Stickstoffes bei der Ausbringung dickflüssiger Gärreste mit und ohne Schleppschlauch, bei verschiedenen Ausbringungsflächen und verschiedenen Temperaturen

Die niedrigsten Ausbringungsverluste treten bei den tiefsten Temperaturen auf. Ebenfalls wirkt sich ein hoher Bewuchs positiv auf eine Verminderung der Stickstoffnährstoffverluste aus. Selbst wenn der Gärrest unter den ungünstigsten Bedingungen ausgebracht wird, liegen die Stickstoffnährstoffverluste je Tonne Gärrest immer noch weit über den Ausbringungskosten des Gärrestes.

Abbildung 5.5 zeigt die auf die Tonne Gärrest bezogenen Differenznährstoffverluste des pflanzenverfügbaren Stickstoffes, der Gärrestausrückführung mittels Schleppschlauch zur Gärrestausrückführung mittels Drallteller, bei verschiedenen Ausbringungsflächen und verschiedenen Temperaturen.

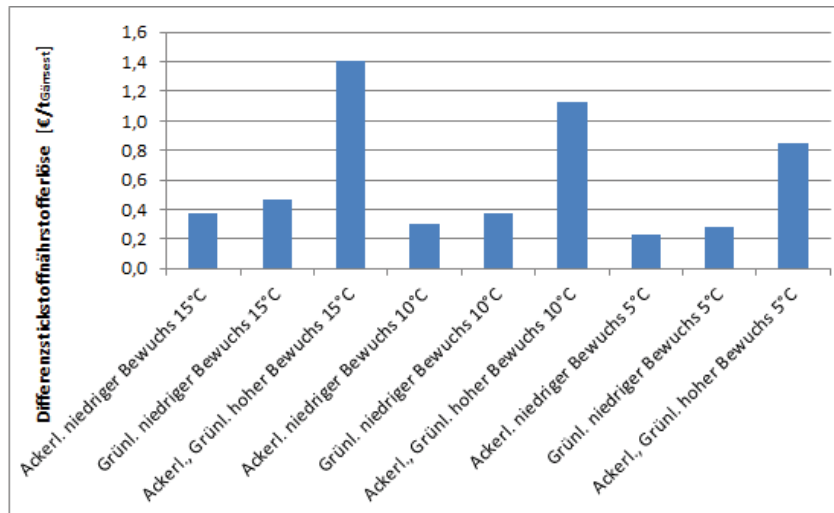


Abbildung 5.5: auf die Tonne Gärrest bezogene Differenzstickstoffnährstoffverluste der Gärrestausbringung dickflüssiger Gärreste mittels Schleppschlauch zur Gärrestausbringung mittels Drallteller bei verschiedenen Ausbringungsflächen und verschiedenen Temperaturen

Die zusätzlichen Ausbringungskosten der Schleppschlauchausbringung je Tonne Gärrest beträgt bei dem angenommenen Ausbringungsweg einen Euro. Übersteigen die Differenznährstoffverluste diesen Euro, sollte auf jedenfall der Gärrest mittels Schleppschlauch ausgebracht werden, da dann der zusätzliche Nutzen höher als der zusätzliche Aufwand ist. Dies trifft im Falle niedrigerer Temperaturen und höherer Bewüchse eher zu, als bei höheren Temperaturen und niedrigeren Bewüchsen.

Berücksichtigt man neben pflanzenverfügbaren Stickstoffnährstoffverlusten noch die Phosphor und Kalium Nährstoffverluste, ergeben sich die gesamten Nährstoffverluste je Tonne Gärrest (siehe Abbildung 5.6).

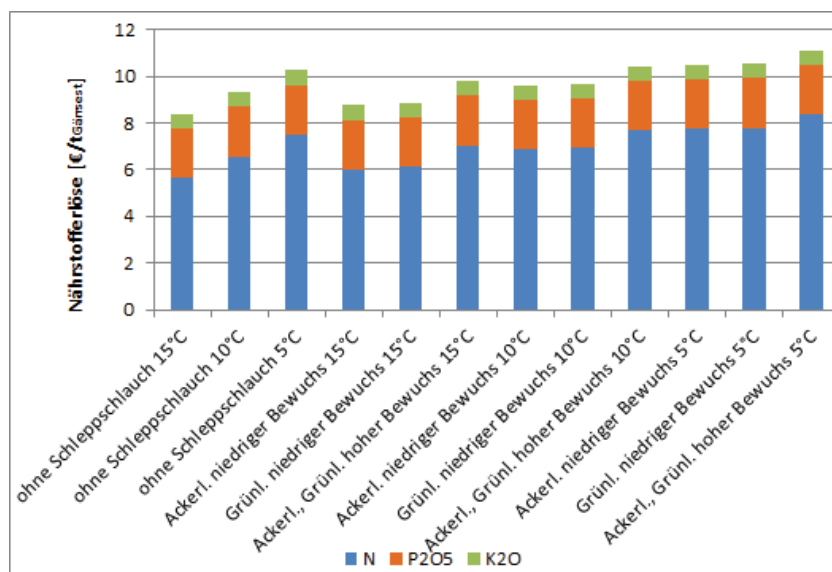


Abbildung 5.6: gesamte Nährstoffverluste je Tonne dickflüssigem Gärrest

## 5.2.2 Substrataufschluss mittels Bio-Extruder

### 5.2.2.1 Einführung in die Problemstellung

Ein Aufschluss der in die Biogasanlage eingebrachten Substrate kann sehr viele Vorteile, wie z.B. einen verminderten Rührenergiebedarf (aufgrund niedriger Viskositäten) oder eine höhere Prozessstabilität, bringen. Immer wieder fällt jedoch auch das Schlagwort der Gasmehrerträge und des damit verbundenen geringeren Substrateinsatzes oder der höheren erzielbaren Biogasleistung. Ein Unternehmen, das sehr umfassend Auskunft über die ungefähr erzielbaren Gasmehrerträge der einzelnen Substrate gibt, ist die Firma Lehmann Maschinenbau GmbH. Diese Firma hat den Substrataufschluss mittels Doppelschneckenextruder entwickelt. Dieses Verfahren ist den mechanischen Aufschlussverfahren einzuordnen (siehe Kapitel 3.2.3).

In folgendem Kapitel wird geprüft, ob ein Substrataufschluss mit dem Bio-Extruder der Firma Lehmann Maschinenbau GmbH wirtschaftlich sinnvoll ist, wenn neben den vielen möglichen anderen Vorteilen eines Substrataufschlusses, nur die Biogasmehrerträge berücksichtigt werden.

### 5.2.2.2 Durchführung der Berechnung

Für die Berechnung wurde ein Angebot der Firma Lehmann Maschinenbau GmbH eingeholt. Die für die Berechnung übernommenen Werte aus dem Angebot finden sich in Tabelle 5.2.

Baureihe	Investkosten [€]	Verschleißkosten [€/Intervall]	Wartungsintervall [h/Intervall]	stündliche Lohnkosten [€/h]	jährliche Kontrollzeit [h/Jahr]	Betriebsstunden [Bh/Jahr]
MSZ B 44e	117.512	5.178	900	37	68	1290

Tabelle 5.2: Invest-, Verschleiß-, und Lohnkosten des Bio-Extruders MSZ B 44e



## 5 Ermittlung eines Biogasanlagenkonzeptes

Die Gasmehrerträge und die stündliche Durchsatzleistung der einzelnen Substrate wurden teils aus Infoblättern und teils aus dem Angebot der Firma entnommen. Aufgrund fehlender Information selbst getroffene Annahmen sind in Tabelle 5.3 grau hinterlegt.

	Durchsatzleistung	Gasmehrerträge	Energiebedarf
	[h/t]	[%]	[kWh/t]
Speisereste	3,2	20	5
Darm- und Mageninhalte	3,2	5	5
Grünschnitt	2,3	60	13
Stroh	0,4	35	85
Biotonne	2,3	35	12
Rinder Festmist	2,3	36	8

Tabelle 5.3: Gasmehrerträge und Durchsatzleistung relevanter Substrate (grau Hinterlegte Werte sind eigene Annahmen)

Über die angenommene jährlich bezogene Menge der Substrate kann die jährliche Betriebsdauer des Bio-Extruders errechnet werden, die 1135 Stunden beträgt (es wurde angenommen, dass nur Biotonnenmaterial, Grünschnitt und Speisereste aufbereitet werden). Die auf die Frischmasse bezogenen Investkosten des betrachteten Substrates ergeben sich aus der Division der jährlichen Invest- und Zinskosten durch die jährliche Betriebsdauer des Bio-Extruders und durch die durchschnittliche Durchsatzleistung des betrachteten Substrates.

Die Division der jährlichen Betriebsstunden durch die stündlichen Lohnkosten multipliziert mit den jährlichen Kontrollzeiten aus dem Angebot ergibt die Lohnkosten je Betriebsstunde. Dividiert man die Durchsatzleistung des jeweiligen Substrates durch die Lohnkosten je Betriebsstunde erhält man die auf die Frischmasse bezogenen Lohnkosten der einzelnen Substrate.

Die auf die Frischmasse bezogenen Verschleißkosten des betrachteten Substrates ergeben sich aus der Division der Verschleißkosten je Intervall durch das Wartungsintervall und durch die durchschnittliche Durchsatzleistung des betrachteten Substrates.

Dividiert man nun die auf die Frischmasse bezogenen Kosten der einzelnen Substrate durch die auf die Frischmasse bezogenen Energieerträge, die Energieerträge zusätzlich den Energiemehrerträgen oder nur durch die Energiemehrerträge, erhält man die energiebezogenen Aufschlusskosten der Substrate.

Die energiebezogenen elektrischen Energiekosten der Substrate erhält man durch Division der auf die Frischmasse bezogenen Energieverbräuche durch die auf die Frischmasse bezogene elektrische Energie multipliziert mit den elektrischen Energiekosten je Energieeinheit.

### 5.2.2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Abbildung 5.7 zeigt die auf die Energiemehrerträge bezogenen Invest-, Lohn-, Verschleiß- und Strombedarfskosten relevanter Substrate.

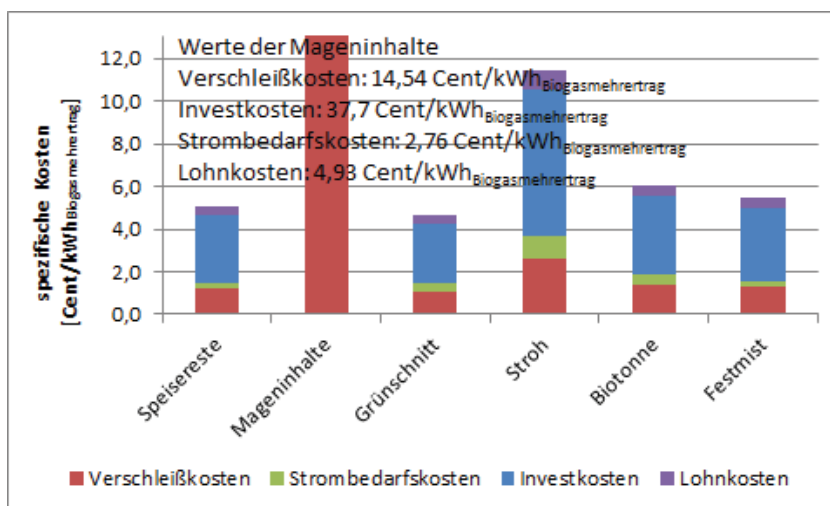


Abbildung 5.7: Auf die Energiemehrerträge bezogenen Invest-, Lohn-, Verschleiß- und Strombedarfskosten relevanter Substrate

Die Lohn-, Verschleiß- und Strombedarfskosten zählen zu den Betriebskosten während die Investkosten die Fixkosten darstellen. Wird eine thermische Verwertung des Biogases angestrebt, ist ein wirtschaftlicher Aufschluss der Substrate gegeben, wenn die auf den Energiemehrertrag bezogenen Betriebs- und Fixkosten unter dem Erdgaspreis (5,29 Cent/kWh) liegen. Liegen die auf die Energiemehrerträge bezogenen Betriebs- und Fixkosten der Substrate über dem Erdgaspreis, die auf die Energiemehrerträge bezogenen Betriebskosten der Substrate jedoch unter dem Erdgaspreis, kann ein Aufschluss dieser Substrate durchgeführt werden, wenn der Bio-Extruder schlecht ausgelastet ist. Dies trifft zum Beispiel für Stroh, Festmist und das Biotonnenmaterial zu. Die gesamten Kosten der Mageninhalte betragen beinahe 60 Cent je kWh<sub>Biogasmehrtrag</sub> und sollten deshalb, bei den momentan angenommenen Gasmehrerträgen, nicht mit dem Bio-Extruder aufgeschlossen werden. Bei allen anderen Substraten, insbesondere Grünschnitt, kann ein Substrataufschluss mittels Bio-Extruder durchaus sinnvoll sein. Zu beachten ist auch, dass die momentanen Werte für eine jährliche Betriebsdauer des Bio-Extruders von 1135 Stunden gelten. Steigt die jährliche Betriebsdauer, dann sinken die spezifischen Fixkosten und ein Aufschluss mittels Bio-Extruder wird wirtschaftlicher.

Abbildung 5.8 zeigt die Gasmehrerträge die mindestens durch das Aufschlussverfahren erreicht werden müssen, um mit den zusätzlichen Gasmehrerlösen (bei Erdgaspreis) die Betriebskosten sowie die Betriebskosten und die Fixkosten zu kompensieren. Wie auch bei Abbildung 5.7 gilt, dass die „Gasmehrerträge um die Betriebskosten und die Fixkosten zu kompensieren“ mit steigender Auslastung des Bio-Extruders sinken. Abbildung 5.8 wurde für eine jährliche Betriebsdauer des Bio-Extruders von 1135 Stunden dargestellt.

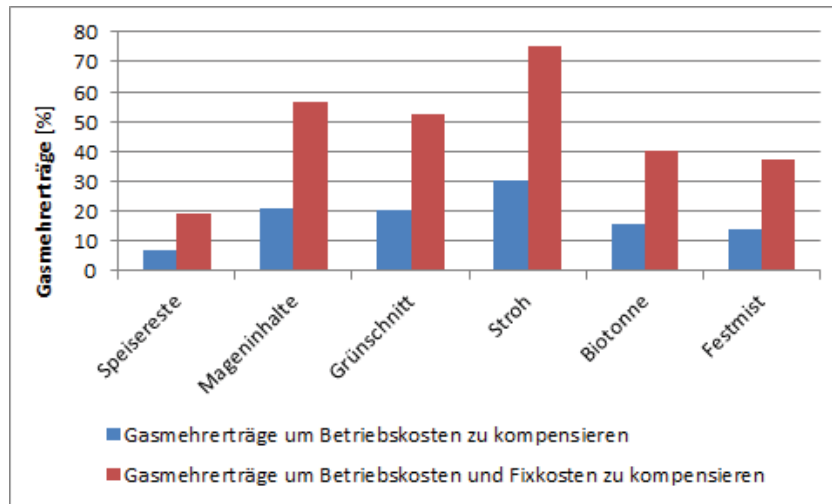


Abbildung 5.8: Mindestens erforderliche Gasmehrerträge relevanter Substrate um die Betriebskosten und die gesamten Kosten zu kompensieren

Aufgrund der hohen Durchsatzleistungen und der auf die Frischmasse bezogenen hohen Gasertäge stellen Speisereste ein interessantes Substrat für den Aufschluss dar. Weisen die Speisereste eine zu geringe Trockensubstanz auf, kann es notwendig werden, diese vor dem Aufschluss mittels Bio-Extruder mit anderen Substraten, die einen höheren TS aufweisen (z.B. Biotonne, etc.), zu mischen. Stroh weist aufgrund der sehr niedrigen Durchsatzleistungen die höchsten mindestens erforderlichen Gasmehrerträge auf. Aufgrund des sehr hohen TS-Gehaltes des Strohs empfehlen die Hersteller des Bio-Extruders, Stroh mit anderen aufzuschließenden Substraten, die einen niedrigeren TS aufweisen, zu mischen.

### 5.3 Grobdimensionierung der Biogasanlage

Die Ergebnisse dieses Kapitels bilden die Basis für weitere Überlegungen.

#### 5.3.1 Durchführung der technischen Berechnung und typische Kennwerte

Das Nettofermentervolumen einer Biogasanlage wird im Wesentlichen durch die Verweilzeit und die Faulraumbelastung bestimmt. Die Verweilzeit ist abhängig von den eingesetzten Substraten. Die Faulraumbelastung kann bei volldurchmischten Anlagen bis 4 kg oTS pro m<sup>3</sup> Fermentervolumen und Tag betragen, sollte aber bei prozessbiologisch schwierigen Substraten niedriger gewählt werden.

Bei bekannter Faulraumbelastung kann das Nettofermentervolumen durch Formel 5.1 bestimmt werden. [14]

$$V_{netto} = \frac{\dot{m}_{oTS}}{F} \quad (5.1)$$

$V_{netto}$ ...	Nettofermentervolumen [ $m^3$ ]
$\dot{m}_{oTS}$ ...	tägliches organisches Trockenmassenaufkommen [ $kg_{oTS}/d$ ]
$F$ ...	Faulraumbelastung [ $kg_{oTS}/(m^3 * d)$ ]

Bei bekannter Verweilzeit wird das Nettofermentervolumen mit Formel 5.2 bestimmt. [14]

$$V_{netto} = \dot{V}_S * t_V \quad (5.2)$$

$\dot{V}_S$ ...	tägliches Substrataufkommen [ $m^3/d$ ]
$t_V$ ...	Verweilzeit [ $d$ ]

Das Nettofermentervolumen ist das Mindestvergärungsvolumen (ohne zusätzliche Einbauten etc.) inklusive eines zusätzlichen Volumens aufgrund einer zusätzlich vorgeschriebenen Höhe von 10 cm. Das Bruttofermentervolumen ist das bauliche Fermentervolumen, das sich aus Formel 5.3 errechnet. [90]

$$V_{brutto} = V_{netto} * 1,1 \quad (5.3)$$

$V_{brutto}$ ...	Bruttofermentervolumen [ $m^3$ ]
------------------	----------------------------------

Das errechnete Nettofermentervolumen wurde in der eigenen Berechnung mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % beaufschlagt, um zu kurze Verweilzeiten oder zu hohe Faulraumbelastungen bei Änderungen der Substratzusammensetzung oder der Substratmengen entgegenzuwirken.

Das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser typischer Fermenter beträgt 0,33. Die Höhe des Mastes eines Fermenters beträgt in etwa 0,5 bis einen Meter. Der Fermentermast besitzt eine zylindrische Form und verhindert, dass die Gasspeichermembrane im drucklosen Zustand auf der Gärsubstratoberfläche aufliegt. Für die Berechnung des Gärrestlagers können die selben Proportionen herangezogen werden. Bei B.T.S Biogas ist es üblich den Fermenter der Biogasanlage auf zwei Gebäude, nämlich den Fermenter und den Nachfermenter aufzuteilen, die beide in etwa die selbe Größe besitzen. [102]

Das Gärrestlager muss in Österreich für eine Vorhaltezeit von mindestens 6 Monaten ausgelegt sein. Das errechnete Nettogärrestvolumen wurde ebenfalls mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % beaufschlagt und anschließend mit dem Faktor 1,1 multipliziert, um das Brutto Gärrestvolumen zu erhalten.

Nimmt man nun an, dass der Gasspeicher über dem Fermenter und dem Gärrestlager aus einer halbkugelförmigen Membrane besteht, kann man das Gasspeichervolumen des Fermenters, des Nachfermenters und des Gärrestlagers berechnen.

### 5.3.2 Durchführung der wirtschaftlichen Berechnung

Für die dynamische Amortisationsrechnung wurde ein Angebot im Juni 2013 bei der Firma „UTS Biogas“ eingeholt. Abbildung 4.2 zeigt ein beispielhaftes Schema der angebotenen Bio-

## 5 Ermittlung eines Biogasanlagenkonzeptes

gasanlage. Laut [103] würden sich die ungefähren Kosten der einzelnen Biogasanlagenaggregate wie folgt belaufen:

- Hydrolyse: 100.000 Euro
- Hygienisierung: 45.000 Euro (Für die Berechnung wurde der Kostenvorschlag der Firma „Pondrus“ mit 70.000 Euro verwendet)
- Aufbereitung: 200.000 Euro
- zwei Fermenter und Gärrestlager: 600.000 bis 800.000 Euro
- BHKW: 180.000 Euro
- Baumaßnahmen (Straßen, Wege, Gebäude, Lager): 150.000 bis 300.000 Euro
- Netzanschluss: 40.000 bis 100.000 Euro
- Sonstiges: 40.000 Euro
- Fahrzeuge, Waage: 70.000 Euro

Insgesamt ist die Investition mit circa 2.000.000 Euro anzusetzen.

Der Stromeigenverbrauch der Biogasanlage beträgt in etwa 8 % der theoretisch eingespeisten elektrischen Energie. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten betragen 1 Cent je kWh erzeugte Biogasenergie. Für die Betriebsführung müssen je Tag 2 Stunden (angenommener Stundensatz 50 Euro je Stunde) angenommen werden. [103]

Da die Komplexität und der technische Aufwand einer Abfallvergärungsanlage sehr hoch ist, rechnet sich laut UTS solch eine Anlage erst ab einer elektrischen Leistung von 400 bis 1000 kW. Um solch eine Leistung zu erreichen, müsste das 3 bis 8 fache der momentanen Substratmenge eingesetzt werden.

Um zu zeigen, dass die wirtschaftliche Biogasproduktion bei momentaner Anlagengröße selbst unter den günstigsten Annahmen und Voraussetzungen kaum möglich ist, wird die dynamische Amortisationsrechnung bei Investkosten von 1.335.000 Euro durchgeführt. Diese Kosten ergeben sich durch das Aufsummieren folgender Aggregatskosten:

- Hydrolyse: 100.000 Euro
- Aufbereitung: 200.000 Euro
- Fermenter und Gärrestlager: 700.000 Euro
- Baumaßnahmen: 225.000 Euro
- Sonstiges: 40.000 Euro

- Fahrzeuge, Waage: 70.000 Euro

Die Kosten des BHKWs und des Netzanschlusses finden sich nicht bei den betrachteten Aggregatskosten, da in der anschließenden Wirtschaftlichkeitsberechnung rein der Erzeugungspreis des Biogases ermittelt wird. Die Umwandlungskosten des Biogases in elektrische Energie wird in einem separaten Schritt berücksichtigt.

Auf eine Hygienisierung wurde verzichtet, da angenommen wird, dass der Fermenter thermophil betrieben wird. Es wird angenommen, dass für die Fermenterheizung benötigte Wärme keine Kosten anfallen. Diese Annahme darf nur getroffen werden, wenn eine Verstromung des Biogases mit einem BHKW erfolgt. Steht kein BHKW zur Verfügung, muss während der Winterrevision und während anderen Betriebsstillständen Biogas für die Fermenterheizung verfeuert werden. Ebenfalls wird angenommen, dass bei der Ausbringung der Gärreste (davon ausgenommen sind die Wirtschaftsdünger) keine Kosten anfallen. Die Kosten des BHKWs gehen nicht in die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit ein, da nur die spezifischen Biogastgestehungskosten ermittelt werden sollen.

### 5.3.3 Ergebnisse der technischen Berechnung

Aufgrund des sich ergebenden durchschnittlichen Trockensubstanzgehaltes der aufgegebenen Substratmischung (siehe Kapitel 5.1) werden die anschließenden Berechnungen für einen voll-durchmischten Fermenter (Speicherverfahren) durchgeführt.

Das Fermentervolumen wurde für die in Kapitel 5.1 angeführte Substratzusammensetzung und Substratmenge mit den Formeln 5.1 und 5.2 berechnet.

Bei einer angenommenen Faulraumbelastung von  $2,5 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{ je m}^3$  und Tag und einem Sicherheitszuschlag von 20 % ergibt sich ein Nettofermentervolumen von  $1021 \text{ m}^3$ . Die Verweilzeit des Substrates und die tatsächliche Faulraumbelastung beträgt bei dieser Fermentergröße 69 Tage und  $2,1 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{ je m}^3$  und Tag. Bei einer angenommenen Verweilzeit von 80 Tagen und einem Sicherheitszuschlag von 20 % ergibt sich eine Nettofermentervolumen von  $1417 \text{ m}^3$ . Die Faulraumbelastung und die tatsächliche Verweilzeit beträgt bei dieser Fermentergröße  $1,5 \text{ kg}_{\text{oTS}} \text{ je m}^3$  und Tag und 96 Tage. Für die weiteren Berechnungen wurde das größere Nettofermentervolumen mit  $1417 \text{ m}^3$  herangezogen. Somit ergibt sich ein Bruttofermentervolumen von  $1560 \text{ m}^3$ . Das Bruttovolumen des Gärrestlagers beträgt bei einer jährlich anfallenden Gärrestmenge von 4962 Tonnen, einer Vorhaltezeit von 6 Monaten und dem Sicherheitszuschlag von 20 %,  $3284 \text{ m}^3$ .

Das nutzbare Gasspeichervolumen des Fermenters und des Nachfermenters beträgt jeweils  $783 \text{ m}^3$  bei einer gewählte Masthöhe von 1 m. Das nutzbare Gasspeichervolumen des Gärrestlagers beträgt  $3143 \text{ m}^3$ . Dieser Wert wurde ebenfalls bei einer Masthöhe von 1 m errechnet. Insgesamt ist ein Gasraum von  $4709 \text{ m}^3$  nutzbar.

### 5.3.4 Ergebnisse der wirtschaftlichen Berechnung

Bei den in Unterkapitel 5.3.2 getroffenen optimistischen wirtschaftlichen Annahmen errechnet sich der Biogaspreis mit 5,4 Cent je kWh<sub>Biogas</sub>. Bei diesem Preis ist der Kapitalwert nach 12 Jahren exakt 0. Die momentanen Erdgaspreiskosten inklusive den CO<sub>2</sub> Zertifikatskosten liegen mit 5,3 Cent je kWh<sub>Erdgas</sub> unter diesem Wert. Aufgrund der günstigen Annahmen, muss der errechnete Biogaspreis von 5,4 Cent je kWh<sub>Biogas</sub> als absolut unterste Preisgrenze verstanden werden. Wird die Berechnung bei den realistisch geschätzten Investkosten von 2.000.000 Euro abzüglich der Kosten für die Netzeinspeisung und das BHKW durchgeführt, ergibt sich ein Biogaspreis von 7,7 Cent je kWh<sub>Biogas</sub>. Dieser Biogaspreis errechnet sich immer noch bei günstig angenommenen Randbedingungen (kostenlose Gärrestausrückführung, kostenlose Fermenterwärme bei unberücksichtigten Betriebsstillständen, niedriger elektrischer Energiebedarf, etc.) und kann deshalb bei einer tatsächlichen Umsetzung des Projektes noch höher liegen.

## 5.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Obwohl zum Großteil Substrate mit sehr gutem Aufwand zu Kosten Verhältnis eingesetzt werden (siehe Abbildung 4.4 und 5.1) ist eine kostengünstige Biogasproduktion nicht möglich, da die vergärbaren Mengen zu gering sind. Unter optimistischen Annahmen errechnet sich immer noch ein Biogaspreis der weit über dem Erdgaspreis liegt.

An den geringen Substratmengen wird schlussendlich auch der wirtschaftliche Einsatz eines Substrataufschlusses scheitern. Die spezifischen Investkosten stellen den überwiegenden Teil der gesamten spezifischen Substrataufschlusskosten dar (siehe Abbildung 5.7). Diese Kosten lassen sich nur durch eine erhöhte Auslastung des Bio-Extruders senken.

Als günstig stellt sich die Ausbringung von Gärresten auf landwirtschaftliche Flächen heraus. Aufgrund der hohen Nährstoffkonzentrationen in den Gärresten, stellt die Düngung mittels Gärresten eine für den Landwirt interessante Option zu anderen teuren Düngemitteln dar. Die Erlöse der pflanzenverfügbaren Nährstoffe übersteigen die Ausbringungskosten der Gärreste bei weitem. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass der Landwirt die Gärreste kostenneutral auf seine Felder ausbringen wird. Trotz des vorhandenen Flächenbedarfs, aufgrund der Ausbringung von Gülle aus der Viehhaltung, ist ausreichend Fläche im Umkreis des Zementwerkes vorhanden, um den Gärrestausrückweg kurz zu halten. Für den Biogasanlagenbetreiber und den Landwirt könnte bei Kooperation eine Win-Win Situation entstehen.

# 6 Ermittlung eines Anlagenkonzeptes zur Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage

Die Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage wirft besonders hinsichtlich der Verfahrenstechnikauswahl etliche Frage- und Problemstellungen auf. In diesem Kapitel finden sich dazu allgemeine theoretische Überlegungen und Berechnungen. Die Grundlagen und Rahmenbedingungen für diese Berechnungen liefern die Ergebnisse des Kapitels 5.3 und eine zu Beginn dieses Kapitels durchgeführte Brennstoffbewertung nach wirtschaftlichen und prozessrelevanten Kriterien.

## 6.1 Brennstoffbewertung

In diesem Kapitel wird ermittelt, bei welchen Brennstoffen eine Substitution durch Biogas am sinnvollsten ist. Biogas wird mit allen im Werk eingesetzten Brennstoffen hinsichtlich wirtschaftlichen Kriterien und Prozess relevanten Kriterien verglichen.

Die Ergebnisse dieses Kapitels stellen die Grundlage dar, auf der alle weiteren Überlegungen aufgebaut sind.

### 6.1.1 Vergleich der Brennstoffe hinsichtlich wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien

#### 6.1.1.1 Durchführung der wirtschaftlichen Berechnung

Die Brennstoffkosten des Brennstoffes Biogas wurden durch eine dynamische Investitionsrechnung mit 5,4 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> (unterste Kostengrenze) für den Standort Gmunden ermittelt. Nähere Informationen zu dem Anlagenkonzept und den getroffenen Annahmen der Brennstoffkostenermittlung des Brennstoffes Biogas finden sich im Kapitel 5.3.4.

Die gesamten Brennstoffkosten der übrigen Brennstoffe beinhalten die Kosten oder Erlöse des Brennstoffzukaufs, die Aufbereitungskosten, die Lagerkosten sowie die Emissionszertifikatskosten, die sich durch Multiplikation des Emissionsfaktors des Brennstoffes mit dem fossilen Anteil des Brennstoffes und dem CO<sub>2</sub>-Preis ergeben (siehe Kapitel 2.1.2). Die Werte der Tabelle 6.1 wurden mit den momentanen Brennstoffkosten und den momentanen Emissionszertifikatskosten von 4,15 Euro/(t CO<sub>2</sub>) (Stand: 18.07.2013) berechnet (ausgenommen die Werte der Spalte



„Differenz zu Biogas 3“).

Obwohl das Zementwerk für eine bestimmte Periode Emissionszertifikate kostenlos zugeteilt bekommt, müssen die Emissionszertifikatskosten ebenfalls mitberücksichtigt werden, da die Zementindustrie jederzeit dazu berechtigt ist, ihre Emissionszertifikate am freien Markt zu verkaufen und damit Erlöse zu erwirtschaften. Anders ausgedrückt geht dem Zementwerk durch das Verfeuern emissionslastiger Brennstoffe Geld in Form von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten verloren.

Die fossile CO<sub>2</sub>-Belastung berechnet sich durch Multiplikation des Emissionsfaktors mit dem fossilen Anteil des Brennstoffes. Dieser Wert gibt an, welche Menge nicht erneuerbare CO<sub>2</sub>-Emissionen je Energiemenge emittiert werden. Da dies die Menge an CO<sub>2</sub> ist die für den Treibhauseffekt verantwortlich ist, müssen nur für diese Menge CO<sub>2</sub>-Zertifikate zur Verfügung gestellt werden.

#### 6.1.1.2 Vergleich der Brennstoffe bei optimistischen Biogaskosten des Gmundner Zementwerks

Tabelle 6.1 zeigt die in Rohrdorf und Gmunden eingesetzten Brennstoffe nach den gesamten Brennstoffkosten absteigend sortiert.

Neben dem Emissionsfaktor, dem Biogenanteil, der fossilen CO<sub>2</sub> Belastung sowie den Emissionszertifikats-Brennstoffkosten der angeführten Substrate, weist die Tabelle 6.1 Differenzkosten zu drei Szenarien auf. Die Differenzkosten zu Biogas geben den Verlust je Energieeinheit (bei negativen Vorzeichen) oder Gewinn je Energieeinheit (bei positiven Vorzeichen), bei Substitution des jeweiligen Brennstoffes mit Biogas an. Folgende Annahmen wurden bei den jeweiligen Szenarien getroffen:

- Differenz zu Biogas 1: momentane Emissionszertifikatskosten (Stand: 18.07.2013): 4,15 Euro/(t CO<sub>2</sub>), berechnete (optimistisch) Biogaskosten: 5,4 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> siehe Kapitel 5.3.4
- Differenz zu Biogas 2: momentane Emissionszertifikatskosten (Stand: 18.07.2013): 4,15 Euro/(t CO<sub>2</sub>), mögliche Biogaskosten nach [12]: 4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>
- Differenz zu Biogas 3: angenommene Emissionszertifikatskosten: 25 Euro/(t CO<sub>2</sub>), mögliche Biogaskosten nach [12]: 4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>

## 6 Ermittlung eines Anlagenkonzeptes zur Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage

Brennstoffe	Emissionsfaktor	Biogenanteil	fossile CO <sub>2</sub> Belastung	ges. Brennstoffk.	CO <sub>2</sub> Brennstoffkosten		Differenz zu Biogas 1	Differenz zu Biogas 2	Differenz zu Biogas 3
	[E <sub>CO<sub>2</sub></sub> /kWh]	[E <sub>biogen</sub> /E <sub>ges.</sub> • 100 %]	[E <sub>CO<sub>2</sub>fossil</sub> /kWh]	[Cent/kWh]	[€/GJ]	[%]	[Cent/kWh]		
Heizöl-EL	266	0,0	266	7,15	0,11	1,55	1,75	2,42	2,98
Biogas 60% CH <sub>4</sub>	197	100	0	5,40	0,00	0,00	0,00		
Erdgas	202	0,0	202	5,29	0,08	1,58	-0,11	0,56	0,98
Steinkohle	343	0,0	343	2,30	0,14	6,20	-3,10	-2,43	-1,72
Braunkohle	400	0,0	400	1,92	0,17	8,65	-3,48	-2,81	-1,98
Heavy Fuel	254	0,0	254	1,52	0,11	6,92	-3,88	-3,21	-2,68
Flüssigbrennstoffe	278	0,0	278	0,65	0,12	17,84	-4,75	-4,08	-3,50
BPG	303	27,3	220	0,55	0,09	16,76	-4,85	-4,18	-3,72
Tetra-Pak-Rejekte	267	23,1	206	0,50	0,09	16,93	-4,90	-4,23	-3,80
Altreifen	317	27,0	231	0,17	0,10	58,09	-5,23	-4,56	-4,08
Dachpappe	289	0,0	289	-0,71	0,12	12,59	-6,11	-5,44	-4,84
Papierfangstoffe	511	65,1	178	-0,76	0,07	8,16	-6,16	-5,49	-5,12

Tabelle 6.1: Kosten, emissionsrelevante Werte und verschiedene Differenzkosten der im Rohrdorfer und Gmundner Zementwerk eingesetzten Brennstoffe in Vergleich zu Biogas für das Jahr 2012 [61]

Wie aus Tabelle 6.1 ersichtlich ist, weist Biogas mit Abstand die größten Brennstoffkosten auf (ausgenommen Heizöl EL).

Bei Brennstoffen mit einer hohen CO<sub>2</sub>-Belastung wie zum Beispiel Braunkohle, Steinkohle oder Dachpappe, wirkt sich eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten besonders negativ auf die Brennstoffkosten aus. Die Kosten für Biogas sind von einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten nicht betroffen, da Biogas einen biogenen Anteil von 100 % aufweist (siehe Kapitel 2.1.2). Aufgrund der hohen Herstellungskosten von Biogas muss jedoch ein äußerst unrealistischer CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis von 106 Euro/(Tonne CO<sub>2</sub>) angenommen werden, um mit den Kosten von Steinkohle gleich auf zu kommen (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2 zeigt die errechneten Brennstoffkosten je kWh eingebrachte Energiemenge bei gleichbleibenden Einkaufskosten/erlöse, Aufbereitungskosten und Lagerkosten aber veränderten Emissionszertifikatskosten von 106 Euro je Tonne CO<sub>2</sub>.

Brennstoffe	ges. Brennstoffk. [Cent/kWh]	CO2 Brennstoffkosten [Cent/kWh]	Diff. Kosten zu Biogas [%]	Diff. Kosten zu Biogas [Cent/kWh]
Heizöl-EL	9,87	2,83	10,31	4,07
Erdgas	7,34	2,14	10,48	1,54
Braunkohle	5,99	4,24	25,48	0,19
Biogas 60% CH4	5,80	0,00	0,00	0,00
Steinkohle	5,80	3,64	22,62	0,00
Heavy Fuel	4,12	2,70	23,59	-1,68
Flüssigbrennstoffe	3,48	2,95	30,51	-2,32
BPG	2,79	2,34	30,14	-3,01
Tetra-Pak-Rejekte	2,60	2,18	30,20	-3,20
Altreifen	2,52	2,45	35,01	-3,28
Dachpappe	2,23	3,07	28,31	-3,57
Papierfangstoffe	1,06	1,89	25,00	-4,74

Tabelle 6.2: Errechnete Brennstoffkosten bei gleichbleibenden Einkaufskosten/erlöse, Aufbereitungskosten, Lagerkosten aber veränderten Emissionszertifikatskosten

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei dem momentan betrachteten Biogasanlagenkonzept, der momentanen Anlagengröße sowie dem momentanen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis eine Substitution der Brennstoffe (ausgenommen Heizöl EL) durch Biogas wirtschaftlich nicht sinnvoll ist.

Ebenfalls muss festgehalten werden, dass eine Substitution der Brennstoffe Heizöl EL und Erdgas bei momentanen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis, zwar mit den höchsten Gewinnen (oder geringsten wirtschaftlichen Verlusten) jedoch auch mit den geringsten CO<sub>2</sub>-Einsparungen verbunden ist. Eine Brennstoffsubstitution durch Biogas, die möglichst wirtschaftlich und umweltfreundlich zugleich ist, lässt sich demnach nicht finden.

### 6.1.1.3 Ermittlung der maximal tolerierbaren Biogaskosten

In Kapitel 6.1.1.2 wurde mit fixen Biogaskosten von 5,4 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> gerechnet. In diesem Kapitel soll geprüft werden welche Biogaskosten bei momentanen CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten noch tolerierbar sind, um andere Brennstoffe wirtschaftlich substituieren zu können.

Da für die Verfeuerung von Biogas keine CO<sub>2</sub>-Zertifikate benötigt werden, stellen die gesamten Brennstoffkosten der jeweiligen Brennstoffe auch gleichzeitig die maximal tolerierbaren Biogaskosten dar.

Laut [12] ist bei einer Kopplung einer Biogasanlage mit einem Zementwerk, ab einer Rohbiogasproduktion von 125 Nm<sup>3</sup>/h, ein Biogaspreis von unter 4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> möglich. Könnte solch ein niedriger Biogaspreis tatsächlich mit einer gekoppelten Biogasanlage erreicht werden, ist die Erdgassubstitution in Gmunden (Differenzkosten zu Biogas = 0,56 Cent) sowie die Heiz-

öl EL Substitution in Rohrdorf (Differenzkosten zu Biogas = 2,42 Cent) wirtschaftlich sinnvoll (siehe Tabelle 6.1).

Liegt der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis wie ursprünglich von der EU erhofft bei 25 Euro je Tonne CO<sub>2</sub>, ergeben sich bei Erdgas Differenzkosten zu Biogas von fast einem Cent und bei Heizöl EL Differenzkosten zu Biogas von beinahe 3 Cent (siehe Tabelle 6.1).

Eine Kostenersparnis von 3 Cent je kWh substituiertes Heizöl EL klingt äußerst vielversprechend. Kann die gesamte jährliche Menge an Heizöl durch Biogas ersetzt werden, würde sich eine jährliche Kostenersparnis von über 70.000 Euro ergeben. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass sich die Substitution von Erdgas und Erdöl als schwierig herausstellen wird, da beide Brennstoffe nur diskontinuierlich eingesetzt werden, während Biogas jedoch kontinuierlich erzeugt wird.

In Kapitel 6.2.2 wird auf diese Problemstellung näher eingegangen.

## 6.1.2 Vergleich der Brennstoffe hinsichtlich ihrer adiabaten Flammentemperatur

### 6.1.2.1 Berechnung der adiabaten Flammentemperatur des Rohbiogases

Aus Gründen der Klinkerqualität müssen im Drehrohrofen Verbrennungstemperaturen von über 1800 °C eingestellt werden. [32]

Mit einer adiabaten Verbrennungsrechnung wird abgeschätzt, inwieweit sich diese Temperaturen mit Rohbiogas erreichen lassen.

Tabelle 6.3 zeigt die für die Verbrennungsrechnung verwendeten Annahmen.

Anteil Primärluft	Temp.Primärluft + Biogas	Temperatur Sekundärluft	Luftüberschuss	Heizwert CH <sub>4</sub>	cp Staub
[%]	[°C]	[°C]	[-]	[MJ/mol]	[kJ/kg K]
12	80	900	1	0,8024	1,1

Tabelle 6.3: Annahmen für die adiabate Verbrennungstemperaturrechnung

Für die Berechnung wird eine vollständige stöchiometrische Verbrennung angenommen. Aufgrund realer Verbrennungsvorgänge und einer unvollständiger Verbrennung wird die tatsächliche Flammentemperatur weit unter der adiabaten Flammentemperatur liegen. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben die geringen Mengen an Wasserdampf und H<sub>2</sub>S des Rohbiogases, die für die adiabate Flammentemperaturberechnung vernachlässigt wurden. Da die in das System eingebrachte sensible Wärme der Brennstoffmischung sowie des Rohbiogases vernachlässigbar gering ist, wird diese ebenfalls nicht berücksichtigt.

Weiters wird angenommen, dass der im Brennstoff vorhandene Stickstoff sowie der im Brennstoff vorhandene Schwefel vollständig zu NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> aufoxidiert wird.

### 6.1.2.2 Ergebnisse der adiabaten Flammentemperaturrechnung des Rohbiogases

Bei einer Methankonzentration des verwendeten Biogases von 60 % und den in Tabelle 6.3 getroffenen Annahmen, errechnet sich die adiabate Verbrennungstemperatur des reinen Rohbiogases mit 2650 Kelvin. Nimmt man eine Methankonzentration des Rohbiogases von nur 50 % an, ergibt sich immer noch eine sehr hohe adiabate Verbrennungstemperatur von 2564 Kelvin. Um diese Ergebnisse besser bewerten zu können, wurde anschließend die adiabate Verbrennungstemperatur einer typischen Brennstoffaufgabe im Zementwerk Rohrdorf, errechnet.

**Berechnung der adiabaten Flammentemperatur einer typischen Brennstoffaufgabe** Für die Berechnung der adiabaten Verbrennungstemperatur einer typischen Brennstoffaufgabe im Zementwerk Rohrdorf, wurden die in Tabelle 6.3 angeführten Annahmen verwendet.

Tabelle 6.4 zeigt eine typische Brennstoffaufgabe des am Primärbrenner stündlich verfeuerten Brennstoffes. Multipliziert man die Massenströme der einzelnen Brennstoffe mit deren Heizwert, ergibt sich eine thermische Leistung der Primärfeuerung von 110,5 MW.

Brennstoffe	ges.	CO2 Brennstoffkosten		Diff. Kosten
	Brennstoffk.	[Cent/kWh]	[%]	zu Biogas [Cent/kWh]
Heizöl-EL	9,87	2,83	10,31	4,07
Erdgas	7,34	2,14	10,48	1,54
Braunkohle	5,99	4,24	25,48	0,19
Biogas 60% CH4	5,80	0,00	0,00	0,00
Steinkohle	5,80	3,64	22,62	0,00
Heavy Fuel	4,12	2,70	23,59	-1,68
Flüssigbrennstoffe	3,48	2,95	30,51	-2,32
BPG	2,79	2,34	30,14	-3,01
Tetra-Pak-Rejekte	2,60	2,18	30,20	-3,20
Altreifen	2,52	2,45	35,01	-3,28
Dachpappe	2,23	3,07	28,31	-3,57
Papierfangstoffe	1,06	1,89	25,00	-4,74

Tabelle 6.4: Brennstoffzusammensetzung des am Primärbrenner verfeuerten Brennstoffes

Die Tabelle 6.5 und 6.6 zeigt die für die Verbrennungsrechnung essentielle durchschnittliche Elementarzusammensetzung sowie die durchschnittliche Brennstofffeuchte, den durchschnittlichen Aschegehalt und den durchschnittlichen Heizwert der im Primärbrenner verfeuerten Brennstoffe.

Im Falle der Ersatzbrennstoffe BPG und Tetra Pack Rejekte, wurden diese Werte aus Firmen internen Brennstoffanalysen ermittelt. Die Werte der Tetra Pack Rejekte konnten durch eine reine Durchschnittswertbildung von 50 Messergebnissen ermittelt werden, da dieser Ersatzbrennstoff nur von einem Lieferanten kommt.

Brennstoffe	gesamter Wassergehalt [%FM]	Aschegehalt 975 °C [%TS]	Heizwert [kJ/kg <sub>FM</sub> ]
Steinkohle	0,01	11,83	29309
BPG	15,63	9,04	21988
Tetra-Pak-Rejekte	29,59	12,26	21535
Flüssigbrennstoffe	18,08	3,98	19937

Tabelle 6.5: Elementarzusammensetzung der am Primärbrenner verfeuerten Brennstoffe

Brennstoffe	Kohlenstoff	Wasserstoff	Stickstoff	Sauerstoff	Chlor	Schwefel
	[%TS]					
Kohle	73,63	4,73	1,00	8,20	0,00	0,60
BPG	59,65	8,22	0,76	21,32	0,79	0,12
Tetra-Pak-Rejekte	62,20	9,88	0,12	15,28	0,21	0,05
Flüssigbrennstoffe	49,04	10,28	2,26	34,26	0,39	0,21

Tabelle 6.6: Elementarzusammensetzung der am Primärbrenner verfeuerten Brennstoffe

Da die BPGs von 5 verschiedenen Lieferanten kommen, wurde zuerst der Durchschnittswert der Messergebnisse je Lieferant gebildet. Um eine aussagekräftige durchschnittliche Zusammensetzung dieses Ersatzbrennstoffes zu bekommen, wurden diese Durchschnittswerte mit dem energiebezogenen Anteil an der Primärfeuerung multipliziert und aufsummiert. Für diese Auswertung wurden insgesamt 123 Messergebnisse herangezogen.

Die für die Verbrennungsrechnung relevanten Daten der Flüssigbrennstoffe und der Kohle wurden durch die Durchschnittswertbildung von jeweils vier extern durchgeführten Brennstoffanalysen ermittelt.

Bei der Verfeuerung einer durchschnittlichen Brennstoffaufgabe am Primärbrenner errechnet sich die adiabate Verbrennungstemperatur mit 2980 Kelvin.

### 6.1.2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Um Biogas besser mit anderen Brennstoffen vergleichen zu können, finden sich in Tabelle 6.7 die errechneten adiabaten Verbrennungstemperaturen der Ersatzbrennstoffe und der Biogase sowie Werte, die einen relevanten Einfluss auf die adiabate Verbrennungstemperatur ausüben.

Die Werte der Abgasmenge in Tabelle 6.7 beinhalten neben den gasförmigen Verbrennungsprodukten noch die verdampfte Brennstofffeuchte sowie den in der Verbrennungsluft vorhandenen Stickstoff.

Brennstoffe mit niedrigem Heizwert, hohen Abgasmengen und hohem stöchiometrischem Luftbedarf weisen geringe adiabate Verbrennungstemperaturen auf. Auffallend ist, dass Biomethan trotz des sehr hohen Heizwertes eine geringere adiabate Verbrennungstemperatur als Steinkohle aufweist.

## 6 Ermittlung eines Anlagenkonzeptes zur Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage

Brennstoffe	adiabate. VT	ad. VT Abw. zu Brennstoffm.	Heizwert	stöch. Luftbedarf	Abgasmenge	Asche
	[K]	[%]	[kJ/kg]	[kmol/h]	[kmol/h]	[t/h]
Biogas 50% CH <sub>4</sub>	2564	-9,0	13.373	4.723	5715	0
Biogas 60% CH <sub>4</sub>	2650	-6,0	17.700	4.723	5549	0
Biogas 70% CH <sub>4</sub>	2715	-3,7	23.020	4.723	5431	0
Flüssigbrennstoffe	2734	-3,0	19.937	4.480	5275	0,65
BPG	2775	-1,5	21.988	4.666	5238	1,38
Tetra Pack	2787	-1,1	21.535	4.451	5139	1,59
Brennstoffmischung	2818	0,0	23.111	4.603	5130	1,43
Biomethan	2844	0,9	50.150	4.723	5219	0
Steinkohle	2986	6,0	29.309	4.623	4819	1,61

Tabelle 6.7: Adiabate Verbrennungstemperatur unterschiedlicher Brennstoffe, die prozentuale Abweichung zur adiabaten Verbrennungstemperatur einer durchschnittlichen Brennstoffaufgabe, Heizwert, stöchiometrischer Luftbedarf, Abgasmenge, Aschemenge

Tabelle 6.8 zeigt jedoch, dass sich eine Zufeuerung von Biogas bis 5 MW zu einer wie in Tabelle 6.8 angeführten durchschnittlichen Brennstoffaufgabe beinahe nicht auf die adiabate Verbrennungstemperatur auswirkt. Eine kontinuierliche Biogaszufeuerung größer als 5 MW ist äußerst unrealistisch, da es für solche Mengen an Biogas sehr große Biogasanlagen bedarf. Sollte trotzdem kurzfristig durch das Heranziehen von Gasspeichern eine große Leistung an Biogas in den Drehrohrofen eingebracht werden (siehe Kapitel 6.2.3), kann durch eine Erhöhung des Anteils an Brennstoffen mit sehr hohen adiabaten Verbrennungstemperaturen (BPGs, Kohle) die gewünschte adiabate Verbrennungstemperatur erreicht werden.

Unter dem in Tabelle 6.8 angeführten „regulären Brennstoffmassenstrom“ handelt es sich um eine Massenleistungsangabe einer Brennstoffaufgabe einer typischen Brennstoffzusammensetzung im Zementwerk Rohrdorf. Beim Biogasmassenstrom handelt es sich um keinen regulären Brennstoffmassenstrom.

Leistung Biogas an Primärbrenner Feuerung	adiabate. VT	adiabate VT Abweichung	regulärer Brennstoffmassenstrom
	[K]	[%]	[t/h]
0 KW Biogas 60% CH <sub>4</sub>	2817	0,0	17,22
500 KW Biogas 60% CH <sub>4</sub>	2817	0,0	17,14
1 MW Biogas 60% CH <sub>4</sub>	2816	0,0	17,06
5 MW Biogas 60% CH <sub>4</sub>	2810	-0,2	16,44
20 MW Biogas 60% CH <sub>4</sub>	2785	-1,1	14,10
50 MW Biogas 60% CH <sub>4</sub>	2738	-2,8	9,43

Tabelle 6.8: Adiabate Flammentemperaturen, adiabate Flammentemperaturabweichung und reguläre Brennstoffmassenströme bei Zufeuerung von Biogas

## 6.2 Konzeptvorüberlegungen

Durch die in diesem Kapitel durchgeführten Überlegungen, zu den standortspezifischen betrieblichen Möglichkeiten der Biogasverwertung und der Gärrestentsorgung, sollen jene Prozesse eruiert werden, die das größte wirtschaftliche Potential bergen.

### 6.2.1 Biogasverstromung vs. Biogasverfeuerung im Drehrohrofen

#### 6.2.1.1 Einführung in die Problemstellung

Allgemein gibt es für Biogas drei grundlegende Verwertungsoptionen. Die rein thermische Verwertung, die Verstromung eventuell mit Kraft-Wärme-Kopplung und die Aufbereitung zu Biomethan. Die Biogasaufbereitung zu Biomethan kommt für beide Standorte nicht in Frage, da diese nur bei sehr hoher Biogasleistung wirtschaftlich rentabel ist [90]. Trotzdem wird diese Verfahrensoption kurz in Kapitel 6.2.4 behandelt.

Für beide Zementwerke kommt also nur eine Verstromung oder eine thermische Verwertung in Frage. In diesem Kapitel werden die ökonomischen Aspekte dieser Biogasverwertungsmöglichkeiten beleuchtet und anschließend gegenübergestellt.

#### 6.2.1.2 Durchführung der Berechnung zur thermischen Biogasverwertung

In Tabelle 6.1 sind die Substitutionsgewinne und Substitutionsverluste, die bei der Substitution der im Zementwerk eingesetzten Brennstoffe entstehen, angegeben. Die in Tabelle 6.1 angegebenen Werte sind korrekt, wenn die anschließende Verstromung der Abgase im Abhitzekraftwerk des Rohrdorfer Zementwerkes nicht berücksichtigt wird. Bei einer Brennstoffsubstitution ändert sich durch den neuen Brennstoff die Abgasmenge und bei Annahme einer gleichen Abgastemperatur nach dem Wärmetauscherturm, die in das Abhitzekraftwerk eingebrachte Wärmeleistung. Je nachdem welcher Brennstoff eingesetzt wird, kann demnach mehr oder weniger thermische Energie in elektrische Energie im Abhitzekraftwerk umgewandelt werden. Die Annahme einer konstanten Abgastemperatur ist nicht vollständig korrekt, da bei einer höheren Abgasmenge gleichzeitig mehr Energie im Abgas gebunden ist, die jedoch für den Prozess benötigt wird. Somit müsste geringfügig mehr Brennstoff eingesetzt werden oder die Abgastemperatur würde leicht sinken, was den positiven Effekt einer zusätzlichen Verstromung aufheben würde. Trotzdem soll die Berechnung unter diesen Annahmen durchgeführt werden, um zu zeigen, dass so oder so der Einfluss einer zusätzlichen Verstromung verschwindend gering ist.

Um die Abgasmengen der Brennstoffe Heizöl EL, Erdgas und Biogas zu ermitteln, wurde eine Verbrennungsrechnung durchgeführt. Anschließend wurde der Wärmeinhalt der Abgase zwischen 430 °C und 165 °C ermittelt. Wobei die Abgastemperatur vor dem Kessel 430 °C und die Abgastemperatur nach dem Kessel 165 °C beträgt. Ein Teil der in das Abhitzekraftwerk eingebrachten Energie stammt von der Mittenluft des Klinkerkühlers und somit von der Energie des gekühlten Klinkers (siehe Kapitel 2.3.2.1). Um die im Abhitzekraftwerk verstromte Energie



je eingesetztem Brennstoff exakt zu ermitteln, müsste man die Energie ermitteln, die während des Prozesses im Klinker gebunden wird, um anschließend über die Mittenluft wieder abgeführt zu werden. Für eine ausreichend genaue Abschätzung reicht es allerdings, nur die Energie des Abgases nach dem Wärmetauscherturm zu berücksichtigen.

Für die Berechnung konnte auf IPSEpro Simulationen des Rohrdorfer Abhitzekraftwerkes zurückgegriffen werden. Mithilfe der Werte aus den Simulationen, wurde die am Generator erzeugte Leistung abzüglich der Pumpen- und Gebläseleistungen zu der über das Abgas aus dem Wärmetauscherturm eingebrachten Wärme ins Verhältnis gesetzt. Es ergibt sich ein Faktor von 0,216. Über diesen Faktor kann nun für jeden Brennstoff, die im Abhitzekraftwerk erzeugte elektrische Energie aus dem Wärmeinhalt des Abgases ermittelt werden.

Bei einer eingebrachten Brennstoffenergie von 294 kW ergibt sich eine Differenzwärmeleistung zwischen dem Biogasabgasstrom und dem Heizöl EL Abgasstrom von nur 4,3 kW. Bei der Substitution von Heizöl EL ergibt sich demnach ein elektrischer Mehrertrag von 0,9 kW (Mehrertrag in Geldeinheiten je kWh eingebrachten Biogas = 0,03 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>). Bei der Substitution von Erdgas fällt der elektrische Mehrertrag mit 0,8 kW<sub>el</sub> noch niedriger aus (Mehrertrag in Geldeinheiten je kWh eingebrachtem Biogas = 0,02 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>).

Diese Werte zeigen, dass der Einfluss einer zusätzlichen Verstromung bei der Substitution eines Brennstoffes verschwindend gering ist und nicht näher betrachtet werden muss.

### 6.2.1.3 Durchführung der Berechnung zur Biogas Verstromung

Um technische und wirtschaftliche Anhaltswerte für die Berechnungen zu bekommen, wurden Angebote bei der Firma G2 und bei der Firma Wels Strom GmbH eingeholt. Anders als bei der thermischen Verwertung des Biogases ist bei der Verstromung des Biogases in einem Blockheizkraftwerk oder einer Mikrogasturbine eine eventuelle Nachverstromung der heißen Abgase im Abhitzekraftwerk des Rohrdorfer Zementwerkes unbedingt zu untersuchen, da dies einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Projektes hat. Anschließend wird erklärt, wie die wirtschaftlichen und technischen Berechnungen der Biogasverstromung durchgeführt wurden. Tabelle 6.9 zeigt die aus den Angeboten übernommenen technische Werte für die Biogasverstromung mittels Blockheizkraftwerk.

BHKW	Nennleistung	Luft- überschuss	elektrischer Wirkungsgrad	thermischer Wirkungsgrad	Abgas- temperatur
	[kW]	[-]	[%]	[%]	[°C]
filiius 206	150	1,4	38,2	46	524
agenitor 312	450	1,5	40,6	42,3	450

Tabelle 6.9: technische Werte der Blockheizkraftwerke filiius 206 und agenitor 312

Über eine Verbrennungsrechnung wurde die Abgasmenge und die Abgaszusammensetzung des Blockheizkraftwerkes ermittelt. Somit ist über die Wärmekapazitäten der einzelnen Gase die

Wärmeleistung des Abgasstromes bekannt. Über den thermischen Wirkungsgrad kann die gesamte zur Verfügung stehende thermische Leistung ermittelt werden. Diese thermische Leistung setzt sich aus der Wärmeleistung der Abgase (zwischen der Abgastemperatur nach Motor und 180 °C) und der Wärmeleistung der Motorkühlung zusammen. Die Vorlauftemperatur der Motorkühlung beträgt in etwa 88 °C, die Rücklauftemperatur der Motorkühlung beträgt in etwa 82 °C. Das Temperaturniveau der Motorkühlung ist daher bei weitem für die Fermenterheizung ausreichend und würde auch für eine Hygienisierung genügen. Für eine Nachverstromung im Rohrdorfer Abhitzekraftwerk eignet sich jedoch nur die im Abgas enthaltene Energie.

Die Berechnung der Nachverstromung im Rohrdorfer Abhitzekraftwerk, erfolgt wie in Kapitel 6.2.1.2 beschrieben mit dem einzigen Unterschied, dass der „Verstromungsfaktor“ leicht von diesem Kapitel abweicht, da nun auch die Mittenluft zur Ermittlung des Verstromungsfaktors herangezogen werden muss (das Biogas kommt in keiner Form mit dem Klinker in Berührung, weshalb auch keine Energie aus dem Klinker zurückgewonnen werden kann). Ebenfalls wird angenommen, dass dem Bockheizkraftwerkabgas bis 165 °C Energie entzogen werden kann, da die Abgase im Rohrdorfer Abhitzekraftwerk auf dieses Temperaturniveau gekühlt werden.

Tabelle 6.10 zeigt die aus den Angeboten übernommenen wirtschaftlichen Werte für die Biogasverstromung mittels Blockheizkraftwerk.

BHKW	Investkosten	Betriebsstunden	Wartung und Instandhaltung	Ölmanagement und Ölwechsel
	[€]	[Bh]	[€/Bh]	[€/Bh]
<b>filius 206</b>	168555	60000	1,31	1,23
<b>agenitor 312</b>	333252	60000	3,37	1,54

Tabelle 6.10: wirtschaftliche Werte der Blockheizkraftwerke filius 206 und agenitor 312

Die in Tabelle 6.10 angegebenen Wartungs- und Instandhaltungskosten basieren auf einem Wartungsvertrag von G2 mit dem alle Wartungs- und Instandhaltungskosten abgedeckt werden (inklusive Material- und Ersatzteilkosten, Arbeits- und Anfahrkosten, etc.). Die in Tabelle 6.10 angegebenen Ölmanagement- und Ölwechselkosten stammen ebenfalls von einem Ölwechsellvertrag von G2. Während der Wartungsvertrag jedoch durchaus sinnvoll ist, können bei einem selbst durchgeführten Ölwechsel und einer selbst durchgeführten Ölbeschaffung Kosten gespart werden. Die Ölmanagement- und Ölwechselkosten von G2 werden deshalb nur als Anhaltswert herangezogen und mit dem Faktor 0,75 multipliziert, um so eine Annahme für die tatsächlich anfallenden Ölwechselkosten zu erhalten.

Für die wirtschaftliche Berechnung wurde angenommen, dass das Blockheizkraftwerk nur in Vollast betrieben wird. Diese Annahme ist realistisch, da die Biogasanlage über genug große Gasspeicher verfügt, um selbst große Motoren über längere Zeiträume auf Vollast betreiben zu können. Dadurch ergeben sich neben einem höheren Wirkungsgrad auch die geringst möglichen Wartungs-, Instandhaltungs- und Ölwechselkosten.

Um eine gute Vergleichbarkeit mit der thermischen Biogasnutzung zu erreichen, wurden die Erlöse und Aufwände der Biogasverstromung auf die Einheit 1 kWh<sub>Biogas</sub> bezogen. Bei dem Vergleich wurde auf eine Berücksichtigung der Investkosten verzichtet. Es wurden rein die durch den Betrieb eines Blockheizkraftwerkes entstehenden Erlöse und Aufwände berücksichtigt.

Eine Besonderheit der Mikrogasturbine liegt darin, dass die gesamte nicht nutzbare Wärme des Prozesses in das Abgas geht. Der in Tabelle 6.11 vom Hersteller angegebene sehr hohe thermische Wirkungsgrad ergibt sich nur, wenn die Abgase der Mikrogasturbine auf knapp über 100 °C abgekühlt werden. Für die Berechnung wurde diese Wirkungsgrad Angabe nicht verwendet (Die thermische Abgasleistung wurde wie beim BHKW über die Abgasmenge und die Abgaszusammensetzung bestimmt). Ansonsten erfolgt die technische und wirtschaftliche Berechnung der Mikrogasturbine auf sehr ähnliche Weise und soll hier nicht näher beschrieben werden. Tabelle 6.11 und 6.12 zeigen die aus den Angeboten übernommenen technischen Werte und wirtschaftlichen Werte der Biogasverstromung mittels Mikrogasturbine.

Mikrogasturbine	Nennleistung	Luft- überschuss	elektrischer Wirkungsgrad	thermischer Wirkungsgrad	Abgas- temperatur
	[kW]	[-]	[%]	[%]	[°C]
MTA 130-2	130	6,9	29,0	51,0	309
MTA 200	200	6,9	33,0	47,0	280
MTA 130-2 + MTA 200	330	6,9	31,4	48,6	291,4

Tabelle 6.11: technische Werte der Biogasverstromung mittels Mikrogasturbine

Mikrogasturbine	Investkosten	Betriebs- stunden	General- überholung	Wartung und Instandhaltung
	[€]	[Bh]	[€]	[€/Bh]
MTA 130-2	250000	60000	70000	0,97
MTA 200	370000	60000	80000	0,8
MTA 130-2 + MTA 200	620000	60000	150000	1,77

Tabelle 6.12: wirtschaftliche Werte der Biogasverstromung mittels Mikrogasturbine

Abbildung 6.5 zeigt die CO<sub>2</sub>-Einsparung bei Substitution der Brennstoffe Heizöl EL und Erdgas sowie bei der Erzeugung elektrischer Energie, für die EU, Deutschland und Österreich. Für die Berechnung wurden die in Tabelle 6.13 angegebenen CO<sub>2</sub>-Äquivalente verwendet. Die Werte 2010 und 2020 wurden gemittelt, um einen Wert für das Jahr 2015 zu erhalten.

Jahr	EU	Deutschland	Österreich
	[kg/TJ]	[kg/TJ]	[kg/TJ]
2010	113819	157115	58542
2020	92633	142858	47798

Tabelle 6.13: CO<sub>2</sub>-Äquivalente elektrischer Energie der EU, Deutschland und Österreich für die Jahre 2010 und 2020 [97]

#### 6.2.1.4 Wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der thermischen Biogasnutzung mit der Biogasverstromung

Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass bei diesem wirtschaftlichen Vergleich die Investkosten der Anlagen nicht berücksichtigt wurden. Es wurde lediglich die bei dem Betrieb eines Blockheizkraftwerkes und einer Mikrogasturbine entstehenden Erlöse und Aufwände berücksichtigt. Bei der thermischen Biogasverwertung im Drehrohrföfen ist der Substitutionsgewinn des Brennstoffes Heizöl EL angeführt. Es wurden keine Investkosten, Instandhaltungskosten und Wartungskosten der Drehrohrföferung berücksichtigt.

Abbildung 6.1 zeigt die Erlöse der thermischen Verwertung und die Erlöse und Aufwände der Biogasverstromung mittels Blockheizkraftwerk und Mikrogasturbine bei einer Biogasanlagenleistung von 50 m<sup>3</sup>/h des Rohrdorfer Zementwerkes.

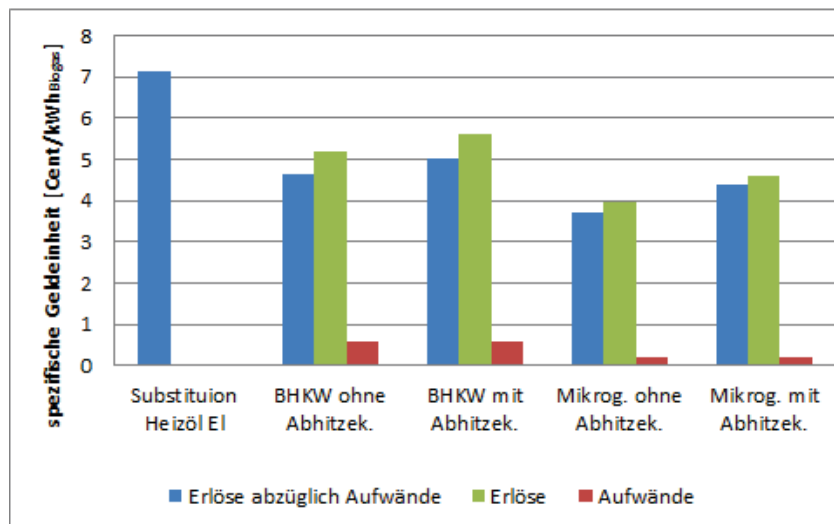


Abbildung 6.1: Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 50 m<sup>3</sup>/h des Rohrdorfer Zementwerkes

Die Heizöl EL Substitution weist mit etwas über 7 Cent die höchsten Erlöse auf. Die Erlöse des Blockheizkraftwerkes liegen aufgrund des besseren Wirkungsgrades deutlich über den Erlösen der Mikrogasturbine. Da die gesamte Abwärme der Mikrogasturbine in das Abgas geht, kann durch eine zusätzliche Verstromung im Abhitzekraftwerk ein sehr hoher zusätzlicher Ge-

## 6 Ermittlung eines Anlagenkonzeptes zur Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage

winn von 0,83 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> erwirtschaftet werden. Dieser Wert fällt bei einer zusätzlichen Verstromung nach dem Blockheizkraftwerk mit 0,51 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> etwas niedriger aus. Allgemein kann man jedoch sagen, dass eine Verstromung des heißen Blockheizkraftwerk- oder Mikrogasturbinenabgasstromes in einem vorhanden Abhitzekraftwerk auf jeden Fall durchgeführt werden soll. Bezogen auf die elektrische Leistung ohne Abhitzekraftwerk liegt die elektrische Leistung mit Abhitzekraftwerk beim Blockheizkraftwerk um 15 % und bei der Mikrogasturbine sogar um 32 % höher.

Betrachtet man Abbildung 6.1 könnte man sagen, dass falls möglich eine Heizölsubstitution gegenüber einer Verstromung bevorzugt werden sollte. Heizöl ist jedoch aufgrund der äußerst diskontinuierlichen Nutzung sehr schwer zu substituieren. Auf diese Problematik wird in Kapitel 6.2.2 näher eingegangen. Aufgrund der schweren Substituierbarkeit von Heizöl wird in Kapitel 6.2.1.5 mittels dynamischer Amortisationsrechnung geprüft, ob der Einsatz eines BHKWs wirtschaftlich rentabel ist.

Abbildung 6.2 zeigt die Erlöse der thermischen Verwertung und die Erlöse und Aufwände der Biogasverstromung mittels Blockheizkraftwerk und Mikrogasturbine bei einer Biogasanlagenleistung von 50 m<sup>3</sup>/h des Gmundner Zementwerkes.

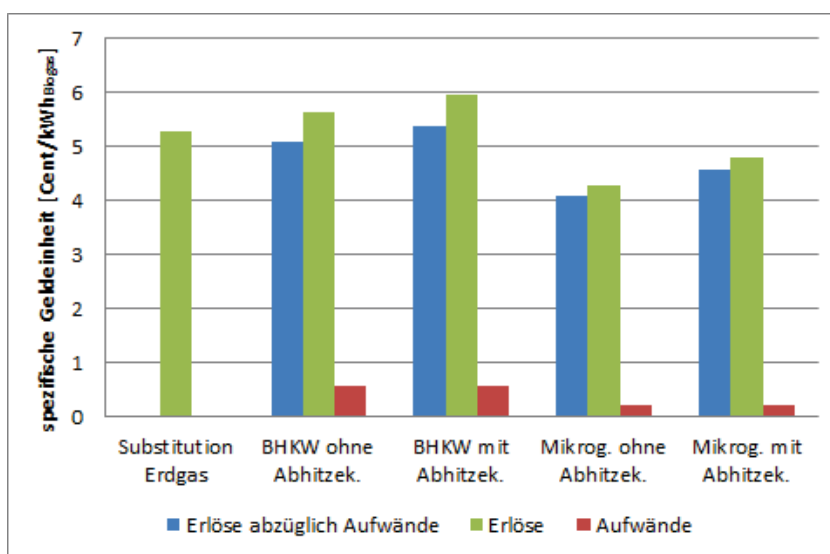


Abbildung 6.2: Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 50 m<sup>3</sup>/h des Gmundner Zementwerkes

Aufgrund der höheren Einspeisevergütung fallen die Erlöse aus dem BHKW und der Mikrogasturbine wesentlich höher aus als beim Rohrdorfer Zementwerk. Die BHKW Erlöse mit Abhitzekraftwerk sind nahezu gleich hoch wie die Erdgassubstitutionserlöse. Alle anderen Formen der Biogasverstromung weisen deutlich niedrigere Erlöse als die Erdgassubstitution auf.

Die oben diskutierten Ergebnisse gelten für sehr kleine Biogasanlagenleistungen. Abbildung 6.3 und Abbildung 6.3 zeigt die Erlöse und Aufwände der Biogasverstromung mittels Blockheiz-

## 6 Ermittlung eines Anlagenkonzeptes zur Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage

kraftwerk und Mikrogasturbine bei einer fast 4 mal höheren Biogasanlagenleistung von 190 m<sup>3</sup>/h des Gmundner und Rohrdorfer Zementwerkes.

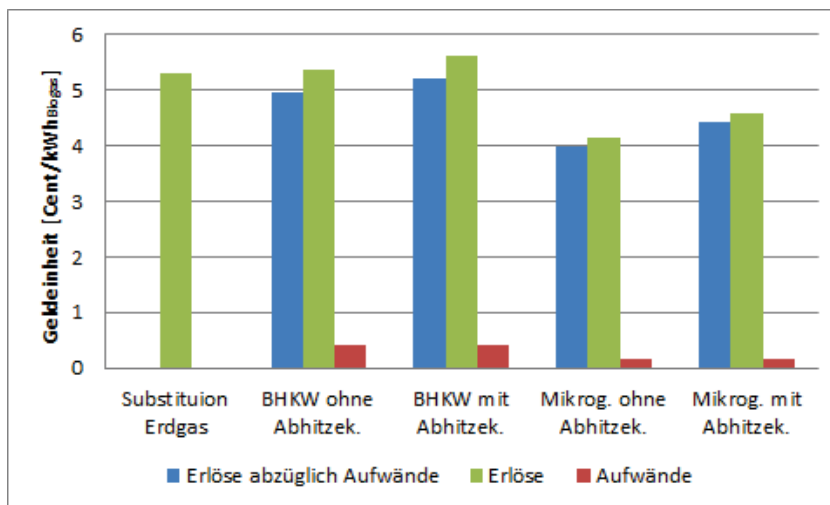


Abbildung 6.3: Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 190 m<sup>3</sup>/h des Gmundner Zementwerkes

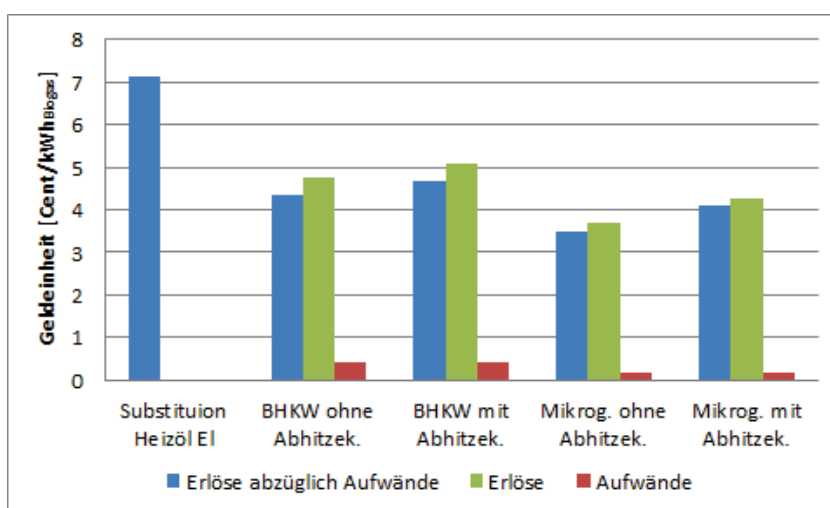


Abbildung 6.4: Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 190 m<sup>3</sup>/h des Rohrdorfer Zementwerkes

Der höhere Wirkungsgrad der Biogasverstromung kann die geringeren Einspeisevergütungen der elektrischen Energie aus Biogas nicht vollständig kompensieren. Die Erträge der Biogasverstromung bei einer Biogasleistung von 190 m<sup>3</sup>/h liegen deshalb leicht unter den Erträgen der Biogasverstromung bei einer Anlagenleistung von 50 m<sup>3</sup> Biogas pro Stunde.

In Abbildung 6.5 wurde nicht der CO<sub>2</sub>-„Rucksack“ der zur Umwandlung des Biogases in nutzbare Energieformen notwendigen Aggregate berücksichtigt. Ebenfalls werden die bei der Erzeugung von Biogas entstehenden Treibhausgase durch Transporte, Leckagen etc. nicht berücksichtigt.

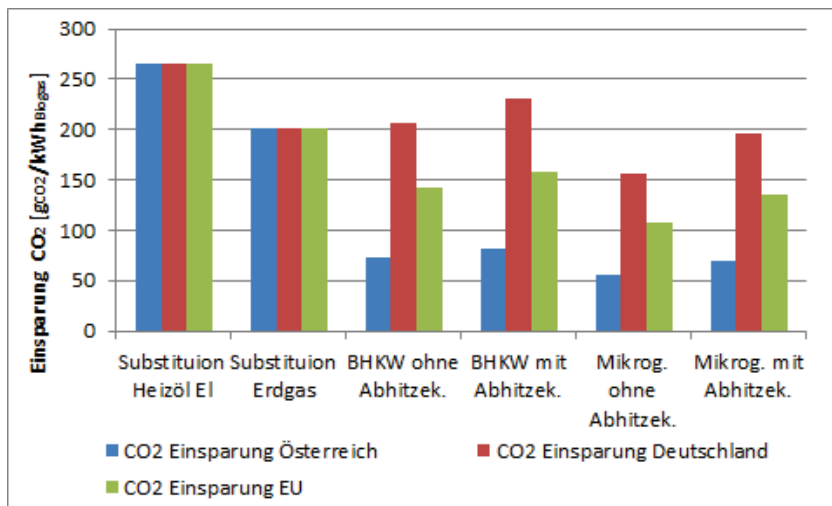


Abbildung 6.5: CO<sub>2</sub>-Einsparung bei Substitution der Brennstoffe Heizöl EL und Erdgas sowie bei der Erzeugung elektrischer Energie , für die EU, Deutschland und Österreich

Aufgrund der in Österreich geringen CO<sub>2</sub>-Belastung der Stromerzeugung fällt die CO<sub>2</sub>-Einsparung bei der Umwandlung von Biogas in elektrische Energie sehr gering aus. Eine Substitution von Heizöl EL oder Erdgas kommt in jedem Fall günstiger. Betrachtet man den Strommix der EU liegt die CO<sub>2</sub>-Einsparung schon etwas höher. In Deutschland fallen sehr hohe CO<sub>2</sub>-Belastungen bei der Energieumwandlung in elektrische Energie an. Die CO<sub>2</sub>-Einsparung der Verstromung liegt deswegen in etwa auf dem Niveau der CO<sub>2</sub>-Einsparung der Erdgas Substitution. Die höchste CO<sub>2</sub>-Einsparung kann durch die Substitution von Braunkohle, Steinkohle und Dachpappe erreicht werden (siehe Tabelle 6.1). Aber auch die Substitution von Heizöl EL weist ein noch hohes Einsparpotential auf.

### 6.2.1.5 dynamische Amortisationsrechnung einer Biogasverstromung

Bei der in diesem Kapitel durchgeführten dynamischen Amortisationsrechnung wird rein die Biogasverstromung betrachtet. Es wird angenommen, dass bei der Produktion einer kWh Biogas, Kosten in Höhe von 4,73 Cent entstehen. Bei diesen Biogasentstehungskosten beträgt der Kapitalwert des Systems Biogasanlage nach Ende der Biogasanlagennutzungsdauer exakt 0 Euro (das System Biogasanlage beinhaltet alle Aggregate und Aufwände zur Erzeugung von Biogas. Nicht inbegriffen ist die Biogasverwertung). Das System Biogasverstromung erhält als Eingangswert Biogas das mit Kosten von 4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> vorbelastet ist. Als Ausgangswert liefert das System elektrische Energie, die im Falle des Blockheizkraftwerkes des Gmunder Zementwerkes ohne Berücksichtigung der Nachverstromung im Abhitzekraftwerk, um 5,65 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> verkauft werden kann. Die 5,65 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> ergeben sich durch die Multiplikation der Einspeisevergütung in Gmunden (14,8 Cent/kWh<sub>el</sub>. [siehe Tabelle 3.2]) multipliziert mit dem elektrischen Wirkungsgrad des BHKWs (38,2 %). Der netto Ertrag ergibt sich nach Abzug der Biogasentstehungskosten und den Wartungs- und Instandhaltungskosten

des BHKWs, etc. von den Biogaserlösen und beträgt in diesem Beispiel 0,36 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>. Anschließend wird geprüft, nach wie vielen Jahren sich das Blockheizkraftwerk bei dem errechneten jährlichen netto Ertrag sowie einem angenommenen Discount Faktor von 8 % amortisiert.

Aufgrund der niedrigen Einspeisevergütungen ist eine Amortisation des BHKWs weder bei einer Biogasleistung von 50 m<sup>3</sup>/h noch bei einer Biogasleistung von 190 m<sup>3</sup>/h möglich. Als vollkommen unwirtschaftlich stellt sich der Betrieb einer Mikrogasturbine heraus. Dies liegt hauptsächlich an dem schlechten elektrischen Wirkungsgrad der Mikrogasturbine.

## 6.2.2 Substitution der Brennstoffe Heizöl EL und Erdgas

### 6.2.2.1 Einführung in die Problemstellung

Die Brennstoffe Heizöl EL (eingesetzt im Rohrdorfer Zementwerk) und Erdgas (eingesetzt im Gmundner Zementwerk) weisen die höchsten Brennstoffkosten je eingebrachter Energieeinheit auf. Je nach Biogaskosten ergibt sich bei Substitution dieser Brennstoffe entweder der niedrigste Verlust oder höchstmögliche Gewinn. Wie bereits angedeutet, ist es sehr schwer diese Brennstoffe zu substituieren, da sie nur diskontinuierlich zum Einsatz kommen (siehe Abbildung 6.6).

Über die Betriebsdatenerfassung wurden im Rohrdorfer und Gmundner Zementwerk die täglichen Mengen der verfeuerten Brennstoffe im Drehrohrofen aufgezeichnet. Aufgrund eines Programmfehlers wurden jedoch die Mengen an benötigten Heizöl EL nur teilweise erfasst. Die monatliche Menge des benötigten Heizöles EL für den Drehrohrofen konnte jedoch über das Controlling ausfindig gemacht werden. Anhand der aufgezeichneten Betriebsstillstände war es möglich, Rückschlüsse auf die benötigte Menge Heizöl EL zum Wiederanfahren des Prozesses zu ziehen. Die über das Controlling erfassten monatlichen Mengen an verbrauchtem Heizöl EL wurden also auf die einzelnen Betriebsstillstände innerhalb des betrachteten Monats aufgeteilt. Der Ofenmeister des Zementwerkes Rohrdorf stellte dafür Anhaltswerte zu den Heizöl EL Verbräuchen nach gewissen Betriebsstillstandszeiten zur Verfügung. Durch diesen Schritt erhält man eine vollständige Tabelle der täglichen Heizöl EL Verbräuche über ein gesamtes Jahr. Mithilfe dieser Daten wurde Abbildung 6.6 erstellt.



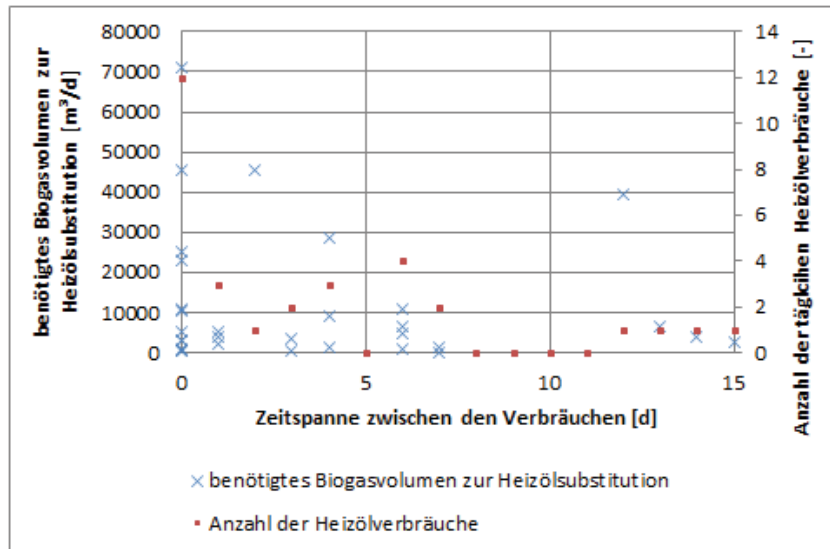


Abbildung 6.6: benötigtes Biogasvolumen (60 % Methananteil) zur Heizöl EL-Substitution aufgetragen über die Zeitspanne zwischen den einzelnen Verbräuchen

Abbildung 6.6 zeigt das pro Tag nötige Biogasvolumen über die Zeitspanne, um den Heizöl EL Verbrauch des Gmundner Zementwerkes vollständig zu substituieren. Unter dem Begriff Zeitspanne werden die Anzahl der Tage zwischen den Heizöl EL Verbräuchen bezeichnet. Eine Zeitspanne von Null Tagen bedeutet demnach, dass auf zwei aufeinanderfolgenden Tagen Heizöl EL verbraucht worden ist. Eine Zeitspanne von einem Tag bedeutet, dass nach einem Tag an dem Heizöl EL verbraucht worden ist am nächsten Tag kein Heizöl EL verbraucht wurde, am übernächsten Tag jedoch wieder ein Heizöl EL Verbrauch statt fand. Auf der Ordinatensachse sind die Anzahl der täglichen Heizöl EL Verbräuche über die Zeitspanne aufgetragen. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass eine vollständige Heizöl EL Substitution sich als schwierig herausstellt, da bei einer Zeitspanne von null Tagen teilweise sehr große Mengen an Biogas benötigt werden. Da die Zeitspanne null Tage beträgt, also am Vortag schon Biogas benötigt worden ist, ist es wahrscheinlich, dass der Biogasspeicher leer gefahren wurde. Die Biogasanlage müsste demnach eine hohe Biogasproduktionskapazität aufweisen um die notwendige Menge bereitstellen zu können. Andererseits liegen auch Zeitspannen von bis zu 80 Tagen vor (in dieser Abbildung nicht mehr dargestellt). Bei einer großen Biogasanlage wären dann die Speicher innerhalb kurzer Zeit voll und das Biogas müsste anderweitig verwertet werden.

Eine möglichst hohe Heizöl EL- und Erdgas-Substitution hängt also primär von der Größe der Biogasanlage und von der Größe der Biogasspeicher ab.

### 6.2.2.2 Überprüfung des Nutzens für das Rohrdorfer Zementwerk

In folgendem Kapitel wird mithilfe einer über das Jahr 2012 eigens durchgeführten Excel-Berechnung, eine Schätzung der möglichen Heizöl EL-Substitution durch Biogas des Rohrdorfer Zementwerkes, bei gegebener Biogasanlagenleistung und gegebenen Biogasspeichervolumen

vorgenommen. Die Berechnung berücksichtigt folgende Verbraucher:

- Biogas als Substitution von Heizöl EL für den Drehrohrofen
- Biogas als Substitution von Heizöl EL für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung
- Biogas als Substitution von Kohle für den Drehrohrofen
- Biogas als Energieträger für die Fermenterheizung
- Fackel zur „Vernichtung“ überschüssiger Biogasenergie

Die Ermittlung der täglichen Heizöl EL-Verbräuche der Drehrohrfeuerung wurden oben schon beschrieben. Die Ermittlung der täglichen Heizöl EL-Verbräuche der Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung erfolgte über die monatliche Aufzeichnung der verbrauchten Mengen. Dabei wurde der monatliche Verbrauch durch die Anzahl der Tage des Monats dividiert. Für jedes Monat ergibt sich ein Durchschnittswert. Jedem Tag des selben Monats wurde dieser monatspezifische Durchschnittswert als täglicher Heizöl EL-Verbrauch zugeordnet.

Der höchstmögliche Gewinn oder geringst mögliche Verlust für das Zementwerk ergibt sich bei der Substitution von Heizöl EL für den Drehrohrofenprozess, da Heizöl EL die höchsten Brennstoffkosten aufweist und bei diesem Prozess die Energiezertifikatskosten mitberücksichtigt werden müssen (siehe Kapitel 2.1.2). Wird die Berechnung mit den momentanen CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten durchgeführt, ergibt sich im Falle der Heizöl EL-Substitution für den Drehrohrofenprozess ein Substitutionsgewinn von 2,42 Cent/kWh (siehe Tabelle 6.1). Bei der Heizöl Substitution für die Gebäudeheizung beträgt der Substitutionsgewinn 2,31 Cent/kWh, während der Substitutionsgewinn der Kohlesubstitution mit -2,43 Cent/kWh negativ ist. Für die Biogasnutzung als Fermenterbeheizung sowie für Fackelverluste müssen die Herstellungskosten des Biogases (4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>) als Verlustwert herangezogen werden.

Aus den oben angeführten Substitutionsgewinnen und Substitutionsverlusten, lässt sich eine gewinnoptimierte Fahrweise des Anlagenverbundes Biogasanlage und Zementwerk ableiten. Die Einbringung von Biogas in den Drehrohrofen, sowie die Nutzung von Biogas zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung muss möglichst forciert werden, während die Substitution von Kohle sowie Fackelverluste vermieden werden sollten. Die Verwendung von Biogas als Energieträger für die Fermenterheizung lässt sich während der Winterrevision und während längeren Betriebsstillständen kaum vermeiden. Während dem „normalen“ Betrieb kann angenommen werden, dass die zur Fermenterheizung nötige Wärme aus dem Abgasstrom des Zementwerkes ausgekoppelt werden kann.

Mithilfe von WENN/DANN Bedingungen prüft das selbst erstellte Programm für jeden einzelnen Tag, ob und wie viel Energie die Verbraucher benötigen, wie viel Energie sich im Gasspeicher der Biogasanlage befindet und wie viel Energie in den Gasspeicher der Biogasanlage noch gespeichert werden kann. Kann die von der Biogasanlage produzierte Energie nicht als Heizöl

EL-Substitution für den Drehrohrofen oder für die Gebäudeheizung verwendet werden, wird diese, um wirtschaftliche Verluste zu vermeiden, im Gasspeicher der Biogasanlage gespeichert. Ist der Gasspeicher voll, muss das von der Biogasanlage produzierte Gas zur Substitution von Kohle verwendet werden. Ist der Gasspeicher voll und befindet sich die Drehrohrofenanlage momentan außer Betrieb, wird das produzierte Biogas über die Fackel verbrannt.

Gasspeicher- volumen	Regelvolumen Gasspeicher	Biogasproduk- tionsrate	Methan- konzentration
[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /h]	[%]
4700	4400	50	60

Tabelle 6.14: Annahmen der Heizölsubstitutionsrechnung

Die Berechnung wurde mit den in Tabelle 6.14 aufgelisteten Annahmen durchgeführt. Diese Annahmen ergeben sich aus der durchgeführten Substratstudie für das Gmundner Zementwerk (siehe Kapitel 4.3.1) und dem sich dadurch ergebenden Biogasanlagenkonzept und der sich ergebenden Biogasanlagengröße. Das Gasspeicher Regelvolumen ist um 300 m<sup>3</sup> kleiner als das Gasspeichervolumen, um bei „fast“ vollem Gasspeicher und einem auftretenden Betriebsstillstand Fackelverluste zu vermeiden. Diese Gasspeicherreserve wurde groß genug dimensioniert um einen 6-stündigen Betriebsstillstand überbrücken zu können.

Die unter den Annahmen der Tabelle 6.14 errechneten Ergebnisse für das Rohrdorfer Zementwerk finden sich in Tabelle 6.15.

Verbraucher	Anteile Biogas	Anteile subst. Energie	Substitutions- gewinne
	[%]	[%]	[€/Jahr]
Heizöl Drehrohr:	19,8	22,2	12.597
Heizöl Raumwärme:	30,8	78,3	18.754
Steinkohle Drehrohr:	40,7	sehr gering	-26.092
Fermenterheizung:	7,7	34,2	-9.536
Fackel:	1,0	n. A.	-1.298
<b>Summe:</b>	<b>100,0</b>		<b>-5.575</b>

Tabelle 6.15: Ergebnisse der Heizölsubstitutionsrechnung bei 4700 m<sup>3</sup> Biogasspeichervolumen und einer Biogasproduktionsrate von 50 m<sup>3</sup>/h

Trotz der zuvor besprochenen schwierigen Heizöl EL Substitutionsbedingungen der Drehofenfeuerung können 22,2 % des Heizöles substituiert werden. Das sind 19,8 % des gesamt produzierten Biogases. Ebenfalls kann ein sehr großer Teil (78 %) der Energie für Raumwärme und Warmwasserbereitung substituiert werden. Obwohl über 50 % des produzierten Biogases zur Substitution von Heizöl EL herangezogen werden, kann kein positiver Substitutionsgewinn erreicht werden. Der Grund dafür liegt in den hohen Kohle-Substitutionsverlusten und den hohen Fermenterheizungsverlusten.

Die Fermenterheizungsverluste sind nur sehr schwer beeinflussbar (bessere Dämmung, andere

Wärmequelle, etc.). Die Kohle-Substitutionsverluste könnten jedoch durch zusätzliche Gasspeicher gesenkt werden. Dafür sind jedoch sehr große Speicherkapazitäten notwendig. Dies lässt sich mit Abbildung 6.7 zeigen.

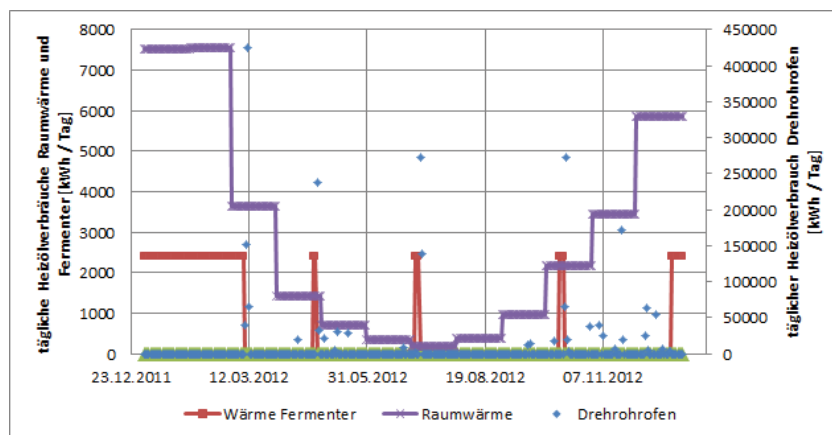


Abbildung 6.7: tägliche Heizölverbräuche Drehrohrofen, Raumheizung und Fermenterheizung über ein Jahr

Das Problem liegt in den Sommermonaten, wo der Heizöl EL-Bedarf der Gebäudeheizung und der Warmwasserbereitung am geringsten ist. Dazu kommt noch, dass in dieser Zeit nur ein größerer Betriebsstillstand auftritt. Es kann also kaum Heizöl EL substituiert und dadurch der Gasspeicher entleert werden. Um diesen Zeitraum zu überbrücken, bräuchte es sehr große Gasspeicher. In Kapitel 6.2.2.3 wird die Auswirkung eines zusätzlichen Gasspeichervolumens auf den Substitutionsgewinn des Rohrdorfer Zementwerkes betrachtet. Sinnvoller wäre es allerdings, zusätzliche Biogasverbraucher mit hohem Wertschöpfungspotential für das Zementwerk zu finden oder zu schaffen.

### 6.2.2.3 Auswirkung eines zusätzlichen Gasspeichervolumens auf den Substitutionsgewinn des Rohrdorfer Zementwerkes

In der Biogasbranche kommen üblicherweise Umgebungsdruckspeicher zum Einsatz. Diese Speicher bestehen aus einem Membransack, die vor äußeren Einflüssen durch eine Schutzhülle z.B. ein Getreidesilo geschützt werden. Steht ein passendes Gebäude zur Verfügung, kann der Membransack auf das Gebäude zugefertigt werden. Dadurch ist die Einsparung der relativ teuren Schutzhülle des Gasspeichers möglich.

Die Kosten eines externen Biogasspeichers wurden durch eine Angebotseinholung bei der Firma NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH und Bergmann ermittelt. In Abbildung 6.8 sind die Substitutionserträge, die zusätzlichen Membrangasspeicherkosten und die zusätzlichen gesamten Gasspeicherkosten (Membrane + Schutzhülle) über das gesamte Biogasspeichervolumen aufgetragen.

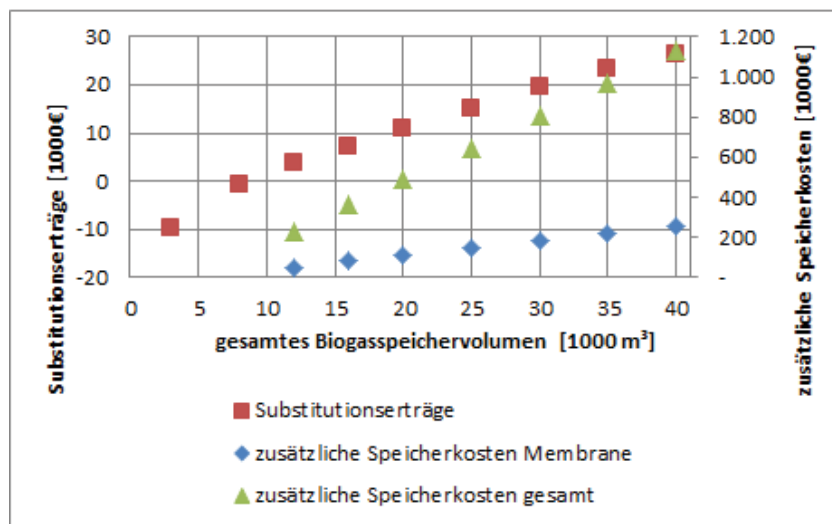


Abbildung 6.8: Substitutionserträge, zusätzliche Membrangasspeicherkosten, zusätzliche gesamte Gasspeicherkosten über das gesamte Biogasspeichervolumen

Abbildung 6.9 zeigt die Anteile der Biogasverbraucher an dem produzierten Biogas über das gesamte Biogasspeichervolumen. Es ist ersichtlich, dass mit einer Erhöhung des Biogasspeichervolumens eine Abnahme der Kohle-Substitution, bei gleichzeitiger Zunahme der Heizöl EL-Substitution für die Drehrohrfeuerung, möglich ist. Dieses Verschieben der Verhältnisse wirkt sich positiv auf die Substitutionserträge aus (siehe Abbildung 6.8). Geht man davon aus, dass die Schutzhülle des Biogasspeichers noch errichtet werden muss, fallen jedoch so hohe Kosten für das zusätzliche Speichervolumen an, dass eine Amortisation durch die zusätzlichen Substitutionserlöse weit über der Lebensdauer des Gasspeichers und der gesamten Biogasanlage liegt. Können bestehende Gebäude für die Unterbringung des Membransackes herangezogen werden, liegt die dynamische Amortisation des Gasspeichers immer noch bei 20 Jahren (angenommener Diskont Faktor = 8 %).

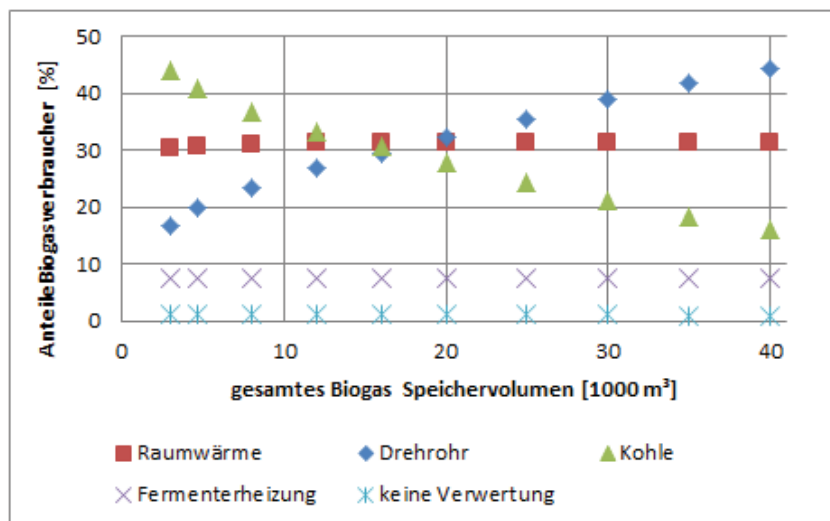


Abbildung 6.9: Anteile der Biogasverbraucher an dem produzierten Biogas über das gesamte Biogasspeichervolumen

#### 6.2.2.4 Überprüfung des Nutzens für das Gmundner Zementwerk

Dieselbe Berechnung mit der in Tabelle 6.14 getroffenen Annahmen wurde für das Zementwerk Gmunden durchgeführt. Hauptsächlich unterscheidet sich diese Berechnung von der zuvor durchgeführten Berechnung durch einen zusätzlichen Biogasverbraucher und anderen Substitutionsgewinnen und Substitutionsverlusten (siehe Tabelle 6.1). Der zusätzliche Biogasverbraucher ist eine Zementmühle in Gmunden, bei der Erdgas während des Mahlprozesses zugeführt wird. Die täglichen Erdgasverbräuche der Drehrohrfeuerung und der Zementmühle konnten direkt aus der Betriebsdatenermittlung des Gmundner Zementwerkes übernommen werden. Die täglichen Erdgasverbräuche der Gebäudeheizung und der Warmwasserbereitung wurden aus Durchschnittswerten ermittelt.

Tabelle 6.16 zeigt das Ergebnis der Berechnung für das Gmundner Zementwerk. Ein wesentlicher Substitutionsvorteil des Zementwerkes Gmunden liegt in dem zusätzlichen Erdgas-Verbraucher. Mit mehr als 60 % des Biogases kann Erdgas substituiert werden, das mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten „belastet“ ist. Aufgrund des zusätzlichen Verbrauchers und des zeitlich günstigen Auftretens des Erdgasbedarfs der Drehrohrfeuerung (siehe Abbildung 6.10) muss nahezu keine Kohle substituiert, sowie kein Biogas über die Fackel vernichtet werden.

Trotz dieser guten Ausgangslage fällt der Substitutionsgewinn für das Gmundner Zementwerk relativ niedrig aus. Der Grund dafür liegt in den niedrigen Erdgas-Substitutionserlösen.

Verbraucher	Anteile Biogas [%]	Anteile subst. Energie [%]	Substitutionsgewinne [€/Jahr]
Erdgas Drehrohr:	26,5	21,0	3.906
Erdgas Mühle:	36,6	40,9	5.400
Erdgas Raumwärme:	28,2	52,4	3.569
Braunkohle Drehrohr:	1,1	sehr gering	-792
Fermenterheizung:	7,7	34,2	-9.536
Fackel:	0,0	n. A.	0
<b>Summe:</b>	<b>100,0</b>		<b>2.548</b>

Tabelle 6.16: Ergebnisse der Erdgassubstitutionsrechnung bei 4700 m<sup>3</sup> Biogasspeichervolumen und einer Biogasproduktionsrate von 50 m<sup>3</sup>/h

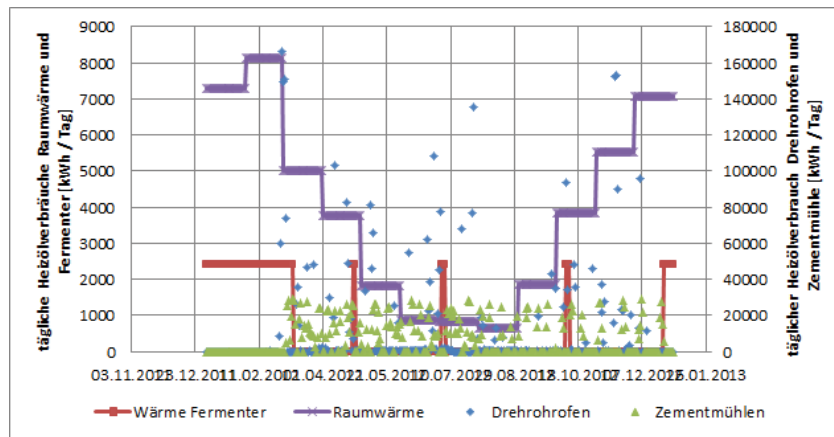


Abbildung 6.10: täglicher Erdgas Verbrauch Drehrohren, Zementmühle, Fermenterheizung, Raumwärme über ein Jahr

### 6.2.3 Substitution der Brennstoffforderluft durch Gas

#### 6.2.3.1 Einführung in die Problemstellung

Wie in Kapitel 2.1.1.4 beschrieben setzt sich die Verbrennungsluft aus Primär- und Sekundärluft zusammen. Der Anteil der Primärluft sollte möglichst niedrig gehalten werden, da eine Vorwärmung der Primärluft praktisch nicht möglich ist. Die Primärluft lässt sich in die Förderluft und die Verbrennungsluft unterteilen. Die Förderluft sollte nicht vorgewärmt werden, um eine Pyrolyse und anschließende Entzündung des gefordernten Brennstoffes zu verhindern. Die Verbrennungsluft sollte ebenfalls nicht vorgewärmt werden, um eine zu starke Erwärmung des Brenners (max. zulässige Brenntemperatur = 400 °C), die zu einer Beeinträchtigung der statischen Festigkeit führen kann, vorzubeugen. [73]

Eine Möglichkeit den Anteil der Primärluft zu reduzieren, könnte in dem Einsatz von Gas als Fördermedium liegen. Die folgenden Unterkapitel beziehen sich konkret auf Überlegungen zur Substitution der Kohleförderluft. Dieselben Überlegungen können jedoch auch zur Substitution der Förderluft für BPG-Brennstoffe herangezogen werden. Wirtschaftlich würde dies sinnvoller

sein, da bei dieser Variante auf den Einsatz der relativ kostenintensiven Kohle verzichtet werden könnte. Ein wesentliches Problem bei der BPG-Förderluftsubstitution liegt jedoch bei den höheren notwendigen Biogasmengen verglichen mit der Kohleförderluftsubstitution.

### 6.2.3.2 Überprüfung des Nutzens

Zur Förderung von Kohle wird im Zementwerk Rohrdorf ein konstanter Luftvolumenstrom von  $2300 \text{ m}^3/\text{h}$  benötigt. In der Regel werden 2,5 bis 4,5 Tonnen Kohle pro Stunde gefördert. Maximal könnten 15 Tonnen pro Stunde gefördert werden.

Die Förderluft für Sekundärbrennstoffe liegt bei  $6000 \text{ m}^3/\text{h}$ . [73]

Nimmt man an, dass  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  warme Förderluft mit einem einstufigen Turbokompressor (isentroper Wirkungsgrad = 0,7) von 1 Bar auf 1,5 Bar gebracht werden muss, errechnet sich die Austrittstemperatur der Förderluft mit  $77 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Aufintegration der molaren Wärmekapazität von Luft, zwischen den Grenzen von 350 K bis zu einer angenommenen Sekundärlufttemperatur von 1273 K, multipliziert mit der Molmenge Förderluft, ergibt das theoretisch mögliche Einsparpotential von 856 kW bei einer vollständigen Kohleförderluftsubstitution durch Biogas.

Verglichen mit einer durchschnittlichen Primärfeuerungsleistung von 110 MW erscheint ein mögliches Einsparpotential von nicht ganz einem MW verschwindend gering, da das Einsparpotential nicht einmal 1 % der Primärfeuerungsleistung ausmacht.

Einen aussagekräftigeren Wert erhält man allerdings, wenn man das theoretische Einsparpotential pro eingebrachter Biogasleistung errechnet. Es ergibt sich ein Wert von 0,051 kW Einsparung pro kW eingebrachtes Biogas. Dies bedeutet, dass bei einer Substitution der Förderluft durch Biogas der Heizwert des eingebrachten Biogas-Luftgemisches um 5,1 % höher liegt als bei einer „normalen“ Einbringung des Biogases in den Drehrohrofen. Dadurch sinken die Biogasbrennstoffkosten von 4,7 auf 4,5 Cent/kWh<sub>Biogas</sub>.

Bei der Substitution der Kohleförderluft ist jedoch die durch das Biogas sehr große eingebrachte thermische Leistung von 16,7 MW zu berücksichtigen. Nimmt man an, dass mit dem Biogas noch 3,3 Tonnen Kohle pro Stunde eingeblasen werden beträgt die gesamte thermische Leistung dieser Betriebskonfiguration 43,3 MW. Dies ist ein Anteil von 39 % an der Primärfeuerung.

### 6.2.3.3 Überprüfung der Durchführbarkeit

Die Kohle wird in einem Ringspalt durch den Brenner in den Ofen gefördert. Der Ringspalt selbst ist momentan noch nicht vollständig gasdicht, könnte jedoch mit einem vernachlässigbar geringen Kostenaufwand abgedichtet werden. Das Hauptproblem liegt in der gasdichten Ausführung der Schnecke, die den Kohlestaub in den Luft- oder Gasvolumenstrom einbringt. Ein Umbau dieser Vorrichtung wäre notwendig, um bei einem Betrieb der Anlage mit Gas, die gesetzlichen Anforderungen und die notwendige Arbeitssicherheit zu gewährleisten. Dies wäre



jedoch mit erheblichen Kosten verbunden. [73]

Befindet sich der Drehrohrofen in Betrieb, wird der Primärbrenner kontinuierlich mit Kohle beschickt. Somit wäre eine kontinuierliche Substitution der Kohleförderluft durch Biogas aufgrund des kontinuierlichen Kohleeintrags in den Ofen problemlos möglich.

Eine kontinuierliche Substitution der Kohleförderluft wird allerdings an der nötigen Biogasmenge scheitern. Um 2300 m<sup>3</sup>/h Förderluft bei Förderdruck zu ersetzen, benötigt man 2300 m<sup>3</sup>/h Biogas bei Förderdruck. Die Produktion einer solchen Biogasmenge ist zwar nicht unmöglich, für den betrachteten Standort und unter den gegebenen Randbedingungen jedoch unrealistisch (siehe Kapitel 5). Es könnte jedoch eine diskontinuierliche Substitution der Förderluft durch Biogas unter Nutzung eines Biogasspeichers ermöglicht werden. Die Wahl der Fermenterbauart, der Fermentergröße und der Betriebsdauer der Förderluftsubstitution entscheidet, ob ein externer Speicher zur Realisierung dieses Anlagenkonzeptes benötigt wird.

## 6.2.4 Biomethan für den Kraftfahrzeugpark

### 6.2.4.1 Einführung in die Problemstellung

Die Steinbruchfahrzeuge der Steinbrüche Gmunden und Ebensee des Zementwerkes Gmunden verbrauchen jedes Jahr in etwa 770.000 Liter Diesel [38]. Allgemein kann man sagen, dass der Energiebedarf der Steinbruchfahrzeuge eines Zementwerkes hoch und der üblicherweise eingesetzte Energieträger (Diesel) teuer ist. Dies sind gute Voraussetzungen zur Substitution des momentan eingesetzten Treibstoffes mit Biomethan oder Erdgas und könnte eine Chance für das Zementwerk sein, ökologische Vorteile mit ökonomischen Vorteilen zu verbinden. Ebenfalls für den Einsatz von Biomethan in Steinbruchfahrzeugen spricht die hochwertige Energienutzung. Während bei der thermischen Biogasnutzung lediglich Wärme erzeugt wird, wird beim Einsatz von Biomethan als Kraftstoff mechanische Energie bereitgestellt.

### 6.2.4.2 Durchführung der Berechnungen

Tabelle 6.17 zeigt die getroffenen wirtschaftlichen Annahmen der durchgeführten Berechnung.

Herstellungskosten Biogas	Einkaufspreis Erdgas	Einkaufspreis Diesel	Aufbereitungsk. Biomethan	Kosten CNG Tankstelle
[Cent/kWh <sub>Biogas</sub> ]	[Cent/kWh <sub>Erdgas</sub> ]	[Cent/kWh <sub>Diesel</sub> ]	[Cent / kWh <sub>Biog./Erdg.</sub> ]	[Cent / kWh <sub>Biog./Erdg.</sub> ]
4,73	5,29	10,60	1,67	1,15

Tabelle 6.17: Wirtschaftliche Annahmen der Berechnung „Biomethan für den Kraftfahrzeugpark“

Der Erdgas- sowie der Dieseleinkaufspreis wurden für das Zementwerk Gmunden angefragt. Die Aufbereitungskosten für Biomethan wurden nach [90] entnommen und gelten für eine Druckwasserwäsche von 250 Nm<sup>3</sup>/h Rohbiogas. Dies ist mehr als die fünffache Menge der in Kapitel

5.1 vermuteten, realistisch erzeugbaren Menge. Da jedoch keine Werte zu kleineren Biogasaufbereitungsanlagen auffindbar waren, wird dieser Wert für die Berechnung herangezogen.

Die Kosten einer CNG-Tankstelle wurden ebenfalls nach [90] entnommen. Diese Tankstelle ist für eine Menge von 140 Nm<sup>3</sup>/h und einer Gasmenge von 560.000 Nm<sup>3</sup>/Jahr ausgelegt. Die jährliche Gasmenge der Tankstelle entspricht der zweifachen Gasmenge, die für diese Berechnung zur Betankung gewisser Steinbruchfahrzeuge angenommen wurde. Trotzdem wurden die in [90] angegebenen spezifischen Kosten der CNG Tankstelle mit dem Faktor 1,5 multipliziert, um hier eine höhere Kalkulationssicherheit zu erhalten. Hauptsächlich wurde dies durchgeführt, da es sich bei dieser Tankstelle um eine Erdgasautotankstelle handelt (eine Tankstelle für Steinbruchfahrzeuge könnte höhere Gasbefüllungsleistungen erbringen müssen, was sich negativ auf die Investkosten des Erdgasdruckspeichertanks sowie der Erdgaskompressoren auswirken kann).

Der Wirkungsgrad der Diesel- und Erdgasmotoren wurde jeweils mit 40 % angenommen. Ein gleich hoher Erdgasmotorwirkungsgrad wie Dieselmotorwirkungsgrad ist bei den momentanen technischen Entwicklungen in diesem Bereich realistisch (siehe Kapitel 3.5.2.2).

Momentan müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Steinbruchfahrzeuge nicht berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.1.2). Der Vollständigkeit halber wird jedoch die Berechnung ohne Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Emissionen um eine Berechnung mit Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einem CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis von 4,15 Euro/tCO<sub>2</sub> und 25 Euro/tCO<sub>2</sub> ergänzt.

Alle Erträge und Aufwände wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf die Einheit Cent/kWh<sub>mech.</sub> umgerechnet.

#### 6.2.4.3 Ergebnisse der Kraftstoffsubstitution

Tabelle 6.18 zeigt die für die Kraftstoffsubstitution angedachten Steinbruchfahrzeuge des Zementwerkes Rohrdorf. Eine weitere Berechnung mit den Steinbruchfahrzeugen des Zementwerkes Gmunden wurde nicht durchgeführt. Es wird angenommen, dass die Gmundner Steinbruchfahrzeuge einen ähnlichen Kraftstoffverbrauch wie die Rohrdorfer Steinbruchfahrzeuge aufweisen.

Fahrzeugname	Fahrzeugtyp	Kraftstoff-	Substitutions-	Substitutions-
		verbrauch	gewinn Biogas	gewinn Erdgas
		[kWh/Jahr]	[€/Jahr]	[€/Jahr]
Komatsu WA 800-3	Radlader	1.066.537	32.451	44.254
CAT D10N	Raupe	625.649	19.037	25.960
CAT 777 D	SKW	521.245	15.860	21.628
Michigan L 480	SKW	408.844	12.440	16.964

Tabelle 6.18: Steinbruchfahrzeuge des Zementwerkes Rohrdorf, deren jährlicher Kraftstoffverbrauch und deren jährlicher Kraftstoffsubstitutionsgewinn

In Tabelle 6.18 sind die Steinbruchfahrzeuge aufgelistet, die den größten jährlichen Kraftstoffverbrauch aufweisen, also bei denen sich eine Umrüstung auf Erdgas- oder Biomethan am schnell-

ten amortisieren würde. Von den jährlichen Substitutionserträgen müssen noch die Kosten für die Fahrzeugumrüstung abgezogen werden. Alle anderen Kosten wurden bereits abgezogen. Zu beachten ist jedoch, dass mit sehr niedrigen Biogaserzeugungskosten von 4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> gerechnet wurde. Die Summe des jährlich eingesparten Dieselkraftstoffes der in Tabelle 6.18 angeführten Fahrzeuge, entspricht in etwa der Energiemenge, die eine Biogasanlage mit einer Biogasleistung von 50 Nm<sup>3</sup>/h in einem Jahr produziert.

Tabelle 6.19 zeigt die gesamten jährlichen Substitutionserträge der vier umgerüsteten Fahrzeuge bei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreiskosten. Wird Diesel mit Erdgas substituiert, fallen die jährlichen Substitutionserträge mit steigendem CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis geringfügig höher (aufgrund des geringeren CO<sub>2</sub>-Einsparungspotentials) aus. Bei der Substitution von Diesel mit Biomethan steigen die Substitutionserträge mit steigendem CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis deutlich schneller an. Jedoch sind die Substitutionserträge selbst, aufgrund der teuren Biogasaufbereitung zu Biomethan, geringer.

	CO <sub>2</sub> Zertifikatspreis [€/Tonne]	Differenzkosten zu Diesel [Cent/kWh <sub>mech</sub> ]	ges. jährliche Erträge [€/Jahr]
Biomethan	0,00	7,6	79.788
	4,15	7,9	82.723
	25,00	9,3	97.472
Erdgas	0,00	10,4	108.808
	4,15	10,4	109.549
	25,00	10,8	113.276

Tabelle 6.19: gesamte jährliche Substitutionserträge beim Einsatz von Biomethan und Erdgas bei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreiskosten

### 6.2.5 Trocknung und thermische Verwertung der Gärreste

Die Idee einer thermischen Verwertung der getrockneten Gärreste ist naheliegend, da in einem weiteren Prozessschritt zusätzliche Energie für den Drehrohrofenprozess zur Verfügung gestellt und gleichzeitig eine Entsorgung der Gärreste durchgeführt werden kann. Durch eine Separation der Trockensubstanz von der Flüssigkeit der Gärreste, wird das Volumen der auf landwirtschaftliche Flächen auszubringenden Gärreste verringert. Ebenfalls lässt sich eine Trocknung der festen Gärrestphase gut mit einer Strippung der flüssigen Gärrestphase kombinieren. Eine konventionelle Strippung wird jedoch nicht betrachtet, da die jährlich anfallenden Gärrestmengen zu gering sind, um eine Gärreststrippung wirtschaftlich durchführen zu können [12].

Von Seiten des Zementwerkes wurde eine Gärresttrocknung mit einer Membranfilterpresse angedacht. Um Erkenntnisse für die Auslegung und den Betrieb einer industriellen Anlage zu gewinnen, wurden Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche mit einer Membranfilterpresse durchgeführt. Eine Literaturstudie zu Filterpressen sowie die Versuchsdurchführung und die

Versuchsauswertung der durchgeführten Membranfilterpressenversuche findet sich in Kapitel 7. Ebenfalls wird in Kapitel 7 die Wirtschaftlichkeit der Trocknung mittels Membranfilterpressen betrachtet.

### 6.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ein Hauptproblem des Biogaseinsatzes liegt in den niedrigen Brennstoffkosten der anderen eingesetzten Brennstoffe. Selbst bei sehr niedrigen Biogaskosten von 4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> können nur Heizöl EL und Erdgas wirtschaftlich substituiert werden. Die Substitution dieser Brennstoffe ist aufgrund deren diskontinuierlicher Nutzung jedoch nur schwer möglich und im Falle des Zementwerkes Rohrdorf mit negativen Kohlesubstitutionserlösen verbunden. Durch den Einsatz eines zusätzlichen Gasspeichers, können zwar die negativen Kohlesubstitutionserlöse reduziert werden, eine Amortisation der sich ergebenden zusätzlichen Kosten wird allerdings nicht erreicht. Im Falle des Zementwerkes Gmunden fällt der jährliche Substitutionsgewinn trotz hohem Erdgassubstitutionsanteil sehr niedrig aus, da die Differenzkosten zwischen Erdgas und Biogas zu gering sind.

Bei vollem Gasspeicher aber nicht vorhandenem Erdgas- und Heizöl EL-Bedarf, müssen andere Brennstoffe substituiert werden. Durch eine Substitution der Brennstoffförderluft durch Biogas, könnte die Einbringung kalter Primärluft in den Ofen reduziert werden. Die sich dadurch ergebenden niedrigen Biogaskosten aufgrund des höheren Heizwertes des Biogas-Luftgemisches sind allerdings zu gering, um mit Brennstoffen wie Kohle konkurrieren zu können. Ebenfalls stellt die hohe benötigte Biogasproduktionskapazität ein Problem dar.

Auch eine Biogasverstromung stellt sich als nicht wirtschaftlich heraus. Bei Biogaskosten von 4,73 Cent/kWh<sub>Biogas</sub> sind die Einspeiserlöse des EEG 2012 und der Ökostromverordnung zu niedrig, um die Kosten eines BHKWs über die Nutzungsdauer abbezahlen zu können. Eine Chance für das Zementwerk könnte jedoch die Direktvermarktung darstellen, da bei dieser Erlöse über der Einspeisevergütung des EEG erwirtschaftet werden könnten. Ein Vorteil der Zementindustrie könnte bei der Direktvermarktung in einer zusätzlichen Nutzung des Biogases zur Substitution von teuren Brennstoffen wie Heizöl EL liegen. Durch den zusätzlichen thermischen Biogasverbraucher ist es möglich, das BHKW und den Gasspeicher, die bei direkt vermarktenden Biogasanlagen üblicherweise stark überdimensioniert werden müssen, kleiner zu halten. Das EEG 2012 erlaubt einen monatlichen Wechsel zwischen dem „normalen“ Vergütungssystem und der Direktvermarktung. Dadurch könnte während der Winterrevision das BHKW bei einer fixen Einspeisevergütung durchgehend betrieben werden (nur notwendig wenn die Gasspeicher der Biogasanlage zu klein ausgelegt sind, um eine Direktvermarktung in diesem Zeitraum sinnvoll durchführen zu können). Eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Direktvermarktung in Kombination mit einem Zementwerk wurde jedoch nicht durchgeführt, da dies aufgrund der veränderlichen Strompreise an der Börse nur sehr schwer möglich ist.

## *6 Ermittlung eines Anlagenkonzeptes zur Kopplung eines Zementwerkes mit einer Biogasanlage*

Eine Chance für die Zementwerke könnte der Einsatz von Biomethan oder Erdgas für den Kraftfahrzeugpark sein. Aufgrund der großen Brennstoffkostendifferenz zwischen Diesel und Erdgas oder Biomethan und aufgrund der benötigten Brennstoffmengen der eingesetzten Steinbruchfahrzeuge, lassen sich hohe jährliche Substitutionserlöse je Steinbruchfahrzeug erzielen. Das Gmundner Zementwerk verfügt über einen Erdgasanschluss und könnte aufgrund dessen eine Umsetzung solch eines Projektes mit geringem Aufwand durchführen. Das Rohrdorfer Zementwerk wäre jedoch auf den Betrieb einer Biogasanlage angewiesen. Aufgrund der geringen Substratmengen ist wahrscheinlich der Betrieb einer Biogasaufbereitungsanlage zu Biomethan im Gmundner und Rohrdorfer Zementwerk wirtschaftlich nicht sinnvoll.

# 7 Klär- und Bioschlamm Trocknungsversuche

Ziel dieser Versuche ist es, Erfahrung auf dem Gebiet der Klärschlamm Trocknung und der Bioschlamm Trocknung zu sammeln, um Erkenntnisse für die Auslegung und den Betrieb einer industriellen Anlage zu gewinnen, sowie Rückschlüsse auf die Gärrest Trocknung ziehen zu können. In den folgenden Kapiteln wird auf den Stand der Technik der Filterpressen sowie die mit einer Membranfilterpresse selbst durchgeführten Klär- und Bioschlamm Trocknungsversuche eingegangen. Anschließend wird die Trocknung mit einer Membranfilterpresse hinsichtlich wirtschaftlicher Kriterien beleuchtet und mit einer Bandtrocknungsanlage verglichen.

## 7.1 Stand der Technik der Filterpressen

Filterpressen werden zur Filtration von chemischen Produkten, von mineralischen und anorganischen Produkten z.B. in der Nahrungsmittelindustrie oder in der Abwasserbehandlung etc. eingesetzt.

Im folgendem Kapitel wird allgemein auf die wesentlichsten Merkmale und Prozesse von Filterpressen eingegangen. Anschließend wird das Dehydri-Verfahren, das bei den selbst durchgeführten Versuchen angewendet wurde, näher beschrieben.

### 7.1.1 Aufbau und Prozessablauf einer Filterpresse

Grundsätzlich wird beim Aufbau von Filterpressen zwischen Kammerfilterpressen und Membranfilterpressen unterschieden.

Die Druckräume einer Kammerfilterpresse werden durch hintereinander angeordnete Kammerplatten gebildet. Diese Kammerplatten sind mit Filtertüchern bespannt und über Bohrungen miteinander verbunden. Über Pumpen wird das zu filtrierende Medium in die Druckräume gefördert. Die Flüssigkeit strömt durch die Filtertücher und verlässt die Filterpresse über den Filtratablauf, während sich der Feststoff auf diesen absetzt. Es wachsen so zwei Filterkuchenhälften in jeder einzelnen Kammer allmählich zusammen, bis der Filterkuchen die gesamte Kammer ausfüllt. Anschließend wird die Kammer geöffnet, um den Filterkuchen austragen zu können. [86]

Abbildung 7.1 zeigt qualitativ den Verlauf des Filtrationsdruckes, den Produkt- und Filtratdursatz und die in den Druckkammern eingefüllte Menge über die Zeit in einer Kammerfilterpresse.

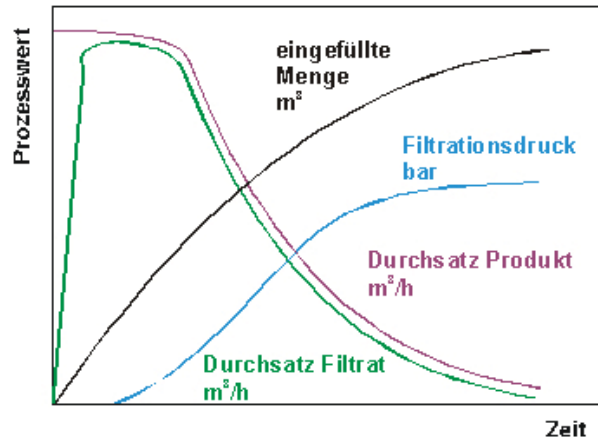


Abbildung 7.1: Qualitativer Verlauf des Filtrationsdruckes, des Produkt- und Filtratdurchsatzes und die in die Druckkammer eingefüllte Menge über die Zeit der Kammerfilterpresse [86]

Wie in dieser Abbildung dargestellt, befindet sich zu Beginn der Befüllung, die Druckkammer der Kammerfilterpresse in einem nahezu drucklosen Zustand. Sobald die Kammer zur Gänze gefüllt ist, steigt der Druck progressiv an (Erhöhung des Durchströmungswiderstandes aufgrund zunehmender Filterkuchendicke) bis die Pumpe abriegelt oder ihre Leistungsgrenze erreicht.

Der Produktdurchsatz entspricht zu Beginn der maximalen Pumpenförderleistung, aufgrund der drucklosen Befüllung der Druckkammer. Im weiteren Prozessverlauf nimmt der Produktdurchsatz degressiv ab.

Zu Beginn der Druckkammer Befüllung ergibt sich aufgrund des hydrostatischen Druckes ein Filtratdurchsatz, der mit steigendem Befüllungsgrad der Druckkammer linear ansteigt und bei vollständig befüllter Druckkammer ein Maximum erreicht. Anschließend weist der Filtratdurchsatz einen ähnlichen Verlauf wie der Produktdurchsatz auf, mit dem Unterschied, dass der Filtratdurchsatz etwas geringer als der Produktdurchsatz ist (Feststoffpartikel werden durch die Filtration zurückgehalten).

Die eingefüllte Menge ist entsprechend dem Verlauf des Produktdurchsatzes degressiv abnehmend. [86]

Eine Filterpresse ist ein geschlossener, uneinsehbarer Druckbehälter. Ein Befüllungsende der Filterpresse ist demnach nicht visuell ersichtlich. Für den Betreiber einer Filterpresse stellt sich die Frage, wann der Befüllungsvorgang der Filterpresse zu Ende ist. Tabelle 7.1 gibt einen allgemeinen Überblick über die verwertbaren Messgrößen und ihrer Aussagekraft bezüglich des Befüllungsendes einer Filterpresse.

## 7 Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche

Prozessgröße	Aussagekraft hinsichtlich Feststoffmenge in der Presse
Vorgegebene Füllzeit abgelaufen:	Sehr gering: da Schlamm-eigenschaften, Tuchverstopfung etc. nicht berücksichtigt werden
Max. Vorgabewert für Fülldruck erreicht:	Mittel: da Tuchverstopfung oder schlechte Filtrierbarkeit gefüllte Presse vortäuschen kann
Min. Vorgabewert für Schlamm- oder Filtratdursatz unterschritten:	Mittel: da Tuchverstopfung oder schlechte Filtrierbarkeit gefüllte Presse vortäuschen kann
Vorgegebene Schlammmenge erreicht:	Mittel: da Feststoffgehalt des Schlammes nicht immer zwingend konstant sein muss
Vorgegebene Feststoffmenge eingefüllt:	Hoch: wird nur verfälscht wenn Feststoff mit dem Filtrat ausgetragen wird

Tabelle 7.1: Messgrößen und Aussagekraft bezüglich des Befüllungsendes einer Filterpresse [86]

Membranfilterpressen sind ähnlich aufgebaut wie Kammerfilterpressen mit dem Unterschied, dass jede zweite Platte aus einer elastischen Pressmembrane besteht (siehe Abbildung 7.2). Der Prozessablauf der Membranfilterpresse ist zweistufig. In der ersten Stufe werden, wie bei der Kammerfilterpresse, die Druckräume über die Befüllungspumpen mit dem zu filtrierenden Medium gefüllt. Die Befüllung erfolgt aber meist nicht vollständig (bis etwa 75 %). In der zweiten Phase wird mithilfe eines Pressmediums (z.B. Wasser) Druck über eine Pressmembrane auf den Filterkuchen ausgeübt. [86]

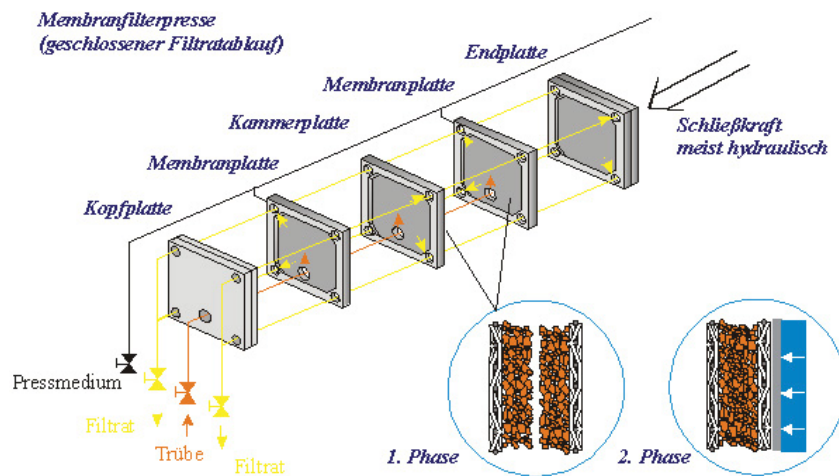


Abbildung 7.2: Aufbau und Prinzip einer Membranfilterpresse [86]

Abbildung 7.3 zeigt qualitativ den Verlauf des Filtrationsdruckes, den Produkt- und Filtratdursatz, den Pressdruck und die in den Druckkammern eingefüllte Menge über die Zeit in einer Membranfilterpresse.



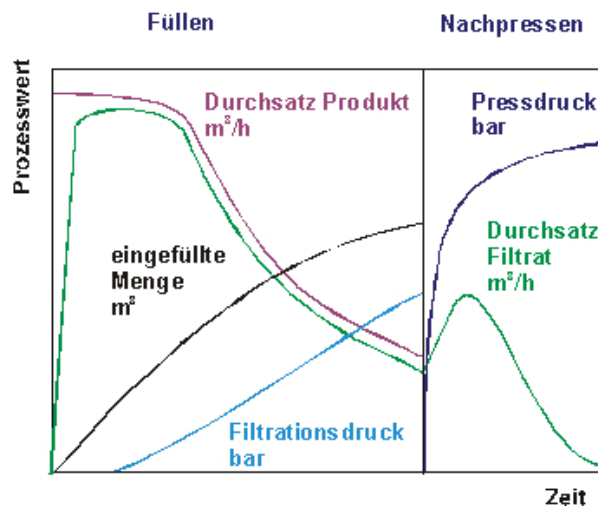


Abbildung 7.3: Qualitativer Verlauf des Filtrationsdruckes, des Produkt- und Filtratdurchsatzes, des Pressdruckes und die in die Druckkammer eingefüllte Menge über die Zeit in einer Membranfilterpresse [86]

Ein wesentlicher Vorteil der Membranfilterpresse ist das vorzeitige Beenden des ineffektiven Endes des Filtrationsvorganges durch die Einleitung der Nachpressphase (siehe Abbildung 7.3. [86] Der in Abbildung 7.3 dargestellte Verlauf des Pressdruckes ist nicht korrekt dargestellt, da dieser zu Beginn der Nachpressphase den Wert des Filtrationsdruckes aufweisen müsste.

Ebenso wie bei der Befüllung stellt sich die Frage, wann der Pressvorgang mit einer Membranfilterpresse zu Ende ist. Tabelle 7.2 gibt einen allgemeinen Überblick über die verwertbaren Messgrößen bezüglich des Pressendes einer Membranfilterpresse.

Prozessgröße	Beschreibung
Presswasserdurchsatz = 0:	Ist der Kuchen vollständig ausgepresst muss die Presswasserpumpe ohne Förderleistung den eingestellten Druck halten. Überwachung dieser Prozessgröße hilft auch defekte Membrane zu erkennen.
Filtratmenge = 0:	Ist der Kuchen vollständig ausgepresst sinkt die Filtratmenge auf 0. Überwachung dieser Prozessgröße hilft auch defekte Membrane zu erkennen.
Druckdifferenz Presswasser zu Suspensionszulauf ist größer als 0:	Zu Beginn der Filtration liegt der Pressdruck an der flüssigen Suspension an. Gegen Ende der Filtration nimmt das Feststoffgerüst des Filterkuchens den Pressdruck auf, worauf die Flüssigkeit im Filterkuchen selbst und in der Kernbohrung drucklos wird.

Tabelle 7.2: Verwertbare Messgrößen bezüglich des Pressendes einer Membranfilterpresse [86]

### 7.1.2 Das DEHYDRY - Verfahren

Das DEHYDRY - Verfahren ist ein Trocknungsverfahren der dm-Dehydrat AG das in der chemischen Industrie (Farbstoffe, Feinchemikalien, etc.) und der Abfallbeseitigung (Papier- und

Zellstoffabwässer, Kühlturmschlämme, etc.) eingesetzt wird [108]. Das DEHYDRY - Verfahren gehört zu der Verfahrensgruppe der diskontinuierlichen Vakuum-Übertemperatur-Ruhigschicht-Kontakt-Trocknung [87]. Das Verfahren schließt an der in Kapitel 7.1.1 beschriebenen zweiten Prozessphase der Membranfilterpresse an. Schon während der ersten oder zweiten Prozessphase ist eine Beheizung der Druckkammer über eine Heizplatte und/oder über das Pressmedium möglich (man spricht dann von einer warmen Membranpressung). Eine warme Membranpressung birgt den Vorteil der Viskositätsniedrigung der Flüssigkeit. Dadurch können höhere TS Gehalte nach der zweiten Phase erreicht werden. [87] [86] Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die Einsparung von Zeit. Wenn schon während der zweiten Phase das Trocknungsgut auf Übertemperatur gebracht wurde, kann nach Beendigung der zweiten Phase sofort mit der dritten Phase - dem DEHYDRY-Verfahren begonnen werden.

Die in Abbildung 7.4 dargestellten Messergebnisse zeigen einen für das DEHYDRY-Verfahren typischen Trocknungsverlauf.

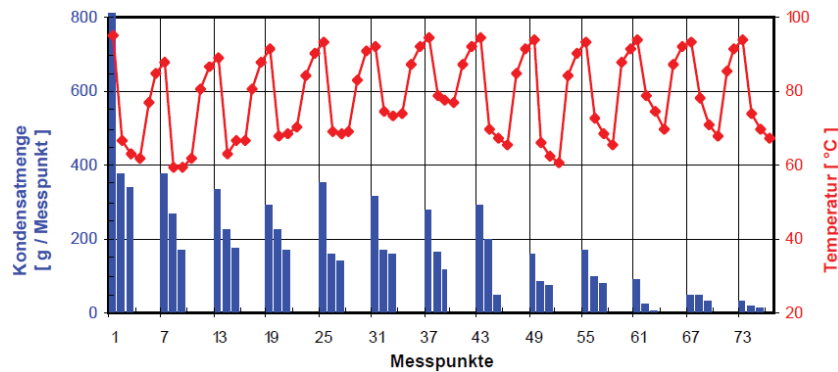


Abbildung 7.4: DEHYDRY - Kondensatanfall und Temperaturverlauf [87]

Befindet sich das durch die Membranpressung mechanisch vorentwässerte Trocknungsgut auf Übertemperatur, wird in der dritten Prozessphase von der Filterseite über die Drainage ein Vakuum angelegt. Aufgrund der Absenkung der Siedetemperatur führt dies zu einer spontanen Verdampfung und dem Anfall einer großen Kondensatmenge (siehe Messpunkt 1 der Abbildung 7.4). Da diese spontane Verdampfung sehr schnell erfolgt, stammt die zur Verdampfung notwendige Verdampfungsenergie hauptsächlich aus der inneren Speicherwärme des Trocknungsgutes, weshalb dieses sehr schnell abkühlt. Bei dem nächsten Messpunkt, weist das Trocknungsgut eine deutlich niedrigere Temperatur auf. Auch die anfallende Kondensatmenge ist deutlich geringer. Die zur Verdampfung notwendige Energie stammt nun vorwiegend aus der direkten Wärmeübertragung des Heizmediums an das Trockengut. Über die Drainage werden durch das Vakuum die Brüden abgesaugt. Eine Luftströmung unterstützt den Dampftransport aus dem Trocknungsgut. Die Brüden werden in einem Kondensator kondensiert. Die Trocknungsluft aus dem Kondensator, wird über einen Wärmetauscher geführt, um erneut in die Membranfilterpresse als Luftströmung eingebracht zu werden.

Nach dem dritten Messpunkt wird die Verdampfung unterbrochen, der Heizkreislauf bleibt jedoch in Betrieb und erwärmt das Trocknungsgut wieder auf Übertemperatur (siehe Messpunkt 6). Die restliche Feuchtigkeit verteilt sich nun wieder homogen im gesamten Kuchen. Nachdem die erwünschte Übertemperatur des Trocknungsgutes erreicht wurde, beginnt der Prozess durch das erneute Anlegen eines Vakuums von vorne (siehe Messpunkt 7 bis 13 usw.). [87]

### 7.2 Klär- und Bioschlamm Trocknungsversuche mit einer Membranfilterpresse

Anschließend wird auf die selbst durchgeführten Membranfilterpressenversuche eingegangen. Es wird der Aufbau und die Funktion der verwendeten Membranfilterpresse, sowie die Versuchsdurchführung beschrieben. In der Versuchsauswertung wurden die Ergebnisse und die Erkenntnisse aus den Versuchen festgehalten.

Die Versuche wurden in einem Unterstand für Steinbruchfahrzeuge im Steinbruch Fischbach durchgeführt. Für die Versuche wurde Klärschlamm aus der Kläranlage Chiemsee und Bioschlamm aus der Papierfabrik Mondi in Raubling verwendet.

#### 7.2.1 Die verwendete Membranfilterpresse

Folgendes Kapitel beinhaltet eine Beschreibung des Aufbaus, der Funktion und der Messapparate, der verwendeten Membranfilterpresse. Diese Informationen sollen es dem Leser dieser Arbeit ermöglichen, die durchgeführten Versuche nachvollziehen und bewerten zu können.

##### 7.2.1.1 Aufbau und Funktion der verwendeten Membranfilterpresse

Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6 zeigt die Aggregate der für die Versuche verwendeten Membranfilterpresse, die der tatsächlich verwendeten Membranfilterpresse entsprechen.

In Abbildung 7.5 wird die Membranfilterpresse und die für die Versuchsdurchführung notwendigen Nebenaggregate von vorne dargestellt.

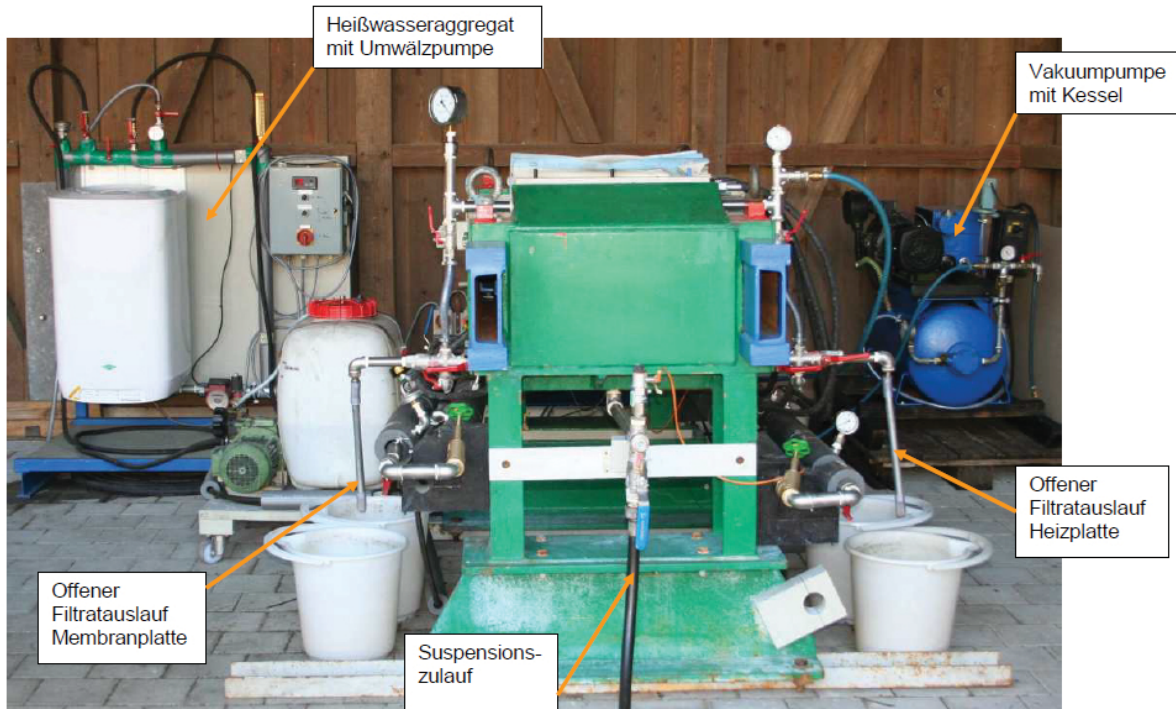


Abbildung 7.5: Aggregate der verwendeten Membranfilterpresse; Vorderansicht [88]

In der Mitte der Abbildung erkennt man den Suspensionszulauf der Membranfilterpresse. Das Ende des Suspensionszulaufes wurde an dem Druckstutzen einer Membranpumpe (nicht in den Abbildungen dargestellt) befestigt. Über diese Membranpumpe wurde der geflockte Klärschlamm oder der Bioschlamm aus einem Schlammvorlagenbehälter (nicht in den Abbildungen dargestellt) in die Druckkammern der Membranfilterpresse gefördert. Schon während der Phase 1 oder der Phase 2 des Filtrationsprozesses ist eine Beheizung der Druckkammern über eine Heizplatte mit Heißwasser aus dem Heißwasseraggregat möglich.

In Abbildung 7.6 wird die verwendete Membranfilterpresse im geschlossenen Zustand von der Seite dargestellt. In der Mitte der Abbildung 7.6 befindet sich der Vorlagebehälter mit der Hochdruckpumpe. Mit dieser Pumpe wird in Phase 2 des Filtrationsprozesses das Pressmedium aus dem Vorlagebehälter in die Membranplatten der Filterpresse gefördert. Die Hochdruckpumpe kann auf einen beliebigen Druck geregelt werden. Das Presswasser im Presswasservorlagenbehälter wurde bei den Versuchen mit einem Tauchsieder erwärmt.

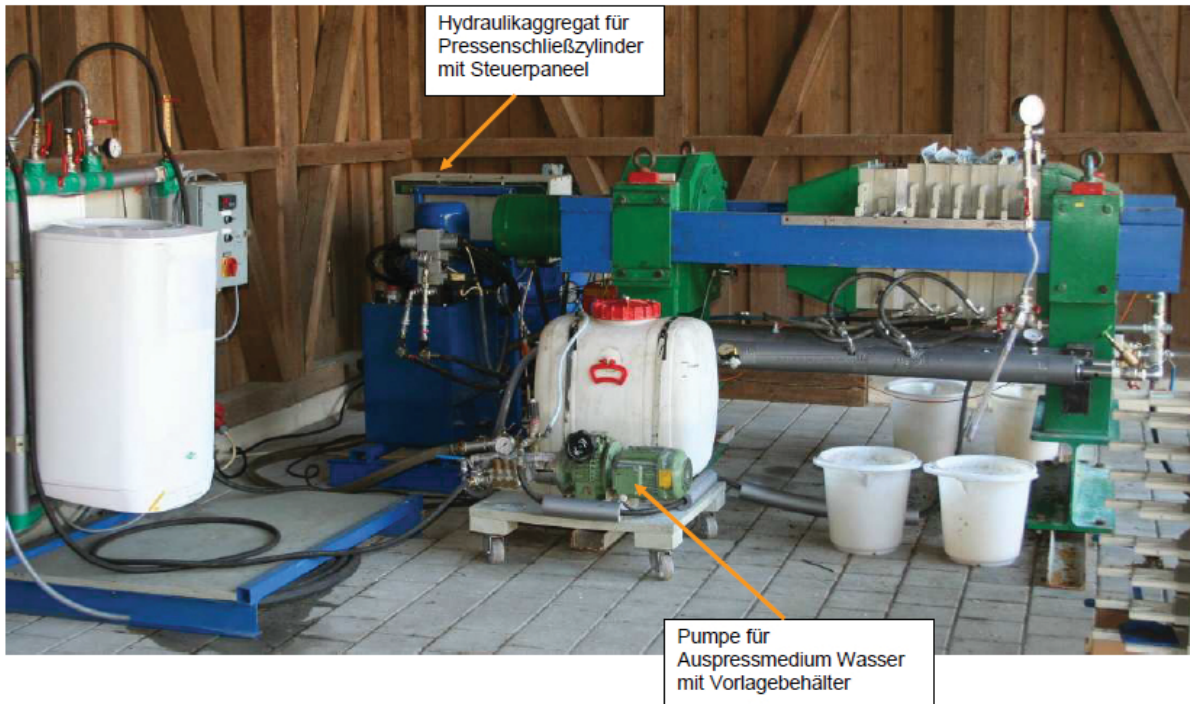


Abbildung 7.6: Aggregate der verwendeten Membranfilterpresse; Seitenansicht [88]

Während der Phase 1 und der Phase 2 tritt Filtrat aus den Filtratausläufen an der Heizplatte und der Membranplatte aus. In der dritten Phase des Filtrationsprozesses wird mit einer Vakuumpumpe an den Druckkammern der Membranfilterpresse ein Unterdruck erzeugt. Um ein möglichst starkes Vakuum zu erhalten, sollten beide Filtratausläufe geschlossen werden. Ebenfalls sollte das Absperrventil des Presswasserkreislaufes leicht geöffnet werden, um so einen kontinuierlichen Volumenstrom des vorgewärmten Presswassers durch die Membranplatten zu gewährleisten. Ein zu weites Öffnen des Absperrventiles bewirkt allerdings einen starken Druckabfall in der Druckkammer, da die Hochdruckpumpe dann gegen einen zu geringen Widerstand arbeitet. Das Trocknungsgut schrumpft während dem Trocknungsprozess aufgrund des Flüssigkeitsverlustes kontinuierlich. Um einen gleichbleibend guten Kontakt des Trocknungsgutes mit der Heizplatte und der ebenfalls beheizten Membranplatte sicherzustellen, ist ein Membranplattendruck von mindestens 4 bar während des Trocknungsprozesses in der Phase 3 aufrecht zu erhalten.

Anders als in Kapitel 7.1.2 beschrieben wird bei der verwendeten Membranfilterpresse der Dampftransport aus dem Trocknungsgut nicht durch eine Luftströmung unterstützt.

Abbildung 7.7 zeigt ein Schema der verwendeten Membranfilterpresse, dass die wichtigsten Mess- und Regelinstrumente enthält.

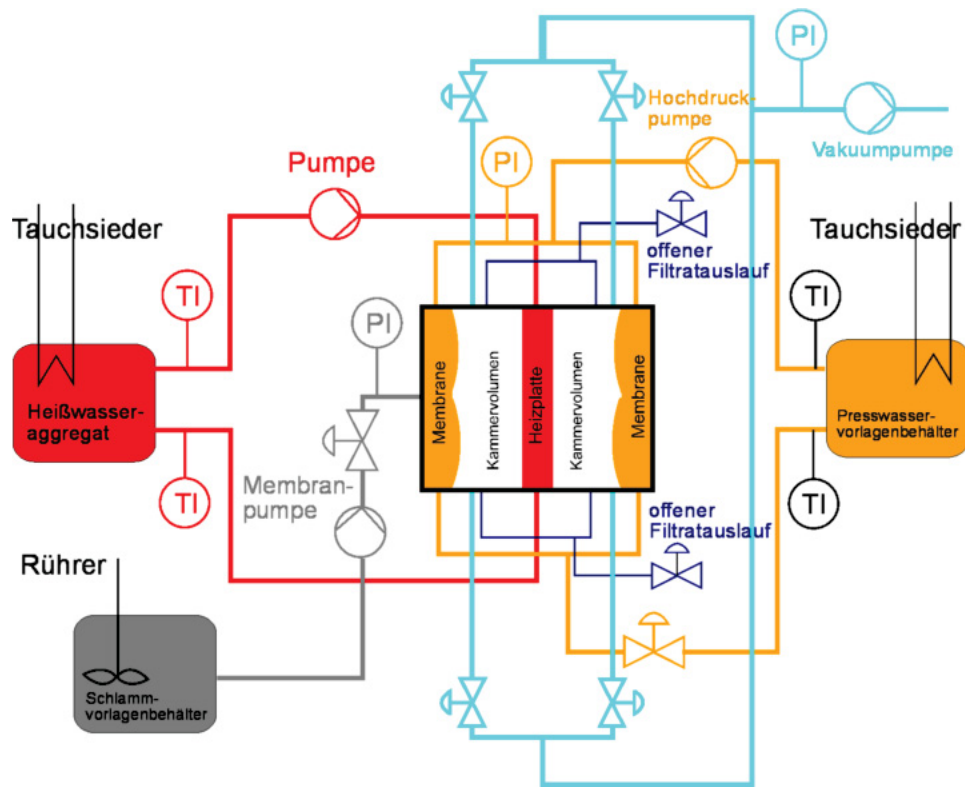


Abbildung 7.7: Schema der verwendeten Membranfilterpresse

### 7.2.1.2 Aufgenommene Messwerte

Die verwendete Membranfilterpresse ist nur dürftig mit Messgeräten ausgestattet.

Aufgenommen werden der Druck des Presswassers, der über eine digitale Anzeige ausgegeben wird, der Befülldruck der Membranfilterpresse durch eines am Suspensionszulauf befestigten Druckmessgerätes und der von einer Vakuumpumpe erzeugte Unterdruck.

Aufgrund fehlender Temperatur- und Volumenstrommessgeräte war es nicht möglich, die vom Press- und Heizwasser übertragene Wärmeenergie auf den Filterkuchen zu ermitteln. Die Vorlauftemperatur des Heizwassers konnte kurz nach dem Heizwasserboiler und die Rücklauftemperatur des Heizwassers kurz vor dem Heizwasserboiler, durch eine fix eingebundene Temperaturmessung, bestimmt werden. Für die Bestimmung der Vorlauftemperatur und der Rücklauftemperatur des Presswassers sind keine fixen Messgeräte an der Membranfilterpresse vorgesehen. Die Temperaturen konnten jedoch durch selbst durchgeführte Messungen am Presswasservorlagenbehälter mit Handmessgeräten ermittelt werden.

Eine Messung des elektrischen Energiebedarfs der Vakuumpumpe war ebenfalls nicht vorgesehen. Diese hätte auch nur eine geringe Aussagekraft gehabt, da die Vakuumpumpe für die verwendete Kammerfilterpresse zu klein dimensioniert war.

Das anfallende Filtrat wurde mit 12 Liter Messkübeln gemessen, während für das anfallende Kondensat ein 300 ml Messgefäß verwendet wurde.

Die entwässerten und getrockneten Filterkuchen wurden gewogen und deren Feuchte im Trock-

nungsschrank des Rohrdorfer Labors bestimmt. Die Proben wurden bis zur Massenkonstanz bei 105 °C getrocknet. Die Trocknungszeit betrug in der Regel zwischen ein und zwei Tagen. Im Rohrdorfer Labor wurde ebenfalls eine Heizwertbestimmung mittels Bombenkalorimetrie in Anlehnung an die DIN 51900 Teil 1 und 3 und eine Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Filterkuchens mittels Röntgenfluoreszenzanalyse vorgenommen.

### 7.2.2 Versuchsdurchführung

#### 7.2.2.1 Versuchsdurchführung der Klärschlammversuche

##### Vorbereitungen vor der Versuchsdurchführung

Für die Klärschlammversuche wurde Klärschlamm der Kläranlage Chiemsee mit einem mittleren TS Anteil von 2,8 % verwendet. Dieser Wert ist jedoch nur beschränkt aussagekräftig, da sich die schweren Bestandteile des Schlammes absetzen, wenn der Schlamm nicht bewegt wird. Der Schlamm wurde neben der Filterpresse in einem IBC-Behälter gelagert. Vor jedem Versuch wurde mithilfe der Membranpumpe, der vorher mit einem Holzpfosten aufgerührte Klärschlamm aus dem IBC Behälter entnommen und in den Schlammvorlagebehälter gefüllt. Um die Membranpumpe vor Verstopfung durch kleine Steine zu schützen, wurde an dem Schlauchende der Saugseite ein Filter montiert. Je nachdem wie viele Feststoffpartikel an dem Filter abgeschieden wurden und wie gut der Klärschlamm aufgerührt wurde, weist der Schlamm im Schlammvorlagenbehälter während des Versuchs schwankende TS Wert auf.

Zu kleine Feststoffteilchen lassen sich nicht mehr durch Filtration trennen. Schließen sich kleinste Teilchen zu Teilchenagglomeraten zusammen, ohne sich vollständig zu vereinigen, ist eine Flockung gegeben. Die geflockten Partikel lassen sich nun auf einen Filter abscheiden. Als Flockungsmittel können eine Vielzahl von chemischen Verbindungen und Stoffen dienen, wie z.B. Polymere. [104]

Die Zugabe des Polymeres ist unter anderem von dem TS-Wert des Schlammes abhängig. Um eine langwierige Bestimmung des TS-Wertes zu vermeiden und trotzdem eine ausreichende Flockung sicherzustellen, wurde ausgehend von der nötigen Polymermenge bei einem TS-Anteil von 2,8 %, 20 % mehr Flockungsmittel zugesetzt. Das mit Wasser angerührte Flockungsmittel wurde dem Klärschlamm im Schlammvorlagenbehälter zugegeben. Nachdem das angerührte Flockungsmittel mit dem Klärschlamm gut durchmischt wurde, erfolgte eine visuelle Prüfung der Flockung (siehe Abbildung 7.8).



Abbildung 7.8: Auswirkung der Zugabe von Flockungsmittel: kaum geflockter Schlamm (unterer Bereich des Bildes) im Vergleich zu gut geflocktem Schlamm (oberer Bereich des Bildes)

#### **Durchführung der Membranfilterpressenbefüllung**

Mithilfe der Membranpumpe wurde die Kammerfilterpresse, über den kontinuierlich mittels Holzpfosten durchmischten Schlammvorlagenbehälter, beschickt. Als Befüllungsabbruchkriterium wurde der maximale Befüllungsdruck, der minimale Schlammdurchsatz und die vorgegebene Schlammmenge herangezogen. Besonders das Kriterium der vorgegebenen Schlammmenge ist mit großer Unsicherheit behaftet, da die Membranpumpe dazu neigt eher Flüssigkeit mit geringem Feststoffanteil zu fördern. Trotz einigermaßen homogener Durchmischung des geflockten Klärschlammes, kommt es dabei zu einer Anreicherung fester Schlammbestandteile im Schlammvorlagenbehälter. Dies ist bei großen Flocken besonders stark ausgeprägt.

Der Druckanstieg in der Kammer erfolgte bei allen durchgeführten Versuchen sehr rasch. Nach 30 Sekunden wurde üblicherweise 1 bar erreicht. Nach 2 Minuten Befüllungsvorgang weist die Kammer in etwa einen Druck von 4 Bar auf, und spätestens nach 5 Minuten wurde bei allen Versuchen ein Druck von 6 bis 7 bar erreicht. Die Membranpumpe wurde in etwa auf diesen Druck geregelt. Ab dem Erreichen dieses Druckniveaus arbeitete die Membranpumpe nur mehr im Stop and Go-Betrieb. Um eine möglichst vollständige Füllung der Kammer zu gewährleisten, wurde die Befüllung fortgesetzt bis die Pumpenintervalle ausreichend groß wurden. In der Regel wurde der Befüllungsvorgang spätestens nach 20 Minuten beendet.

Wenn der Boiler bereits während der Befüllung eine ausreichend hohe Temperatur aufwies, wurde eine warme Befüllung vorgenommen. Um die Heizplatte der Membranfilterpresse nicht zu beschädigen, wurde diese erst bei einem Kammerdruck von 2 bar mit dem Heizwasser beaufschlagt (der Druck des Heizwasserkreislaufes beträgt ebenfalls 2 bar). Zu beachten ist, dass eine warme Befüllung die höchsten Wärmeverluste verursacht, da beim Befüllungsvorgang am meisten Filtrat anfällt.



### **Durchführung der Kuchenentwässerung mittels Pressung**

Spätestens nach dem Befüllungsvorgang wurde versucht die Heizplatte der Membranfilterpresse mit Heizwasser zu beaufschlagen. Um eine schnellere Erwärmung des Trocknungsgutes in der Filterpresse zu gewährleisten, wurde erwärmtes Presswasser aus dem Presswasservorlagenbehälter mit der Hochdruckpumpe bei einem Druck von etwas über 2 bar durch die Pressmembrane gedrückt. Nachdem sich der Kuchen auf einer ausreichend hohen Temperatur befand (Rücklauf-temperatur des Heizwasserboilers bei etwa 80 °C) wurde das Drosselventil des Presswasser-kreislaufes geschlossen, damit die Hochdruckpumpe den Presswasserdruck auf 10 bar erhöhen konnte.

Mit einem Anstieg des Presswasserdruckes stieg auch die Filtratmenge. In den ersten 2 Minuten des Pressvorganges fällt das meiste Filtrat an. Danach ist die Filtratmenge sehr stark abnehmend und geht nach etwa einer Minute von einem Rinnsal in ein kontinuierliches Tropfen über. In der Regel wurde der Auspressvorgang nach spätestens 15 Minuten beendet.

### **Durchführung der Kuchenentwässerung mittels Vakuumtrocknung**

Vor dem Anlegen des zyklischen Vakuums wurde noch einmal die Rücklauf-temperatur und die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf-temperatur und Rücklauf-temperatur des Heizboilers kontrolliert. Eine direkte aussagekräftige Temperaturmessung des Trocknungsgutes konnte nicht durchgeführt werden. Eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf-temperatur und Rücklauf-temperatur des Heizboilers (circa 3 K) sowie eine hohe Rücklauf-temperatur (circa 80 °C) ist ein Zeichen, dass sich das Trocknungsgut bereits auf einer hohen Temperatur befindet und aufgrund des geringen Temperaturgradienten, nur mehr sehr wenig Wärme von dem Heizwasser auf das Trocknungsgut übertragen wird.

Während der gesamten Trocknung wird das Trocknungsgut kontinuierlich über die Heizplatte der Membranfilterpresse beheizt. Das Drosselventil des Presswasser-kreislaufes wurde so eingestellt, dass eine Zirkulation des Presswassers bei einem Presswasserdruck von 4 bis 5 bar möglich war.

Bei den ersten Versuchen wurde ein Trocknungszyklus gefahren, bei dem 20 Minuten lang ein Vakuum an der Druckkammer der Kammerfilterpresse angelegt wurde und 10 Minuten das Trocknungsgut im Vakuum freien Zustand aufgeheizt wurde. In späteren Versuchen wurde die Vakuumzeit auf etwa 10 Minuten reduziert. Die Aufheizphase bewegte sich in späteren Versuchen meist zwischen 5 und 15 Minuten. Eine exakte Einhaltung der Vakuum- und Aufheizzeiten war oft nicht möglich.

Die Vakuumpumpe ist über 4 Vakuumschläuche, die über Ventile geöffnet oder verschlossen werden können, mit der Druckkammer der Membranfilterpresse verbunden. Zu Beginn der dritten Phase, vor dem Durchführen des ersten Trocknungszyklus, wurden bei angelegtem Vakuum alle 4 Ventile geschlossen gehalten. Ein Ventil nach dem anderen wurde der Reihe nach kurzzeitig geöffnet und augenblicklich wieder verschlossen. Dadurch wurden Flüssigkeitsrückstände aus der Befüllung und Pressung, die sich in den Vakuumabsaugöffnungen angesammelt hatten

entfernt.

Nach dem Vermessen und Entfernen des Falschkondensates wurde mit dem eigentlichen Trocknungszyklus begonnen. Nach jeder beendeten Vakuumphase wurde die angefallene Kondensatmenge vermessen und entfernt. Die dritte Phase wurde beendet, wenn die anfallende Kondensatmenge einen Wert von 2 ml unterschritt.

### 7.2.2.2 Versuchsdurchführung der Bioschlammversuche

Für die Befüllung, Pressung und Trocknung des Bioschlammes der Papierfabrik Raubling (TS des Rohschlammes liegt bei circa 4 %) wurde ähnlich wie beim Klärschlamm vorgegangen. Ein großer Unterschied des Bioschlammes liegt in der Flockung. Durch einen beträchtlichen Aufwand an Flockungsmittel konnte der Bioschlamm geflockt werden. Allerdings erwiesen sich die Flocken unter geringster mechanischer Beanspruchung (wie z.B. Rühren) als nicht stabil. Während dem Befüllungsvorgang der Membranfilterpresse, muss der Bioschlamm jedoch ständig aufgerührt werden, da sich dieser noch schneller absetzt als Klärschlamm. Ruhender Bioschlamm bildet innerhalb einer Minute eine relativ feste Schlammschicht am Boden des Behälters, über der eine klare Wasserschicht steht. In später durchgeführten Versuchen wurde allerdings auf die Zugabe eines Flockungsmittels zum Bioschlamm verzichtet, da gezeigt werden konnte, dass zur Filterung des Bioschlammes mit der Membranfilterpresse kein Flockungsmittel nötig ist. Das Filtrat des Bioschlammes wies noch dazu weit weniger Feststoffanteil wie das Filtrat des Klärschlammes auf (klares Filtrat).

Im Kapitel 7.2.3 wird näher auf die Unterschiede zwischen Klär- und Bioschlamm eingegangen.

Um den Filterpressenvorgang berechnen und spätere Ergebnisse besser nachvollziehen zu können wurde beim Klär- und Bioschlamm jeweils mindestens eine Probe je Prozessphase gezogen und im Labor ausgewertet. Da nach dem Öffnen der Kammerfilterpresse ein erneutes Schließen der Presse mit anschließender Fortführung des Versuches, das Ergebnis des Versuches verfälschen würde, musste nach jeder Probeentnahme der Versuch abgebrochen und von Neuem gestartet werden.

### 7.2.3 Versuchsauswertung

Insgesamt wurden 4 verwertbare Klärschlammfilterversuche und 3 verwertbare Bioschlammfilterversuche durchgeführt. In den folgenden Unterkapiteln werden die durchgeführten Messungen durch Kontrollrechnungen überprüft und die ermittelten Ergebnisse interpretiert.

#### 7.2.3.1 verwendete Formeln und Auszüge aus der Berechnungsdurchführung

In diesem Kapitel werden selbst hergeleitete Formeln, die für die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung wichtig sind, angegeben. Ebenfalls wird auf die Berechnungsdurchführung

## 7 Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche

näher eingegangen, wenn diese aufgrund der getroffenen Annahmen eine zusätzliche Beschreibung bedarf.

Ist die Trockensubstanzdichte nicht bekannt, kann diese durch eine Messung der Dichte des Rohschlammes und dem TS Wert des für die Dichte Messung verwendeten Rohschlammes bestimmt werden. Die Trockensubstanzdichte ergibt sich aus Formel 7.1.

$$\rho_{TS} = \frac{\rho_{H_2O} * \rho_{Rohschlamm} * 1 * TS_{Rohschlamm}}{\frac{TS_{Rohschlamm}}{100\%} * 1 + \rho_{H_2O} * 1 - \rho_{Rohschlamm} * 1} \quad (7.1)$$

$\rho_{TS} \dots$	Trockensubstanzdichte [ $kg_{TS}/m^3_{TS}$ ]
$TS_{Rohschlamm} \dots$	Trockensubstanz des Rohschlammes [ $kg_{TS}/(kg_{TS} + kg_{H_2O}) * 100\%$ ]
$\rho_{Rohschlamm} \dots$	Dichte des Rohschlammes [ $kg_{Rohschlamm}/m^3_{Rohschlamm}$ ]
$\rho_{H_2O} \dots$	Dichte des Wassers [ $kg_{H_2O}/m^3_{H_2O}$ ]

Ein wesentliches Prozesskriterium für das Befüllungsende ist das Erreichen der vorgegebenen Befüllungsmenge. Das Kammervolumen, eine wichtige Einflussgröße, ist bekannt. Die Trockensubstanzdichte kann durch Formel 7.1 errechnet werden. Die Feuchte des Trocknungsgutes nach der Beschickung wird im Labor im Trocknungsschrank bestimmt. Nimmt man an, dass der Rohschlamm aus Wasser und Trockensubstanz besteht und der gesamte Feststoff auf dem Filtertuch oder dem Filterkuchen abgeschieden wird, weist das Filtrat die Dichte von Wasser auf. Die vorgegebenen Befüllungsmenge errechnet sich aus Formel 7.2.

$$V_{Befüllung} = \frac{-\frac{TS_{Kammer}}{100\%} * \rho_{H_2O} * V_{Kammer} * \rho_{TS}}{\frac{TS_{Rohschlamm}}{100\%} * \rho_{Rohschlamm} * (-\rho_{TS} + \frac{TS_{Kammer}}{100\%} * \rho_{TS} - \frac{TS_{Kammer}}{100\%} * \rho_{H_2O})} \quad (7.2)$$

$V_{Befüllung} \dots$	vorgegebene Befüllungsmenge [ $m^3_{Rohschlamm}/Kammerbefüllung$ ]
$TS_{Kammer} \dots$	Trockensubstanz des Trocknungsgutes in der Kammer [ $kg_{TS}/(kg_{TS} + kg_{H_2O})$ ]
$V_{Kammer} \dots$	Kammervolumen der Membranfilterpresse [ $m^3/Kammer$ ]

Bei bekannter Trockensubstanzmasse je Kammer, lässt sich mit Formel 7.3 der Trockensubstanzgehalt des Trocknungsgutes in der Kammer nach der Befüllung errechnen. Die Trockensubstanzmasse je Kammer, wird im Labor nach der Trocknung im Trocknungsschrank bestimmt.

$$TS_{Kammer} = \frac{\frac{m_{TS_{Kammer}}}{V_{Kammer}} * 100\%}{\frac{m_{TS_{Kammer}}}{V_{Kammer}} * (1 - \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{TS}}) + \rho_{H_2O}} \quad (7.3)$$

$m_{TS_{Kammer}} \dots$	Trockensubstanzmasse nach dem Befüllvorgang in der Kammer [ $kg_{TS}/Kammer$ ]
-------------------------	--------------------------------------------------------------------------------

Neben den Phase 2- und Phase 3- Versuchsergebnissen wurde mit Formel 7.3 der Trockensubstanzgehalt des Trocknungsgutes in der Kammer nach der Befüllung, ebenfalls für Phase 1 bestimmt. Da die Trockensubstanzmasse der Phase 1 im Labor bestimmt wurde, muss die Trockensubstanzberechnung und der im Labor bestimmte Trockensubstanzgehalt der Phase 1

sehr genau übereinstimmen. Im Falle des Klärschlammes trifft dies zu. Die im Labor bestimmte Trockensubstanzmasse des Klärschlammes weicht um -2,5 % von der errechneten Trockensubstanzmasse ab. Dementsprechend gering ist auch die Abweichung des errechneten Trockensubstanzgehaltes von dem gemessenen Trockensubstanzgehalt.

Im Falle des Bioschlammes trifft dies nicht zu. Die Abweichung der im Labor gemessenen Trockensubstanzmasse in Phase 1 zu der berechneten Trockensubstanzmasse beträgt -45 %. Einen sehr großen Einfluss auf die berechnete Trockensubstanzmasse hat die Dichte der Trockensubstanz (siehe Formel 7.3). Für die Klärschlamm-berechnung wurde die vom Kläranlagenbetreiber angegebene Trockensubstanzdichte von  $350 \text{ kg/m}^3$  verwendet. Die Trockensubstanzdichte des Bioschlammes wurde mithilfe Formel 7.1 berechnet und beträgt  $2100 \text{ kg/m}^3$  (gemessene Dichte des Rohschlammes =  $1126 \text{ kg/m}^3$ , gemessener Trockensubstanzgehalt des Rohschlammes 21,37 % [83]). Nimmt man eine Bioschlamm-trockensubstanzdichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  an, weichen die gemessenen Trockensubstanzmassen von den berechneten Trockensubstanzmassen des Phase 1 Versuches nur gering voneinander ab (Massenabweichung der Kammer 1 = -1 %, Massenabweichung der Kammer 2 = 1,8 %). Es ist vorstellbar, dass die tatsächliche Trockensubstanzdichte des für den Versuch verwendeten Schlammes einen Wert von etwa  $800 \text{ kg/m}^3$  aufweist, da die Zusammensetzung des Bioschlammes aufgrund einer diskontinuierlichen Kalkzugabe oft sehr stark variiert. Die für die Ermittlung der Bioschlamm-dichte notwendigen Messwerte wurden etliche Wochen nach den Versuchen bei einer unbekanntem Schlammzusammensetzung aufgenommen. Der hohe Trockensubstanzgehalt des Rohschlammes von 21,37 % lässt vermuten, dass ein sehr stark eingedickter Schlamm mit einem überdurchschnittlich hohen Kalkanteil für die Trockensubstanzdichtemessung abgezogen wurde. Der für die Trockensubstanzdichte verwendete Schlamm wurde vom Eindicker entnommen. Üblicherweise weist der vom Eindicker entnommene Bioschlamm einen Trockensubstanzgehalt von 4 % auf.

Alle weiteren für die Versuchsauswertung benötigten Berechnungen ergeben sich aus einfachen Massenbilanzen. Deshalb wird auf diese Berechnungen nicht näher eingegangen.

### 7.2.3.2 Ergebnisauszug und Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund folgender Gegebenheiten besitzen die Ergebnisse der durchgeführten Versuche nur eine beschränkte Aussagekraft:

- Industrielle Membranfilterpressen zur Klärschlamm-trocknung verwenden ein um den Faktor 5 stärkeres Vakuum ( $50 \text{ mbar}$  [88]) als mit der Vakuumpumpe der Versuchsfilterpresse erzeugt werden kann.
- Industrielle Membranfilterpressen verwenden eine Druckluftlanze um die nach der Befüllung in der Kernbohrung verbleibende Suspension auszublasen [88]. Das Ausblasen dieser Suspension war mit der verwendeten Testfilterpresse nicht möglich. Da die Suspension in der Kernbohrung praktisch nicht mechanisch entwässerbar und auch schwerer beheizbar

ist, tritt eine Veränderung des Trocknungsprozesses auf. Nach jedem Trocknungszyklus nimmt der bereits vorgetrocknete Filterkuchen Feuchtigkeit aus der Kernbohrung auf. Der Trocknungsprozess gestaltet sich dadurch ineffizienter.

- Aufgrund einer zu geringen elektrischen Leistung des Heizboilers und den großen Wärmeverlusten des Systems konnte maximal eine Heiztemperatur von 85 °C erreicht werden.
- Ebenfalls aufgrund der zu geringen elektrischen Leistung des Tauchsieders und den großen Wärmeverlusten des Systems konnte maximal eine Presswassertemperatur von 76 °C erreicht werden.
- Um die Membrane der Filterpresse zu schützen, wurde ein Großteil der Versuche bei einer geringen Kammertiefe (kleines Kammervolumen) durchgeführt. Bei großen industriellen Anlagen werden die Membrane aufgrund der veränderten Geometrie nicht mehr so stark belastet. Diese Anlagen können somit auch mit einer größeren Kammertiefe arbeiten.
- Aufgrund der schweren Messbarkeit relevanter Werte (siehe Kapitel 7.2.1.2) und der dadurch lückenhaften Versuchsdokumentation ist es schwierig die Versuchsergebnisse korrekt zu deuten.
- Manche Versuche mussten unter anderen Randbedingungen durchgeführt werden (andere Heiztemperaturen, warme Befüllung, etc.) was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert.

Eine zusätzliche Fehlerquelle könnte die in Kapitel 7.2.2 beschriebene Beseitigung des „Falschkondensates“ sein. Zum einen würde das „Falschkondensat“ die tatsächlich anfallende Kondensatmenge des Trocknungsprozesses verfälschen. Zum anderen muss man davon ausgehen, dass sich bei dem „Falschkondensat“ eine nicht unerhebliche Menge verdampfte Feuchtigkeit des Trocknungsgutes befindet, da zu Beginn des Trocknungsprozesses die größte Kondensatmenge anfällt.

Abbildung 7.9 und 7.10 zeigt, die sich in den Kammern befindliche Trockensubstanzmasse des Klär- und Bioschlammes bei unterschiedlichen Versuchen.

## 7 Klär- und Bioschlamm trocknungsversuche

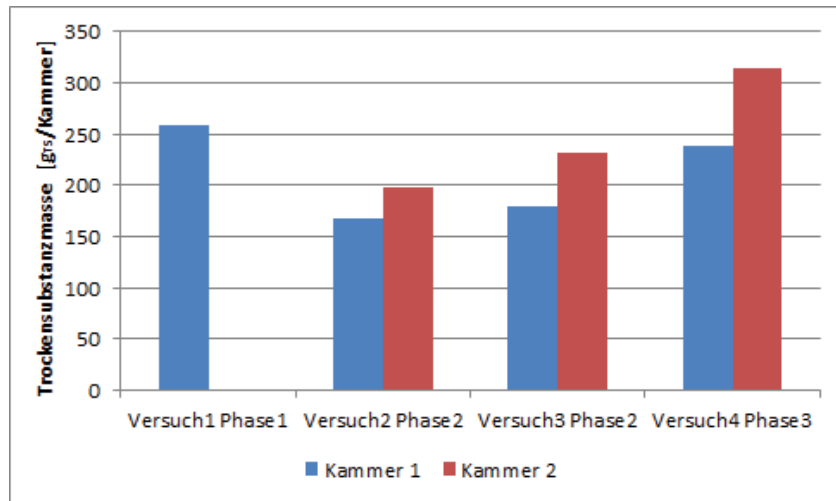


Abbildung 7.9: Trockensubstanzmasse je Kammer bei unterschiedlichen Klärschlammversuchen

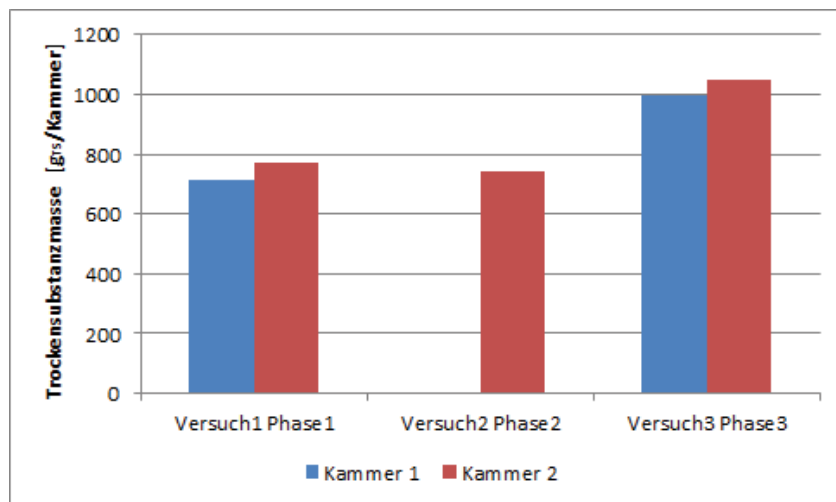


Abbildung 7.10: Trockensubstanzmasse je Kammer bei unterschiedlichen Bioschlammversuchen

Die sich in der Kammer befindliche Trockensubstanzmasse ist rein von der ersten Phase des Membranfilterpressenprozesses abhängig. Besonders beim Klärschlamm variiert die Trockensubstanzmasse je Kammer zwischen den einzelnen Versuchen besonders stark. Ebenfalls auffallend ist, dass die Kammer 2 der Membranfilterpresse bei jedem Versuch eine höhere Trockensubstanzmasse als Kammer 1 aufweist, obwohl beide Kammern das selbe Kammervolumen besitzen. Die Kammer 1 befindet sich jedoch vor Kammer 2 und wird deshalb zuerst mit Klärschlamm (zumindest bis zur Hälfte) befüllt. Aufgrund des kürzeren Weges und der damit verbundenen geringeren Strömungswiderstände müsste man davon ausgehen, dass sich in Kammer 1 eher Feststoff aufkonzentrieren wird. Die in Kammer 2 höhere Trockensubstanzmasse und die je Versuch stark variierenden Trockensubstanzmassen der einzelnen Kammern, konnte nicht geklärt werden. Neben relevanten Prozesskriterien wie der Befüllungsdauer und dem Befüllungsdruck könnte eine eventuelle Filtertuchverstopfung zu den stark unterschiedlichen Versuchswerten beigetragen haben.

## 7 Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche

Bei den Bioschlammversuchen tritt eine geringere prozentuale Trockensubstanzmassenabweichung zwischen den einzelnen Versuchen auf als bei den Klärschlammversuchen. Ebenfalls weist bei den Bioschlammversuchen die Kammer 2 höhere Trockensubstanzmassen als die Kammer 1 auf.

Mit Formel 7.3 lässt sich der Trockensubstanzgehalt des Trocknungsgutes in der Kammer nach der Befüllung errechnen. Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 zeigen diese Ergebnisse für die Klär- und Bioschlammversuche. Aufgrund der Überlegungen in Kapitel 7.2.3.1, wurden die Berechnungen des Bioschlammes mit einer angenommenen Trockensubstanzdichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  durchgeführt.

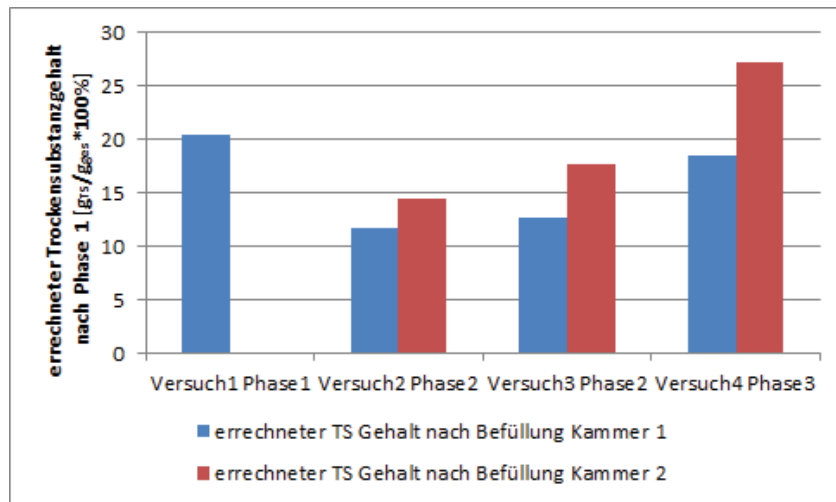


Abbildung 7.11: errechnete Trockensubstanzgehalte der Kammern nach der Befüllung der Klärschlammversuche

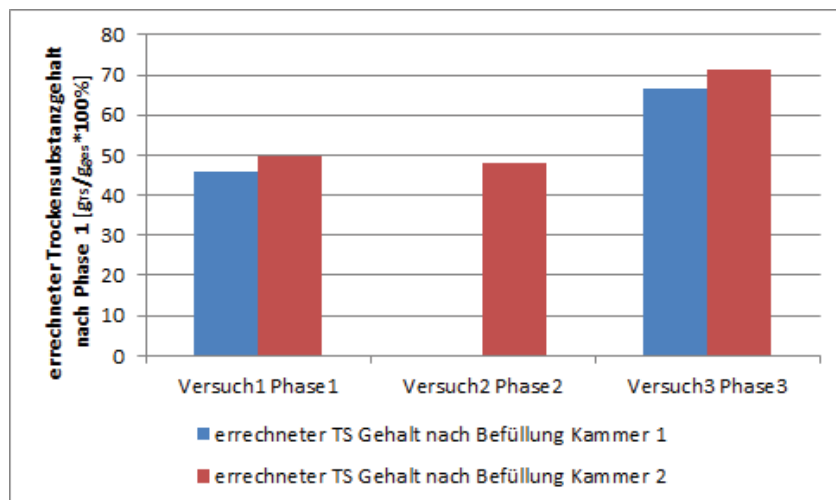


Abbildung 7.12: errechnete Trockensubstanzgehalte der Kammern nach der Befüllung der Bioschlammversuche

## 7 Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche

Die errechneten Trockensubstanzgehalte des Klärschlammes nach der Befüllung pendeln zwischen 11,7 % und 27,1 %. Die niedrigen Werte lassen sich durch eine mögliche Filtertuchverstopfung oder eine zu kurze Befüllungszeit, etc. erklären. Ein möglicher Grund, warum der errechnete Trockensubstanzgehalt des Trocknungsgutes 2,8 Prozentpunkte über dem höchsten gemessenen Trockensubstanzgehalt der Phase 2 liegt (Vergleich Abbildung 7.13), konnte jedoch nicht gefunden werden. Theoretisch wäre dies nur möglich, wenn der Befüllungsdruck während der Phase 1 des vierten Klärschlammversuches den für alle Versuche festgelegten Pressdruck der Phase 2 von 10 bar, überstiegen hat.

Im Falle des Bioschlammes gelten aufgrund der ähnlichen Gegebenheiten dieselben Überlegungen.

Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 zeigen die gemessenen Trockensubstanzgehalte der Klär- und Bioschlämme der einzelnen Versuche. Auffallend ist, dass der Trockensubstanzgehalt der Kammer 2 des Phase 3 Klärschlammversuches niedriger als der Trockensubstanzgehalt der Kammer 1 desselben Versuches ist. Aufgrund des errechneten Trockensubstanzgehaltes nach der Befüllung (siehe Abbildung 7.11) sollte dieser Wert jedoch höher sein, da weniger Wasser verdampft werden muss und dadurch eine schnellere Trocknung erfolgen kann. Bei den Bioschlämmen treten dieselben Gegebenheiten in etwas abgeschwächter Form auf.

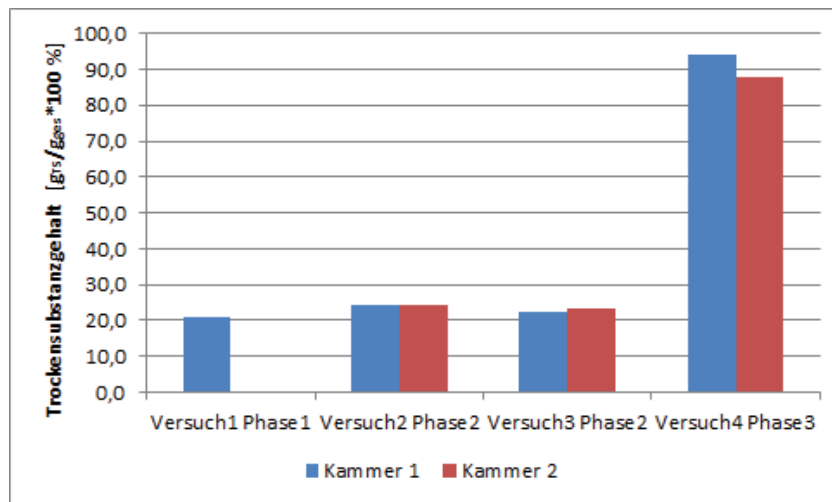


Abbildung 7.13: gemessener Trockensubstanzgehalt der durchgeführten Klärschlammversuche



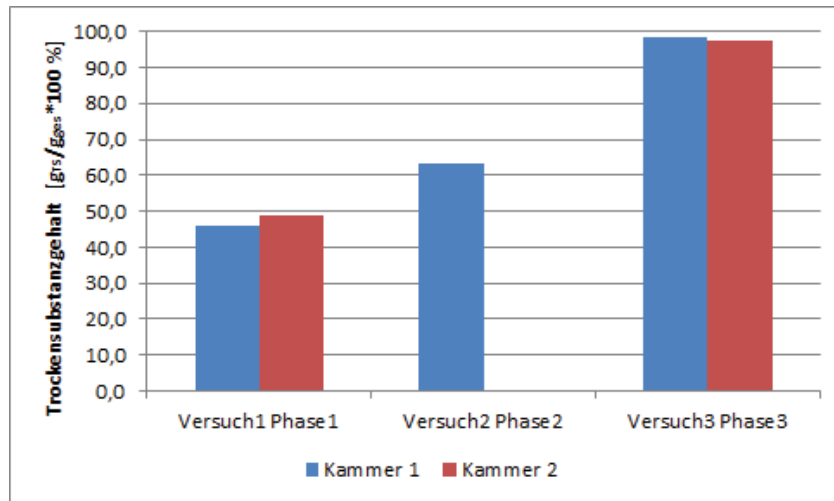


Abbildung 7.14: gemessener Trockensubstanzgehalt der durchgeführten Bioschlammversuche

### 7.2.3.3 Befüllungs- Entwässerungs- und Trocknungseigenschaften des Klär- und Bioschlammes im Vergleich

Abbildung 7.15 zeigt die durch die Filterpressenversuche durchschnittlich ermittelten Trockensubstanzwerte des Klär- und Bioschlammes.

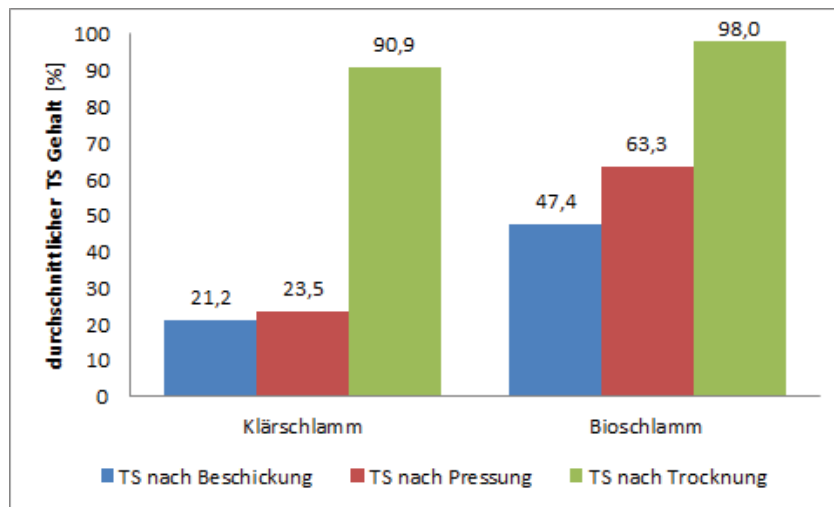


Abbildung 7.15: durchschnittliche Trockensubstanzwerte des Klär und Bioschlammes

Abbildung 7.16 zeigt die durch die Filterpressenversuche durchschnittlich ermittelten Trockensubstanzmassen je Kammer und den gemessenen Brennwert der Trockensubstanz sowie den berechneten Heizwert (der Heizwert wurde bei der durchschnittlichen gemessenen Trockensubstanz nach der Trocknung berechnet).

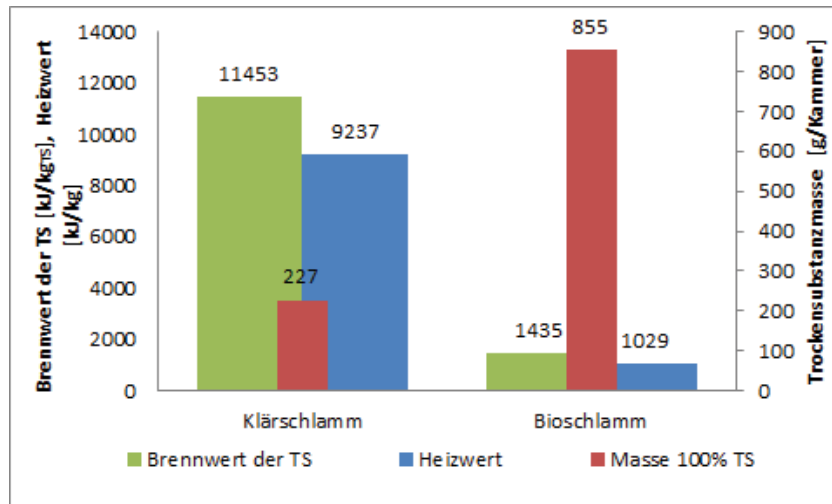


Abbildung 7.16: durchschnittliche Trockensubstanzmassen je Kammer sowie der Brennwerte und berechnete Heizwerte der Klär- und Bioschlämme

Einer der wesentlichsten Unterschiede der beiden Schlämme zueinander, liegt in der sehr guten mechanischen Entwässerbarkeit des Bioschlammes (siehe Abbildung 7.15).

Schon in der Befüllungsphase lässt sich beim Bioschlamm ein wesentlich höherer Trockensubstanzgehalt des Trocknungsgutes erzielen. Dadurch ergibt sich eine um den Faktor 3,7 höhere Trockensubstanzausbeute je Charge verglichen mit der Klärschlamm-trocknung (siehe Abbildung 7.16). Durch die Membranpressung lässt sich der nach der Befüllung schon sehr hohe Trockensubstanzgehalt des Bioschlammes um 33 % erhöhen (bezogen auf Trockensubstanz nach Befüllung). Bei der Klärschlamm-trocknung erhöht sich durch die Membranpressung der Trockensubstanzgehalt des Klärschlammes um nur 11,2 % (ebenfalls auf die Trockensubstanz nach der Befüllung bezogen).

Die Trocknungszeit ist ebenso eine wichtige wirtschaftliche Einflussgröße wie die Trockensubstanzausbeute je Charge. Aufgrund einer zu geringen Anzahl an durchgeführten Versuchen sowie einer zu großen Variation von Prozessparametern der einzelnen Versuche, kann keine Aussage, über eine bei der Bioschlamm-trocknung verminderte Trocknungszeit verglichen mit der Klärschlamm-trocknung gemacht werden. Rein rechnerisch kann man allerdings davon ausgehen, da verglichen mit der Klärschlamm-trocknung 38 % weniger Wasser (bezogen auf die zu verdampfende Wassermenge der Klärschlamm-trocknung um einen TS von 95 % zu erreichen) bei der Bioschlamm-trocknung verdampft werden muss.

#### 7.2.3.4 Brennwert, Heizwert und chemische Zusammensetzung des Klär- und Bioschlammes

Abbildung 7.17 und 7.18 geben Aufschluss, über die Elementarzusammensetzung der organischen Substanz und der anorganischen Substanz des Klär- und Bioschlammes.

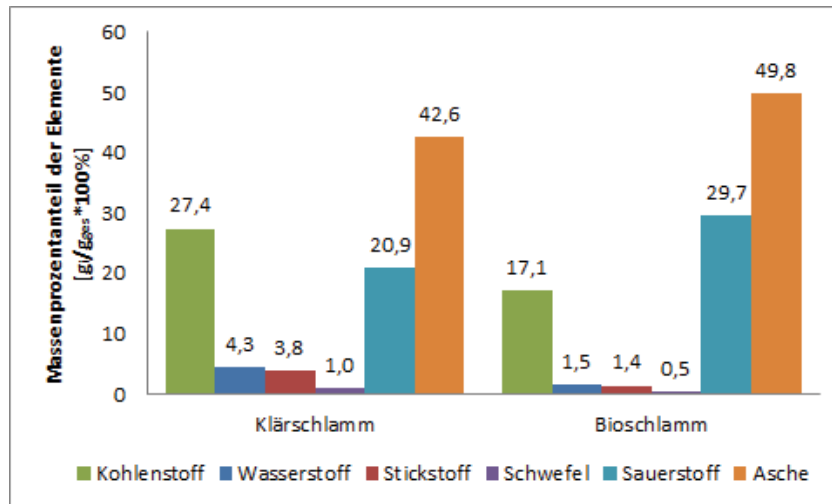


Abbildung 7.17: Elementarzusammensetzung und Anteil der organischen Substanz des Klär und Bioschlammes (bei 100 % TS)

Der Bioschlamm weist mit fast 50 % einen sehr hohen Ascheanteil auf. Ebenfalls ist der Sauerstoffgehalt des Bioschlammes mit 30 % sehr hoch. Aufgrund dieser hohen Anteile ist der Anteil brennbarer Bestandteile (Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel) gering. Dies wirkt sich negativ auf den Brennwert, der um den Faktor 8 kleiner wie der des Klärschlammes ist, und den Heizwert, der um den Faktor 9 kleiner wie der des Klärschlammes ist, aus (siehe Abbildung 7.16).

Abbildung 7.18 zeigt die Zusammensetzung der Asche des Klär- und Bioschlammes. Die Asche des Klärschlammes weist eine sehr ausgewogene Massenprozentverteilung einzelner Elemente auf. Elemente wie Eisen, Aluminium und Silicium sind für die Bildung der Klinkerphasen wichtig (siehe Kapitel 2.1.1.4) und kommen in der Asche des Klärschlammes in hohen Massenkonzentrationen vor. Ebenfalls in einer sehr hohen Massenkonzentration kommt das Element Phosphor in der Klärschlamm-Asche vor.

Der Klinker kann problemlos eine Phosphorkonzentration bis zu 1,5 Massenprozent aufweisen. Dies fördert sogar die Klinkerbildung während des Brennprozesses. Ab einer Massenkonzentration von 2 % Phosphor im Klinker, wirkt sich der Phosphor negativ auf die Kalkeinbindung im Klinker aus. Zu hohe Phosphorkonzentrationen können sich negativ auf die Frühfestigkeit des Zementes auswirken, da verstärkt Belit gebildet und die Alit Bildung gehemmt wird. [35]

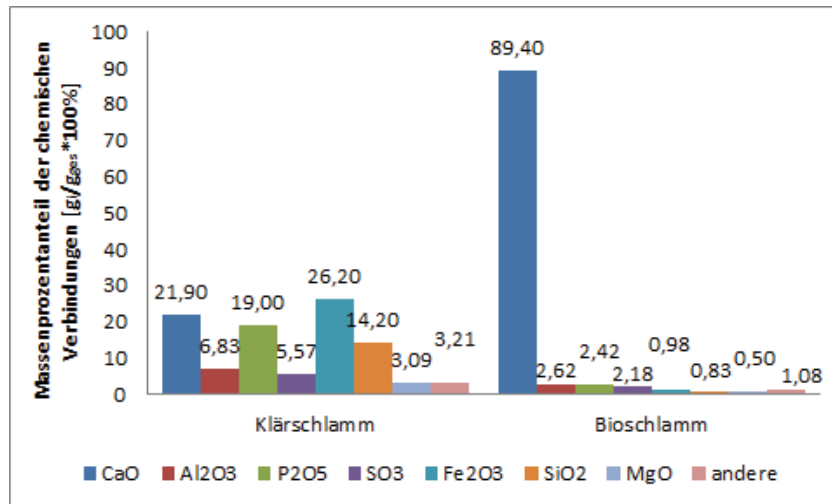


Abbildung 7.18: Elementarzusammensetzung und Anteile der anorganischen Substanz des Klär- und Bioschlammes (bei 100 % Asche)

Die Asche des Bioschlammes besteht zum Großteil aus Calcium und würde sich daher gut zur Substitution von Kalkstein eignen.

### 7.2.3.5 Gepulstes Vakuum

Unter dem Anlegen eines gepulsten Vakuums wird das in regelmäßigen Abständen ruckartige Öffnen eines der vier Vakuumventile verstanden, dass zu einem schlagartigen Austreten von Dampf führt der größere und kleinere Wassertropfen mit sich reißt. Es befindet sich immer nur ein Vakuumventil für eine sehr kurze Zeitspanne (circa eine halbe Sekunde) im offenen Zustand. Die Zeitspanne in der die Ventile geöffnet wurden variiert und ist von der anfallenden Kondensatmenge je Öffnungsvorgang abhängig (Fiel sehr wenig Kondensat an, wurden die Abstände der Pulsung vergrößert oder die Pulsung wurde an einem anderen Vakuumventil durchgeführt). Dieser Ablauf wurde abwechselnd an allen vier Vakuumventilen durchgeführt.

Bei dem durchgeführten Versuch mit gepulstem Vakuum konnte ein positiver Effekt der Pulsung gezeigt werden. Es sind jedoch noch weitere Versuche notwendig, da aus zeitlichen Gründen eine genaue Betrachtung der Pulsung nicht möglich war.

## 7.3 Wirtschaftliche Betrachtung der Trocknung mittels Membranfilterpresse

### 7.3.1 Einführung in die Problemstellung

Die Kläranlage Chiemsee und die Papierfabrik Mondi in Raubling haben großes Interesse ihre Schlämme über das Rohrdorfer Zementwerk zu entsorgen, wenn dadurch geringere Entsorgungskosten als beim momentanen Entsorgungsweg anfallen.

Die durch eine Zentrifuge auf circa 28 % TS entwässerten Klärschlämme der Kläranlage Chiemsee gehen momentan in eine Monoverbrennungsanlage. Es fallen Kosten von 65 Euro je Tonne vorentwässertem Klärschlamm an. [89] Die Kläranlage Chiemsee liegt vom Rohrdorfer Zementwerk 16 Kilometer entfernt.

Die Bioschlämme der Papierfabrik Mondi in Raubling können mit einer Siebbandpresse auf einen TS Gehalt von 45 bis teilweise sogar 55 % TS entwässert werden [82]. Es fallen Entsorgungskosten zwischen 30 und 60 Euro je Tonne vorentwässerter Bioschlämme an [61]. Die Papierfabrik Raubling liegt 7 Kilometer vom Zementwerk entfernt. Das Rohrdorfer Zementwerk hat in der Vergangenheit schon Bioschlämme von der Papierfabrik Raubling bezogen. Allerdings wurde die Lieferung eingestellt, da die Brennstofffeuchtigkeit der Bioschlämme zu hoch war und es zu Geruchsproblemen gekommen ist.

Ebenfalls wird im folgendem Kapitel die Wirtschaftlichkeit der Trocknung und der thermischen Verwertung von Gärresten betrachtet.

Von Seiten des Zementwerkes wird ein TS Gehalt der getrockneten Schlämme und Gärreste von 95 % gewünscht. Eine Filterpresse bietet den Vorteil durch eine Trocknung sehr hohe Trockensubstanzgehalte erreichen zu können, ohne dabei einen großen Abluftstrom zu erzeugen, der später in teuren Aggregaten nachbehandelt werden muss. Die in einer Filterpresse bei der Trocknung anfallenden Brüden, können sehr einfach in einem Kondensator kondensiert werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird eine sehr grobe Abschätzung der Trocknungskosten von Bio-, Klärschlämmen und Gärresten mit einer Filterpresse vorgenommen. Anschließend werden diese Kosten mit den Trocknungskosten einer Bandtrocknungsanlage verglichen. Die wirtschaftlichen Werte der Bandtrocknungsanlage wurden aus [71] entnommen.

### 7.3.2 Durchführung der Berechnungen

Alle relevanten wirtschaftlichen Werte und sonstige Anlagendaten wurden aus einem Angebot der Firma DEHYDRY Anlagenbau AG entnommen (siehe Tabelle 7.3 und 7.4). Es wird darauf hingewiesen, dass die Angebotsanlage bei einer Chargenanzahl von 750 Chargen je Jahr eine jährliche Menge von 2916 Tonnen getrocknetem Klärschlamm (bezogen auf 100 % TS) ausgibt. Dies ist die 3,5 fache Menge des jährlich anfallenden Klärschlammes (ebenfalls bezogen auf 100 % TS) der Kläranlage Chiemsee und die 1,6-fache Menge des jährlich anfallenden Bioschlammes der Papierfabrik Raubling. Da die Berechnung mit spezifischen Werten durchgeführt wird, kann das Angebot jedoch für eine Abschätzung der Trocknungskosten herangezogen werden. Während die Betriebskosten einer kleineren Anlage ähnlich zu denen der betrachteten Anlage sein werden (abgesehen von den Personalkosten), sind die spezifischen Investkosten einer kleineren Anlage mit Sicherheit höher.

## 7 Klär- und Bioschlamm trocknungsversuche

Investkosten	Chargenleistung	Chargenzeit	TS Klärschlamm	TS Bioschlamm
[€]	[t <sub>100% TS</sub> /Charge]	[h/Charge]	[kg <sub>TS</sub> /kg <sub>ges.</sub> ]	[kg <sub>TS</sub> /kg <sub>ges.</sub> ]
3.000.000	3,9	4	3	4

Tabelle 7.3: Investkosten und Anlagenwerte einer Membranfilterpresse mit Vakuumtrocknung und angenommene TS Werte Klär- und Bioschlämme

	elektrische	thermisch	Polymer	Personal	Wartung
	[Cent/kWh, kWh]	[Cent/kWh, kWh]	[€/kg, kg]	[€/Bh, Bh]	[€/Charge, Charge]
Preis je Einheit	9	0,2	5	50	80
Einheiten je Charge	500	8000	19,5	1	1

Tabelle 7.4: Betriebskosten einer Membranfilterpresse

Die Chargenzeit wurde aufgrund der eigens durchgeführten Messungen mit 4 Stunden abgeschätzt. Bei den angegebenen TS-Werten der Klär- und Bioschlämme handelt es sich um grobe Durchschnittswerte. Für den Preis der thermischen Energie wurden die Investkosten der Wärmetauscher und der Pumpen berücksichtigt. Bezieht man diese Kosten inklusive der Zinskosten auf die in 12 Jahren übertragene Wärme kommt man in etwa auf 0,2 Cent/kWh. Für das Rohrdorfer Zementwerk ist eine reine Berücksichtigung der Investkosten der thermischen Energie zutreffend, da sehr viel ungenützte Energie auf einem ausreichend hohen Temperaturniveau zur Verfügung stehen würde. Für die Kläranlage und die Papierfabrik müsste dies extra geprüft werden.

Die Berechnung wurde für eine Zeitdauer von 12 Jahren durchgeführt. Neben dem Zementwerk wurden als mögliche Standorte für eine Membranfilterpresse die Kläranlage Chiemsee und die Papierfabrik Raubling betrachtet.

Die Investkosten der Membranfilterpresse zuzüglich der Zinskosten wurde auf die Tonne Trockengut (bei 95 % TS) bezogen. Diese spezifischen Investkosten sind sehr stark von der jährlichen Chargenanzahl und der getrockneten Menge je Charge abhängig. Die Chargenanzahl ist von der Chargendauer und von der Betriebsweise der Membranfilterpresse abhängig. Die Berechnung wurde deshalb für einen 8 Stunden und einen 24 Stunden Membranfilterpressenbetrieb durchgeführt. Für das Zementwerk wurde mit einer jährlichen Tagesanzahl von 270 Tagen gerechnet, da aufgrund des Drehrohrofenbetriebes nur 270 Tage im Jahr Abwärme für den Trocknungsprozess zur Verfügung steht. Für die Kläranlage und die Papierfabrik wurde ein Membranfilterpressenbetrieb von 365 Tagen im Jahr angenommen.

Eigens durchgeführte Membranfilterpressenversuche ergaben eine um den Faktor 3,7 höhere Ausbeute an getrockneten Bioschlamm zu getrockneten Klärschlamm (siehe Kapitel 7.2.3.3). Für die Berechnung wurde eine 3 fach höhere Bioschlammausbeute je Charge angenommen (Kalkulationssicherheit). Eine geringerer zeitlicher Aufwand je Charge wurde beim Bioschlamm

nicht angenommen.

Von der Firma DEHYDRY Anlagenbau AG wurde ein zeitlicher Aufwand von einer Person-  
stunde je Charge angegeben. Dieser Wert ist nur dann zutreffend, wenn die für die Membran-  
filterpresse zuständige Person, während den automatisierten Abläufen der Membranfilterpresse,  
anderen Arbeiten nachgehen kann. Für einen täglichen Filterpressenbetrieb von 8 Stunden,  
ist dies sicher zutreffend, da sich bei „normalen“ Arbeitszeiten ausreichend viele Arbeiter im  
Zementwerk befinden. Beim 24-Stunden-Betrieb der Kläranlage und des Zementwerkes wurden  
alle Chargen (auch jene 2 Chargen die in die normale Arbeitszeit fallen [Kalkulationssicherheit])  
mit 4 Personalstunden je Charge gerechnet. Der 24-Stunden-Betrieb der Papierfabrik wurde mit  
keinen erhöhten Personalaufwand gerechnet, da in einer Papierfabrik üblicherweise rund um die  
Uhr Arbeiter beschäftigt sind.

Aus den durchgeführten Versuchen ist bekannt, dass für Bioschlämme kein Flockungsmittel  
notwendig ist. Bei den Bioschlämmen wurden deshalb die Kosten für die Flockung mit 0 ange-  
setzt.

Die Kosten der Filterpressentrocknung für Klär- und Bioschlämme bei den verschiedenen Stand-  
orten und Betriebsweisen wurde auf eine Tonne getrocknetes Trockengut bei einen TS-Gehalt  
von 95 % bezogen. Ausgehend von diesen Kosten und den auf 95 % TS bezogenen Entsorgung-  
kosten, lassen sich über den Heizwert der Klär- und Bioschlämme die auf die Energiemenge  
bezogenen Brennstoffkosten ermitteln. Im Falle des Zementwerkes wurde bei dieser Berechnung  
nicht der Transport und die Lagerung der Klär- und Bioschlämme und nicht die Aufbereitung  
des Filtrats sowie des Kondensats berücksichtigt.

Außerdem wurden keine Calcium-, Silizium-, Eisen- und Aluminium- Substitutionserträge der  
Klär- und Bioschlämme berücksichtigt.

Aus [71] wurden die in Tabelle 7.5 angegebenen Werte einer Bandtrocknungsanlage entnommen.  
Wie auch bei der Membranfilterpresse wird darauf hingewiesen, dass die betrachtete Band-  
trocknungsanlage eine höhere Kapazität aufweist, als Klärschlamm in der Kläranlage Chiemsee  
anfällt. Die tatsächlichen, spezifischen Trocknungskosten werden deshalb höher sein als die er-  
mittelten spezifischen Trocknungskosten.

Investkosten	Betriebskosten + Wartung	Klärschlamm- leistung
[€]	[€/Jahr]	[t/h]
4.500.000	70.000	2,25

Tabelle 7.5: Investkosten, Betriebskosten und Klärschlamm-durchsatz einer Bandtrocknungs-  
anlage

Die in [71] betrachtete Bandtrocknungsanlage von Andritz ist ein Kombitrockner der BPGs,  
Papierfangstoffe und Klärschlamm trocknen kann. Es wird davon ausgegangen, dass der von

der Kläranlage Chiemsee auf 28 % TS vorentwässerte Klärschlamm in der Bandrocknungsanlage aufgegeben wird.

Die in Tabelle 7.5 angegebenen Investkosten beinhalten die Investkosten für den Kombitrockner, den Wäscher und den Biofilter. Wie auch bei der Kammerfilterpresse wird angenommen, dass für die thermische Energie keine Kosten anfallen. Die Investkosten der Wärmeauskopplung wurden nicht berücksichtigt.

Anhand der in Tabelle 7.5 angegebenen Daten wurden die, für eine Nutzungsdauer von 12 Jahren, bei einem jährlichen Betrieb von 270 Tagen im Jahr und einer täglichen Betriebszeit von 24 Stunden, spezifischen Trocknungskosten je Tonne Klärschlamm errechnet.

### 7.3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Abbildung 7.19 zeigt die spezifischen Brennstofftrocknungskosten der Klär- und Bioschlämme mit der Membranfilterpresse an den verschiedenen Standorten, die spezifischen Klärschlamm-trocknungskosten mit dem Bandrockner am Rohrdorfer Standort und die momentanen Entsorgungskosten der Klär- und Bioschlämme. Alle Kosten sind auf einen TS von 95 % bezogen.

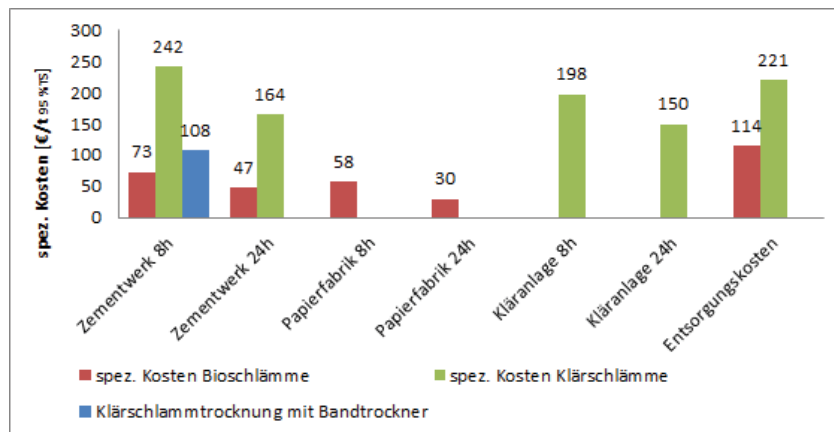


Abbildung 7.19: spezifische Brennstofftrocknungskosten der Klär- und Bioschlämme mit der Membranfilterpresse an verschiedenen Standorten; spezifische Klärschlamm-trocknungskosten mit dem Bandrockner am Standort Rohrdorf und momentane Entsorgungskosten der Klär- und Bioschlämme

Da die Kammerfilterpresse im Rohrdorfer Zementwerk nur 270 Tage im Jahr betrieben werden kann, weist das Rohrdorfer Zementwerk die höchsten Klär- und Bioschlamm-trocknungskosten auf. Bei diesen Kosten ist noch nicht der Klär- und Bioschlammtransport zum Werk mitkalkuliert worden. Dieser Transport wird sich als besonders problematisch herausstellen, da man zum Großteil Wasser transportiert. Ebenfalls denkbar wäre, den vorentwässerten Schlamm anzuliefern und mit Filtrat aus einem vorhergehenden Befüllungsvorgang eine Schlamm-suspension anzurühren, mit der die Kammerfilterpresse beschickt werden könnte. Diese Vorgehensweise ist jedoch technisch aufwendig und sehr prozessintensiv (die Zentrifuge der Kläranlage und die



Siebbandpresse der Papierfabrik könnten nicht außer Betrieb genommen werden, hohe Flokkungskosten [siehe Abbildung 7.20]).

Ein weiteres großes Problem der Klärschlamm-trocknung mit Membranfilterpressen im Rohrdorfer Zementwerk stellt die Behandlung des Filtrates und des Kondensates dar. Diese sind stark mit Nährstoffen belastet und dürfen nicht falls unbehandelt in ein Gewässer eingeleitet werden. Der Betrieb einer werksinternen Kläranlage wird sich als kostenintensiv herausstellen und eine Einleitung in das öffentliche Kanalnetz ist höchstwahrscheinlich mit zusätzlichen Gebühren verbunden und muss mit dem Kläranlagenbetreiber abgesprochen werden.

Eine weitere Möglichkeit der Filtratentsorgung könnte noch in dem Rücktransport des Filtrates zur Papierfabrik und zur Kläranlage liegen, was sich wieder negativ auf die Transportkosten auswirken würde.

Verglichen mit der Band-trocknungsanlage ist die Trocknung mittels Membranfilterpresse 2 mal teurer (beim 8 Stunden Betrieb). Diese Diskrepanz kann nicht alleine durch den geringeren Durchsatz der Membranfilterpresse entstehen. Ein weiterer Grund liegt in den geringen Wartungs- und Betriebskosten der Band-trocknungsanlage. Diese wurden in [71] mit 70.000 Euro/Jahr als konstant angenommen. Ist die Band-trocknungsanlage 270 Tage im Jahr ohne Ausfälle in Betrieb, errechnen sich Betriebs- und Wartungskosten von 8,13 Euro je Tonne getrocknetem (auf 95 % TS) Klärschlamm. Diese Kosten beinhalten die verbrauchte elektrische Energie, Personalkosten, Versicherungskosten, Ersatzteilkosten und Wartungs- und Instandhaltungskosten. Zum Vergleich, die Wartungs- und Betriebskosten der Membranfilterpresse liegen bei 70,5 Euro je Tonne Klärschlamm. Die sehr geringen Wartungs- und Betriebskosten der Band-trocknungsanlage, basieren laut [71] auf firmeninternen Erfahrungen.

Die in Abbildung 7.19 angeführten Kosten der Band-trocknungsanlage, beinhalten ebenfalls die Kosten für die Vorentwässerung des Klärschlammes, mit der in der Kläranlage Chiemsee eingesetzten Zentrifuge. Diese Kosten belaufen sich auf circa 9 Euro je m<sup>3</sup> vor entwässertem Schlamm (das sind 29 Euro bezogen auf 95 % TS).

Verglichen mit der Klärschlamm-trocknung, stellt sich die Bioschlamm-trocknung mehr als 3 mal kostengünstiger dar. Hauptsächlich liegt dies an dem 3 mal höheren Bioschlamm-durchsatz. Aber auch die geringeren Betriebskosten der Bioschlamm-trocknung tragen ihren Teil zu den sehr geringen Trocknungskosten bei (siehe Abbildung 7.20).

## 7 Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche

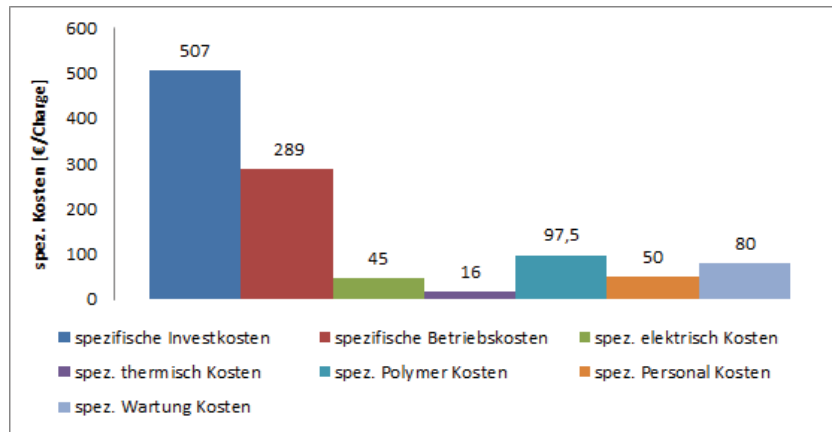


Abbildung 7.20: Aufteilung der Invest- und Betriebskosten der Klärschlamm-trocknung bei 750 Chargen im Jahr und 12 Jahren Betrieb

Die spezifischen Betriebskosten unterteilen sich in spezifische elektrische, thermische, Polymer, Personal und Wartungskosten. Mit fast 100 Euro je Charge stellen die Polymerkosten den größten Anteil an den Betriebskosten (beim 8 Stunden Betrieb). Auf diese Kosten kann im Falle des Bioschlammes und der Band-trocknungsanlage verzichtet werden.

Wird die Membranfilterpresse außerhalb der regulären Arbeitszeit betrieben, steigen die spezifischen Betriebskosten aufgrund der hohen Personalkosten um über 50 % (bezogen auf spez. Betriebskosten bei normalen Personalkosten). Aufgrund der besseren Auslastung der Presse, stellt sich dies jedoch dennoch als wirtschaftlich heraus. Zu berücksichtigen ist, dass bei dem Betrieb einer kleineren Membranfilterpresse, die Personalkosten je Charge in etwa gleich bleiben, aber aufgrund der geringeren getrockneten Menge je Charge, die Personalkosten bezogen auf die getrocknete Menge Klär- und Bioschlamm stark ansteigen.

Am geringsten sind die Kosten für thermische Energie. Diese Kosten sind jedoch auch mit dem größten Unsicherheitsfaktor behaftet, da der thermische Energiebedarf mit 8000 kWh/Charge sehr hoch ist. Schon bei geringen Wärmepreisen wachsen die thermischen Kosten eklatant an und haben dadurch einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Projektes.

Da die momentanen Entsorgungskosten der Klär- und Bioschlämme sehr hoch sind, liegen diese über den ermittelten Trocknungskosten (unter den angenommenen Randbedingungen). Die Differenz der Trocknungskosten zu den Entsorgungskosten bezogen auf den Heizwert des getrockneten Trockengutes ist für die verschiedenen Standorte in Abbildung 7.21 aufgetragen.

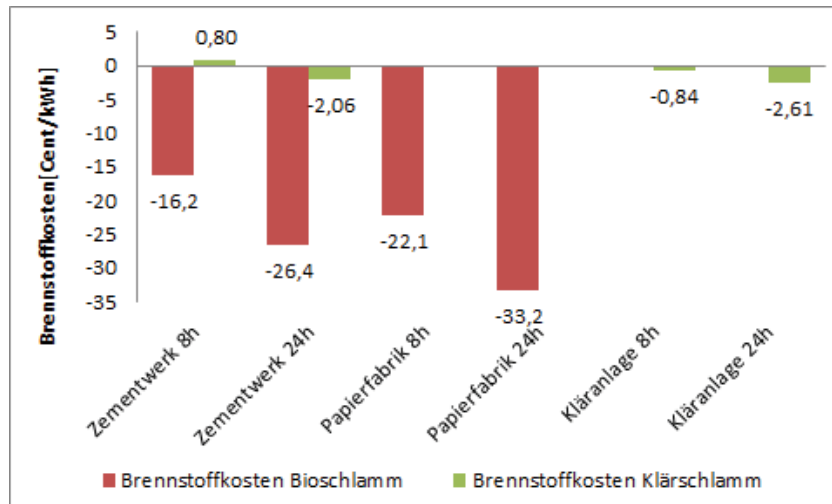


Abbildung 7.21: Brennstoffkosten der getrockneten Klär- und Bioschlämme

Die Bioschlämme weisen aufgrund der hohen Differenzkosten und der geringen Heizwerte die höchsten Brennstoffe Erlöse je kWh auf. Weitere Erlöse sind durch die Rohstoffsubstitution aufgrund des hohen Ascheanteiles und der Aschezusammensetzung der Klär- und Bioschlämme zu berücksichtigen.

Die Trocknungseigenschaften von Gärresten mit einer Membranfilterpresse sind nicht bekannt, deswegen wird angenommen, dass sich Gärreste ähnlich wie Klärschlämme verhalten.

Jährlich fällt in etwa eine Menge von 800 Tonnen Trockensubstanz an Gärresten an. Dies entspricht bei der momentan betrachteten Anlagengröße der Membranfilterpresse einer Chargenanzahl von etwas über 200 Chargen. Für die Berechnung wird jedoch angenommen, dass die Chargenanzahl nicht durch die Mengen an verfügbarem Gärrest limitiert ist, sondern durch die zeitliche Verfügbarkeit vorhandener Abwärmequellen und Arbeitskräfte.

Aufgrund der Annahme, dass sich Gärreste wie Klärschlämme verhalten, weisen Gärreste dieselben spezifischen Trocknungskosten wie Klärschlämme auf (siehe Abbildung 7.19). Um bei diesen Trocknungskosten wirtschaftlich Kohle substituieren zu können, müssten die getrockneten Gärreste bei einer Chargenanzahl von 540 und 1620 Chargen je Jahr einen Heizwert von 10529 und 7139 kWh je Tonne getrocknetem Gärrest (95% TS) aufweisen. Die Erzielung solch eines hohen Heizwertes ist unrealistisch, da der getrocknete Gärrest bei dem momentan angenommenen Substratmix zu 32 % aus anorganischen Material besteht. Zum Vergleich: Der Heizwert von Steinkohle beträgt 8075 kWh je Tonne bei einem Aschenanteil der unter einem Prozent liegt. Deshalb wird eine wirtschaftliche Trocknung der Gärreste mit einer Membranfilterpresse nicht möglich sein.

Vernachlässigt man bei den Gärresttrocknungskosten die Investkosten der Membranfilterpresse, ergeben sich bei Personalkosten von 50 und 200 Euro je Charge zuzüglich den weiteren Betriebskosten, ein mindestens erforderlicher Heizwert von 3053 und 4647 kWh je Tonne getrocknetem

Gärrest, um wirtschaftlich Kohle substituieren zu können. Zum Vergleich: Der Heizwert des Klärschlammes beträgt bei einem Ascheanteil von 32 % und bei einem Trockensubstanzgehalt von 95 % 3235 kWh je Tonne. Nimmt man an, dass der Gärrest der Biogasanlage eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie der untersuchte Klärschlamm aufweist, ist durch die Substitution von Kohle eine Deckung der Betriebskosten der Membranfilterpresse möglich, wenn sich die Personalkosten je Charge bei 50 Euro bewegen.

### 7.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die für die Versuche verwendete Membranfilterpresse genügte den Anforderungen einer industriellen Membranfilterpresse nicht. Durch das Fehlen von wichtigen Messinstrumenten stellte sich eine spätere Versuchsauswertung als schwierig heraus. Trotzdem konnten Ergebnisse erarbeitet werden, die zumindest einen Vergleich zwischen der Klär- und Bioschlamm-trocknung mit einer Membranfilterpresse zulassen. Besonders Bioschlamm lässt sich mit der Membranfilterpresse aufgrund der ausgezeichneten mechanischen Entwässerungseigenschaften sehr gut trocknen. Schon während dem Befüllungsvorgang können weit höhere Trockensubstanzgehalte in der Kammer erreicht werden, als dies beim Klärschlamm möglich ist. Dadurch ergibt sich verglichen mit der Klärschlamm-trocknung eine höhere Chargenmenge. Ebenfalls konnten bei der Bioschlamm-trocknung höhere Trockensubstanzgehalte als bei der Klärschlamm-trocknung erreicht werden. Die in den Versuchen ermittelten Werte wurden teilweise für eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit einer Klär- und Bioschlamm-trocknung herangezogen. Aufgrund der hohen Entsorgungskosten der Klär- und Bioschlämme kann eine Trocknung mittels Membranfilterpresse und anschließende thermische Verwertung wirtschaftlich sinnvoll sein.

Eine Trocknung und thermische Verwertung der Gärreste mit einer Membranfilterpresse stellt sich als nicht wirtschaftlich heraus. Um auf die selben Brennstoffkosten wie Kohle zu kommen, müsste ein unrealistisch hoher Heizwert erzielt werden. Jedoch könnte in Kombination mit einer Klär- oder Bioschlamm-trocknung die Gärrest-trocknung bei niedrigen Personalkosten und schlecht ausgelasteter Membranfilterpresse sinnvoll sein, da durch die Kohlesubstitutionsgewinne die Betriebskosten der Membranfilterpresse gedeckt werden können.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Als energieintensive Branche gerät die Zementindustrie bezüglich der Brennstoffbereitstellung zunehmend unter Druck, da neben Kohle und Heizöl, die für die Zementindustrie sehr wichtigen Ersatzbrennstoffe wie BPGs und Tetra-Pack-Rejekte ständig teurer werden. Ein für die Zementindustrie neuer und interessanter Brennstoff könnte Biogas sein, wenn dieser durch die Kopplung einer Biogasanlage mit einem Zementwerk erzeugt wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Studie zur Prüfung der wirtschaftlichen Durchführbarkeit der Kopplung des Zementwerkes Gmunden und des Zementwerkes Rohrdorf mit einer Biogasanlage zu erstellen. Ebenfalls sollen aus einer Bandbreite möglicher Verfahrensschritte der Biogaserzeugung und -verwertung jene Prozesse eruiert werden, die das größte Potential im Hinblick auf eine wirtschaftliche Kombination mit einem Zementwerk bergen.

Zu Beginn dieser Arbeit, wurde eine umfassende Literaturrecherche zum Stand der Technik der Zementindustrie und der Biogas Produktion und Verwertung durchgeführt. Eine anschließend durchgeführte Substratstudie für das Zementwerk Rohrdorf und das Zementwerk Gmunden bildet die Grundlage für eine Grobdimensionierung der Biogasanlage und für die Konzeptvorüberlegungen der Anlagenkopplung. Im weiteren Verlauf dieser Konzeptentwicklung wurden Klär- und Bioschlamm-trocknungsversuche mit einer Membranfilterpresse durchgeführt, um Erfahrung auf dem Gebiet der Klärschlamm-trocknung und der Bioschlamm-trocknung zu sammeln, sowie Rückschlüsse auf eine mögliche Gärrest-trocknung mit Zementwerksabwärme ziehen zu können.

Im Zuge der Durchführung dieser Arbeit konnten für das Zementwerk Gmunden und Rohrdorf Chancen aber auch Schwierigkeiten ermittelt werden, die eine Biogasanlagenkopplung mit sich bringt. Ein großes Problem sind die fehlenden Synergieeffekte bei der Kopplung mit einer Biogasanlage. Hauptsächlich kann das Zementwerk mit einem Überschuss an günstig verfügbarer Wärme punkten. Ausreichend viel Wärme fällt jedoch auch in einer konventionellen Biogasanlage an, wenn das Gas über ein BHKW verstromt wird. Ein Vorteil für das Zementwerk verglichen mit einer normalen Biogasanlage ergibt sich nur, wenn bestehende Aggregate in die Biogasverwertung miteinbezogen werden können und dadurch eine höhere Wertschöpfung mit geringem Kostenaufwand erreicht werden kann. Im Falle der Biogasverstromung im Zementwerk ist dies durch die Nutzung eines Abhitzekraftwerkes gegeben. Der wirtschaftliche Effekt ist jedoch aufgrund der geringen Strompreise und der fehlenden Einspeisevergütung eher gering.

Ein Vorteil gegenüber alleinstehenden Biogasanlagen ergibt sich bei der Beheizung des Fer-

menters mit überschüssiger Wärme aus dem Drehrohrenprozess, wenn keine Verstromung des Biogases im Werk durchgeführt wird. Dies setzt jedoch eine thermische Verwertung des Biogases oder die Nutzung des Biogases als Kraftstoff voraus. Die thermische Verwertung ist jedoch schwierig, da die Preise der im Zementwerk eingesetzten Regelbrennstoffe zu niedrig sind, um mit Biogas sinnvoll substituiert werden zu können. Der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten auf die Brennstoffpreise ist zu gering, um Biogas selbst bei hohen Zertifikatspreisen (größer 100 Euro/Tonne) einen Kostenvorteil zu verschaffen. Durch den Einsatz zusätzlicher Gasspeicher können zwar die negativen Kohlesubstitutionserlöse reduziert werden, eine Amortisation der sich ergebenden zusätzlichen Kosten wird allerdings nicht erreicht.

Die Nutzung des Biogases als Kraftstoff scheitert an der geringen Biogasleistung und den damit hohen Aufbereitungskosten zu Biomethan. Bei vertretbaren Aufbereitungskosten von Biogas zu Biomethan würde jedoch aufgrund der großen Brennstoffkostendifferenz zwischen Diesel und Biomethan und aufgrund der benötigten Kraftstoffmengen der eingesetzten Steinbruchfahrzeuge, der unternehmensinterne Einsatz von Biomethan als Kraftstoff eine Chance für die Zementwerke darstellen, da sich hohe jährliche Substitutionserlöse je Steinbruchfahrzeug erzielen lassen. Das Zementwerk Gmunden könnte statt Biomethan auch Erdgas als Kraftstoff für die Steinbruchfahrzeuge einsetzen, da dieses Zementwerk einen Erdgasanschluss verfügt. Die jährlichen Substitutionsgewinne fallen bei der Diesel Substitution durch Erdgas noch höher aus als bei der Diesel Substitution durch Biomethan bei vertretbaren Biogasaufbereitungskosten.

Auch eine größere Biogasleistung unter der Voraussetzung ausreichend verfügbarer Substrate, ändert im Falle der thermischen Biogasnutzung kaum etwas an der Wirtschaftlichkeit, solange der Biogaspreis nicht unter dem Kohlepreis fällt. Liegt der Biogaspreis über dem Kohlepreis werden sich bei großer Biogasleistung noch höhere Kohlesubstitutionsverluste ergeben. Eine größere Biogasleistung könnte jedoch die wirtschaftliche Aufbereitung von Biogas zu einspeisbarem Biomethan ermöglichen.

Die Umsetzung einer Biogasanlage in Gmunden und Rohrdorf mit großer Biogasleistung ist jedoch aufgrund der starken Biogaskonkurrenz im Umkreis der beiden Standorte nur schwer möglich. Klassische Biogassubstrate wie Speisereste und Fettabscheider sind aufgrund der aktuellen Marktsituation kaum verfügbar. Selbst ein aggressives Eindringen in den Markt über Substratzuzahlungen ist nicht möglich, da viele Sammler selbst eine Biogasanlage betreiben oder andere Biogasanlagenbetreiber durch kontinuierliche Belieferung davon abhalten wollen, zu Sammlern zu werden. Der Aufbau bzw. die Etablierung eines Logistiksystems für die Versorgung einer Biogasanlage an einem der genannten Standorte ist demnach äußerst problematisch.

An den geringen verfügbaren Substratmengen wird schlussendlich auch der wirtschaftliche Einsatz eines Substrataufschlussapparates (in dieser Arbeit wurde der Bio-Extruders der Firma Lehmann Maschinenbau GmbH betrachtet) scheitern. Die spezifischen Investkosten stellen den überwiegenden Teil der gesamten spezifischen Substrataufschlusskosten dar. Diese Kosten las-

sen sich nur durch eine erhöhte Auslastung des Substrataufschlussapparates senken.

Aufgrund dieser Gegebenheiten errechnet sich bei optimistischen Annahmen ein Biogaspreis der 1,8 % über dem Erdgaspreis liegt und bei realistischen Annahmen ein Biogaspreis der mehr als das 1,45 fache des Erdgaspreises betragen kann.

Die Möglichkeiten der Direktvermarktung wurde im Zuge dieser Arbeit aufgrund der schwierigen Berechnung und der Vielzahl an notwendigen Annahmen nicht geprüft. Wird in Zeiträumen, in denen häufig Heizöl EL substituiert werden muss, eine Direktvermarktung durchgeführt, könnte das BHKW und der Gasspeicher aufgrund des zusätzlichen Verbrauchers kleiner dimensioniert werden. Aber auch für die Direktvermarktung gilt wie bei der thermischen Biogasverwertung, je größer die Biogasanlagenleistung ist, desto geringer wird der Kopplungsvorteil gegenüber einer alleinstehenden Biogasanlage, da die jährliche Menge an wirtschaftlich substituierbaren Brennstoffen (Erdgas, Heizöl EL) gleich bleibt.

Eine thermische Verwertung der Gärreste stellt sich aufgrund der hohen Trocknungskosten mit einer Membranfilterpresse unter den gewählten Voraussetzungen als nicht sinnvoll heraus. Jedoch könnte in Kombination mit einer Klär- oder Bioschlamm-trocknung die Gärresttrocknung bei niedrigen Personalkosten und schlecht ausgelasteter Membranfilterpresse sinnvoll sein, da durch die Kohlesubstitutionsgewinne die Betriebskosten der Membranfilterpresse gedeckt werden können.

Als günstig stellt sich die Ausbringung von Gärresten auf landwirtschaftliche Flächen heraus. Aufgrund der hohen Nährstoffkonzentrationen in den Gärresten, stellt die Düngung mittels Gärresten eine für den Landwirt interessante Option zu anderen teuren Düngemitteln dar. Die Erlöse der pflanzenverfügbaren Nährstoffe übersteigen die Ausbringungskosten der Gärreste. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass der Landwirt die Gärreste kostenneutral auf seine Felder ausbringen wird. Trotz des vorhandenen Flächenbedarfs, aufgrund der Ausbringung von Gülle aus der Viehhaltung, ist ausreichend Fläche vorhanden, um den Gärrestausbringungsweg kurz zu halten.

Aufgrund der angeführten Gegebenheiten können die in dieser Arbeit betrachteten Zementwerke gekoppelt mit einer Biogasanlage unter den momentanen Bedingungen nicht wirtschaftlich betrieben werden.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schritte des Zementherstellungsprozesses in Gmunden [38] . . . . .	11
2.2	Prozentuale Aufteilung der im Gmundner Zementwerk eingesetzten Brennstoffe (nach energetischem Beitrag) [38] . . . . .	12
2.3	Prozessschema des Zementwerks Rohrdorf [9] . . . . .	13
2.4	Prozentuale Aufteilung der im Rohrdorfer Zementwerk eingesetzten Brennstoffe (nach energetischem Beitrag) [61] . . . . .	16
2.5	aufgetretene Betriebsstillstände des Rohrdorf Zementwerkes im Jahr 2012 . . .	17
3.1	Schema des anaeroben Abbaus organischer Substanzen [11] . . . . .	18
3.2	Einteilung der Substrate in die Stoffgruppen Proteine, Fette und Kohlenhydrate nach Kirchgeßner [14] . . . . .	20
3.3	Aufschluss der Zellstruktur [40] . . . . .	24
3.4	Überblick über die möglichen Substratvorbehandlungen, verändert nach [42] . .	24
3.5	Funktionsschema des Batchverfahrens [14] . . . . .	28
3.6	Funktionsschema des Wechselbehälterverfahrens [14] . . . . .	29
3.7	Funktionsschema des Speicherverfahrens [14] . . . . .	29
3.8	Funktionsschema des Durchflussverfahrens [14] . . . . .	30
3.9	Funktionsschema des Durchflussspeicherverfahrens [14] . . . . .	30
3.10	Blockschaltbild einer Biogaseinspeiseanlage [11] . . . . .	36
4.1	Minimaler, Maximaler, und angenommener Abbaugrad relevanter Substrate . .	49
4.2	Biogasanlagenschema, verändert nach [107] . . . . .	51
4.3	spezifische Investkosten der Hygienisierung, des Fermenters und des restlichen Investes, spezifische Substrattransport- und Gärrestentsorgungskosten . . . . .	53
4.4	wirtschaftliche Kennwerte relevanter Substrate . . . . .	55
4.5	Massenaufteilung der im Jahre 2009 in Oberösterreich insgesamt vergorenen Abfälle [81] . . . . .	56
4.6	Abfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen im Umkreis des Gmundner Zementwerkes [92] . . . . .	57
4.7	Substrate für Biogasanlagen und deren Herkunft [94] . . . . .	57
4.8	Vergleich des theoretischen Substratpotentials mit der angenommenen Substratmenge . . . . .	68



## Abbildungsverzeichnis

5.1	Massenprozent der jährlich angenommenen bezogenen Frischmasse einzelner Substrate . . . . .	70
5.2	Volumensprozent des jährlichen Methanertrages einzelner Substrate . . . . .	71
5.3	benötigte landwirtschaftliche Ausbringungsflächen für Wirtschaftsdünger und Gärreste und verbliebene ungenützte landwirtschaftliche Ausbringungsflächen der jeweiligen Gemeinden . . . . .	74
5.4	auf die Tonne Gärrest bezogene Stickstoffnährstofflöse des pflanzenverfügbaren Stickstoffes bei der Ausbringung dickflüssiger Gärreste mit und ohne Schleppschlauch, bei verschiedenen Ausbringungsflächen und verschiedenen Temperaturen	75
5.5	auf die Tonne Gärrest bezogene Differenzstickstoffnährstofflöse der Gärrestausbringung dickflüssiger Gärreste mittels Schleppschlauch zur Gärrestausbringung mittels Drallteller bei verschiedenen Ausbringungsflächen und verschiedenen Temperaturen . . . . .	76
5.6	gesamte Nährstofflöse je Tonne dickflüssigem Gärrest . . . . .	77
5.7	Auf die Energiemehrerträge bezogenen Invest-, Lohn-, Verschleiß- und Strombedarfskosten relevanter Substrate . . . . .	79
5.8	Mindestens erforderliche Gasmehrerträge relevanter Substrate um die Betriebskosten und die gesamten Kosten zu kompensieren . . . . .	80
6.1	Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 50 m <sup>3</sup> /h des Rohrdorfer Zementwerkes . . .	97
6.2	Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 50 m <sup>3</sup> /h des Gmundner Zementwerkes . . .	98
6.3	Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 190 m <sup>3</sup> /h des Gmundner Zementwerkes . .	99
6.4	Erlöse und Aufwände der thermischen Verwertung und der Biogasverstromung bei einer Biogasanlagenleistung von 190 m <sup>3</sup> /h des Rohrdorfer Zementwerkes . .	99
6.5	CO <sub>2</sub> -Einsparung bei Substitution der Brennstoffe Heizöl EL und Erdgas sowie bei der Erzeugung elektrischer Energie , für die EU, Deutschland und Österreich	100
6.6	benötigtes Biogasvolumen (60 % Methananteil) zur Heizöl EL-Substitution aufgetragen über die Zeitspanne zwischen den einzelnen Verbräuchen . . . . .	102
6.7	tägliche Heizölverbräuche Drehrohrofen, Raumheizung und Fermenterheizung über ein Jahr . . . . .	105
6.8	Substitutionserträge, zusätzliche Membrangasspeicherkosten, zusätzliche gesamte Gasspeicherkosten über das gesamte Biogasspeichervolumen . . . . .	106
6.9	Anteile der Biogasverbraucher an dem produzierten Biogas über das gesamte Biogasspeichervolumen . . . . .	107
6.10	täglicher Erdgas Verbrauch Drehrohrofen, Zementmühle, Fermenterheizung, Raumwärme über ein Jahr . . . . .	108

## Abbildungsverzeichnis

7.1	Qualitativer Verlauf des Filtrationsdruckes, des Produkt- und Filtratdurchsatzes und die in die Druckkammer eingefüllte Menge über die Zeit der Kammerfilterpresse [86] . . . . .	116
7.2	Aufbau und Prinzip einer Membranfilterpresse [86] . . . . .	117
7.3	Qualitativer Verlauf des Filtrationsdruckes, des Produkt- und Filtratdurchsatzes, des Pressdruckes und die in die Druckkammer eingefüllte Menge über die Zeit in einer Membranfilterpresse [86] . . . . .	118
7.4	DEHYDRY - Kondensatanfall und Temperaturverlauf [87] . . . . .	119
7.5	Aggregate der verwendeten Membranfilterpresse; Vorderansicht [88] . . . . .	121
7.6	Aggregate der verwendeten Membranfilterpresse; Seitenansicht [88] . . . . .	122
7.7	Schema der verwendeten Membranfilterpresse . . . . .	123
7.8	Auswirkung der Zugabe von Flockungsmittel: kaum geflockter Schlamm (unterer Bereich des Bildes) im Vergleich zu gut geflocktem Schlamm (oberer Bereich des Bildes) . . . . .	125
7.9	Trockensubstanzmasse je Kammer bei unterschiedlichen Klärschlammversuchen	131
7.10	Trockensubstanzmasse je Kammer bei unterschiedlichen Bioschlammversuchen .	131
7.11	errechnete Trockensubstanzgehalte der Kammern nach der Befüllung der Klärschlammversuche . . . . .	132
7.12	errechnete Trockensubstanzgehalte der Kammern nach der Befüllung der Bioschlammversuche . . . . .	132
7.13	gemessener Trockensubstanzgehalt der durchgeführten Klärschlammversuche . .	133
7.14	gemessener Trockensubstanzgehalt der durchgeführten Bioschlammversuche . .	134
7.15	durchschnittliche Trockensubstanzwerte des Klär und Bioschlammes . . . . .	134
7.16	durchschnittliche Trockensubstanzmassen je Kammer sowie der Brennwerte und berechnete Heizwerte der Klär- und Bioschlämme . . . . .	135
7.17	Elementarzusammensetzung und Anteil der organischen Substanz des Klär und Bioschlammes (bei 100 % TS) . . . . .	136
7.18	Elementarzusammensetzung und Anteile der anorganischen Substanz des Klär und Bioschlammes (bei 100 % Asche) . . . . .	137
7.19	spezifische Brennstofftrocknungskosten der Klär- und Bioschlämme mit der Membranfilterpresse an verschiedenen Standorten; spezifische Klärschlamm-trocknungskosten mit dem Bandtrockner am Standort Rohrdorf und momentane Entsorgungskosten der Klär- und Bioschlämme . . . . .	141
7.20	Aufteilung der Invest- und Betriebskosten der Klärschlamm-trocknung bei 750 Chargen im Jahr und 12 Jahren Betrieb . . . . .	143
7.21	Brennstoffkosten der getrockneten Klär- und Bioschlämme . . . . .	144

# Literaturverzeichnis

- [1] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft: Excel Tabelle Gaserträge, Darmstadt, 2013
- [2] ARCHEA Service GmbH: Gaserträge und Nährstoffgehalte - NawaRo, Hess. Oldendorf, 2013
- [3] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Handreichung Biogasgewinnung und Nutzung, 3. überarbeitete Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow, 2006
- [4] Bundesministeriums der Justiz: Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse, 2012
- [5] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Berechnung Biogasgärrest, online unter: <http://www.lfl-design3.bayern.de/iab/duengung/39709/>, abgerufen im April 2013
- [6] Ortner, M.: Biogas als Schlüsseltechnologie zur Energieautarkie eines Schlachtbetriebes, Biogas Forschungs- und Beratungsgruppe IFA Tulln (Hrsg.), Tulln, 2010
- [7] Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Institut für Bodenwirtschaft: Der sachgerechte Einsatz von Biogasgülle und Gärrückständen im Acker- und Grünland, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft (Hrsg.), Wien, 2001
- [8] Joint Research Centre: Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, European Commission (Hrsg.), Mai, 2009
- [9] Zementwerk Rohrdorf: Helmut Leibinger, mündliche Auskunft im April 2013
- [10] Ahrens, R.: Abhitzekraftwerk soll Stromkosten um 30 Prozent senken - Artikel, online unter: <http://www.ingenieur.de/Themen/Energieeffizienz/Abhitzekraftwerk-Stromkosten-um-30-Prozent-senken>, Stand: 08.04.2013
- [11] Bajohr, S., Graf, F.: Biogas - Erzeugung, Aufbereitung, Einspeisung, Oldenbourg Industrieverlag GmbH (Hrsg.), München, 2011
- [12] Ellersdorfer, M.: Integrierte Produktion und Verwertung von Biogas in Zementwerken, Thermische Rohbiogasverwertung, Abwärmenutzung und Gewinnung eines Entstickungsmittels aus Gärresten, Dissertation an der Montanuniversität Leoben, Leoben, Oktober 2012

- [13] Bundesrepublik Deutschland: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 25.10.2008
- [14] Eder, B., Schulz, H.: Biogas Praxis - Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit; 4. verbesserte Auflage, Ökobuch Verlag (Hrsg.), Staufen bei Freiburg, 2007
- [15] Bayrisches Landesamt für Umwelt: Biogashandbuch Bayern - Materialienband, Grundlagen und Technik (Kap. 1.1 - 1.5, Stand Juli 2007); Aschmann, V. et al. (Autoren), Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, 2007
- [16] Looock Biogassysteme GmbH: Effiziente Vergärung von Grassilage mit dem LOOCK Trocken-Nass-Simultan-(TNS-) Verfahren, Projekt „Biokraftwerksring Schleswig-Holstein“, Looock Biogassysteme GmbH (Hrsg.), Hamburg
- [17] Görisch, U., Helm, M.: Biogasanlagen - Planung, Errichtung und Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen, Ulmer Verlag (Hrsg.), Stuttgart, 2006
- [18] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Leitfaden Biogas - von der Gewinnung zur Nutzung, 5. vollständig überarbeitete Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzow, 2010
- [19] Deublein, D., Steinhauser, A.: Biogas from Waste and Renewable Resources - an Introduction, Second revised and - expanded Edition, WILEY-VCH (Hrsg.), Weinheim, 2011
- [20] Harz Energie GmbH.: Erdgasfahrzeuge - die clevere Alternative, Online unter: <http://erdgasfahrzeuge.harzenergie.de/content.aspx?mpid=33>, abgerufen am: 25.04.2013
- [21] gas24: Von der Gasflasche in den Brennraum, online unter: <http://www.gas24.de/cms/89-0-erdgassystem.html>, abgerufen am: 26.04.2013
- [22] Kalam M. A., Masjuki H. H.: An experimental investigation of high performance natural gas engine with direct injection, Energy, Vol. 36, Issue 5, Pages 3563 - 3571, 2011
- [23] Westport: Fuel Injectors, online unter: <http://www.westport.com/is/core-technologies/fuel-injectors/>, abgerufen am: 26.04.2013
- [24] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Lehrbrief 1 - Rohmaterialgewinnung, Düsseldorf
- [25] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 2 - Rohmaterialaufbereitung - Rohstoffe, Mischbett, Düsseldorf
- [26] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 2 - Rohmaterialaufbereitung - Vorzerkleinerung, Düsseldorf

## Literaturverzeichnis

- [27] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 2 - Rohmaterialaufbereitung - Mahltrocknungsanlagen, Düsseldorf
- [28] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 2 - Rohmaterialaufbereitung - Homogenisierung, Düsseldorf
- [29] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Lehrbrief 3 - Klinkerproduktion - Drehofenanlagen, Düsseldorf
- [30] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 3 - Klinkerproduktion - Vorwärmer, Düsseldorf
- [31] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 3 - Klinkerproduktion - Drehrohrofen, Düsseldorf
- [32] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 3 - Klinkerproduktion - Feuerungen, Düsseldorf
- [33] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 3 - Klinkerproduktion - Klinkerkühler, Düsseldorf
- [34] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 3 - Klinkerproduktion - Bypassanlagen, Düsseldorf
- [35] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Kurs 3 - Klinkerproduktion - Brennstoffe, Düsseldorf
- [36] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Lehrbrief 4 - Zementproduktion - Zementmahanlagen, Düsseldorf
- [37] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie: Informationsbrief 2 - Klimaschutz und Emissionshandel, Düsseldorf
- [38] Zementwerk Gmunden: Christian Holl schriftliche Auskunft im Mai 2013
- [39] Zementwerk Rohrdorf: Thomas Skatzedonik mündliche Auskunft im Juli 2013
- [40] Gupta, Priyanka, et al. A re-appraisal on intensification of biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.7 (2012): 4908-4916.
- [41] *Microbiology and Molecular Biology Reviews: Microbial Cellulose Utilization: Fundamental and Biotechnology*, online unter: <http://mmbr.asm.org/content/66/3/506>, abgerufen am: 06.05.2012
- [42] Schwarz B.: Stand und neueste Entwicklung auf dem Gebiet der Substratvorbehandlung für den Biomasseinsatz in Biogasanlagen, Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (Hrsg.), Dresden, 2011

- [43] DSM Biogas: MethaPlus S/L 100 (Info Broschüre), DSM Biogas (Hrsg.), Niederlande, 2011
- [44] BME BiomasseEnergie GmbH: RM-Hochleistungs-Biogasanlage mit Batch Hydrolyse, BME Biomasse Energie GmbH (Hrsg.), Wurmannsquick, 2008
- [45] Demetrium Deutschland AG: TiH Thermisch induzierte Hydrolyse, Demetrium Deutschland AG (Hrsg.)
- [46] Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH: RotaCut, online unter: <http://www.vogelsang.info/produkte/zerkleinerung/rotacut/technik-und-funktionen/funktionsweise/>, abgerufen am 10.05.2013
- [47] Wilhelm Niemann GmbH und Co.: Biogas Dissolver, online unter: <http://www.niemann.de/kreis-biogas-dissolvert/verfahren.html>, abgerufen am: 10.05.2013
- [48] MeWa Recycling Maschinenbau und Anlagen GmbH.: Bio-QZ, online unter: <http://www.bio-qz.de/bio-qz-im-einsatz.html>, abgerufen am: 10.05.2013
- [49] Lehmann Maschinenbau GmbH.: Bio-Extrudiertechnik, online unter: <http://www.lehmann-maschinenbau.de/web/index.php?id=54>, abgerufen am: 10.05.2013
- [50] Huning Maschinenbau GmbH.: Optimatic Hammermühle, Innovative Zerkleinerungstechnik von Feststoffsubstraten für den Einsatz in Biogasanlagen, Huning Maschinenbau GmbH (Hrsg.)
- [51] Europäische Kommission: Verordnung (EU) Nr. 601/2012 der Kommission vom 21 Juni 2012 über die Überwachung von und die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, 2012
- [52] Deutsche Emissionshandelsstelle DEHSt: mündliche Auskunft am 05.06.2013
- [53] Biogas Forum Bayern: Prozessmodell Biogas; Schieder, D. et al. (Autoren), Biogas Forum Bayern (Hrsg.), 2010
- [54] Scheuchl GmbH: Herr Stahl, mündliche Auskunft am 14.05.2013
- [55] SONOTRONIC Nagel GmbH: Ultraschall-Behandlung von Biofeststoffen, online unter: <http://www.sonotronic.de/technologien/ultraschall/ultraschall-behandlung-von-biofeststoffen>, abgerufen am: 21.05.2013
- [56] SONOTRONIC Nagel GmbH: Hochleistungs- Ultraschall- Reaktor - Anwendung Biogasanlagen, online unter <http://www.sonotronic.de/produkte/umwelttechnik/hochleistungs-ultraschall-reaktor/anwendung-biogasanlagen>, abgerufen am: 21.05.2013
- [57] Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH: BioCrack - elektrokinetische Desintegration zur Kostenreduzierung in Kläranlagen, online unter: <http://www.engineered-to-work.com/web/infomaterialien/>, aberufen am 21.05.2013

- [58] Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH: BioCrack: mehr Power für Biogasanlagen, online unter: <http://www.vogelsang.info/produkte/desintegration/biocrack-und-biogas/mehr-power-fuer-biogasanlagen/>, abgerufen am: 21.05.2013
- [59] maxbiogas GmbH: Technologie, online unter: <http://maxbiogas.com/html/de/technologie.html>, abgerufen am: 21.05.2013
- [60] Wels Strom GmbH: Leopold Berger, Auskunft über E-Mail nach Anfrage, Auskunft am 16.05.2013
- [61] Zementwerk Rohrdorf: Manfred Scheurer, mündliche Auskunft am 22.03.2013
- [62] Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.: Gölzower Fachgespräche - Band 30 - Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung - Stand und F&E-Bedarf, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Jänner 2009
- [63] Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V.: Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.), Leipzig, 2009
- [64] Umweltbundesamt Deutschland: Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roslau, 2010
- [65] ULTRAWAVES Wasser und Umwelttechnologien GmbH: Biosonator - Komplettsystem zur Energiegewinnung mit Hochleistungs-Ultraschall, ULTRAWAVES (Hrsg.), Hamburg
- [66] ULTRAWAVES Wasser und Umwelttechnologien GmbH: Herr Page, mündliche Auskunft am 21.05.2013
- [67] MEBA Aufbereitung GmbH: Herr Bachmann, mündliche Auskunft am 29.05.2013
- [68] Eulenstein M.: Fettabscheider in der Praxis - Bemessung und Tipps zum Einbau: FACH.JOURNAL - Sanitär (Hrsg.), 2004
- [69] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 - Band 1, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Wien, 2011
- [70] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 - Band 2, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Wien, 2011
- [71] Müller J.: Verfahrenstechnische und betriebswirtschaftliche Betrachtung der Brennstofftrocknung im Zementwerk Rohrdorf, Masterarbeit, Fachhochschule Rosenheim, Rosenheim, 2009

- [72] Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT): Technologie, Logistik und Wirtschaftlichkeit von Biogas-Großanlagen auf Basis industrieller biogener Abfälle; Bärnthaler J., Bergmann H., (Autoren), BMVIT (Hrsg.), 2008
- [73] Zementwerk Rohrdorf: Patrick Schläfer, mündliche Auskunft am 06.06.2013
- [74] Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend: Technische Grundlagen für die Beurteilung von Biogasanlagen - 2012, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (Hrsg.), 2012
- [75] B+T Umwelt GmbH: Reststoffe, online unter: <http://bt-umwelt.de/de/Entsorgung/Papierindustrie/Reststoffe.html>, abgerufen am: 19.06.2013
- [76] B+T Umwelt GmbH: Kurt Wengenroth, mündliche Auskunft am 19.06.2013
- [77] B+T Umwelt GmbH: Michael Zulauf, mündliche Auskunft am 11.07.2013
- [78] OÖ Landesabfallverband: Was gehört in die Biotonne?, online unter: <http://www.umweltprofis.at/themen/bioabfall-trennen/was-gehoert-in-die-biotonne.html>, abgerufen am 26.06.2013
- [79] Pacan B., Droege S.: Stoffliche und energetische Nutzung von Stroh, PFI Germany (Hrsg.), 2010
- [80] TKV Oberösterreich: Kategorisierung von tierischen Nebenprodukten (TNP) gemäß Verordnung EG Nr. 1069/2009, TKV Oberösterreich (Hrsg.), April 2013
- [81] Amt der Oö. Landesregierung: Oberösterreichischer Abfallwirtschaftsplan 2011, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), August 2011
- [82] Papierfabrik Raubling: Ende, mündliche Auskunft am 22.08.2013
- [83] Papierfabrik Raubling: Ende, schriftliche Auskunft am 15.11.2013
- [84] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (fnr): Gesetze und Verordnungen, EEG 2012, online unter: <http://biogas.fnr.de/rahmenbedingungen/rahmenbedingungen2/gesetzeslage/erneuerbare-energien-gesetz-eeg/>, abgerufen am 26.10.2013
- [85] Bundesministerium der Justiz: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden, online unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/>, abgerufen am 26.10.2013
- [86] Hagen Ernst: Filterpressen, online unter: <http://www.filterpressen.net/>, abgerufen am 03.11.2013
- [87] Mützenberg W., Hoffmann E.: Das DEHYDRY - Verfahren, Basel, Mai, 2005



## Literaturverzeichnis

- [88] JVK: Bernhard Salbaum, mündliche Auskunft am 17.09.2013
- [89] Kläranlage Chiemsee: Herr Freund, mündliche Auskunft am 05.011.2013
- [90] KTBL: Faustzahlen Biogas, 2. Auflage, Darmstadt, 2009
- [91] Edelmann, Werner, ed. Biogas aus festen Abfällen und Industrieabwässern: Eckdaten für Planer-innen. Eidg. Dr.-Sachen-und Materialzentrale, 1996.
- [92] DORIS: Kompost- und Biogasanlagen, online unter: <http://doris.ooe.gv.at/viewer/>, abgerufen am 28.11.2013
- [93] Hochenauer, C.: Grundlagen der Wärmetechnik, Vorlesungsskript, Wels, 2010
- [94] Tretter, H.: Technologieportrait Biogas, Schriftenreihe „Berichte aus Energie- und Umweltforschung“, Ausgabe 36/2010, Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie (Hrsg.), Wien, 2002
- [95] Bundeskanzleramt Rechtsinformationssystem: Gesamte Rechtsvorschrift für Ökostromverordnung 2012, Fassung vom 04.12.2013, online unter: <http://www.ris.bka.gv.at/>
- [96] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW): Dünger- und Pflanzenschutzmittel, online unter: <http://duz.lebensministerium.at/duz/duz/theme/view/1131187/779051/900/658>, abgerufen am 26.06.2013
- [97] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Prozessliste für Strom-Mix, online unter: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/>, abgerufen am: 11.07.2013
- [98] Zementwerk Gmunden: Treml F., Auskunft per Mail im April 2013
- [99] Stadtwerke Rosenheim: mündliche Auskunft im Mai 2013
- [100] Landwirtschaftskammer OÖ: Herr Huemer, mündliche Auskunft im Mai 2013
- [101] Landwirtschaftskammer OÖ: Herr Huemer, schriftliche Auskunft im Mai 2013
- [102] BTS Biogas GmbH: Herr Bürger, mündliche Auskunft im Mai 2013
- [103] UTS Biogastechnik GmbH: mündliche Auskunft im Juni 2013
- [104] Draxler, J.: chemisch/physikalische Abwasserbehandlung, Vorlesungsskript, Leoben, 2014
- [105] Maschinenring Freistadt: Herr Kriechbaumer, mündliche Auskunft im März 2014
- [106] Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen: Merkblatt, 2012

## *Literaturverzeichnis*

- [107] BTS Biogas GmbH: Anlagen, online unter: <http://www.bts-biogas.com/de/anlagen/>, abgerufen am: 09.04.2014
- [108] dm-Dehydrat AG: Dehydri, online unter: <http://www.dmdehydrat.ch/deutsch/>, abgerufen am: 10.04.2014
- [109] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis, online unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/avv/index.html>, abgerufen am: 13.04.2014
- [110] Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Abfallverzeichnisverordnung, online unter: <http://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/abfallressourcen/abfall-altlastenrecht/awg-verordnungen/abfallverzeichnisvo.html>, abgerufen am: 13.04.2014
- [111] He Bio: Eduard Hiptmair, mündliche Auskunft im April 2014