



Section des Sciences et de l'Ingénierie de l'Environnement
Travail de Master - Juin 2009

**Vorteile und Grenzen der Vergärung von leicht
abbaubaren Industrie- und Lebensmittelabfällen
in Abwasserreinigungsanlagen**

Vergleich zur landwirtschaftlichen Vergärung

Bachmann Nathalie

Betreuung: Dr. Holliger Christof (Professor EPFL, Laboratoire de
Biotechnologie Environnementale)

Dr. Wellinger Arthur (Nova Energie, Aadorf)

Ein herzlicher Dank gilt:

Arthur Wellinger für das Engagement zur Realisierung des Projektes und die fachliche Beratung und Betreuung

Christof Holliger für die Unterstützung und Betreuung des Projektes

Beat Ammann und allen Mitarbeitern der arabern, besonders Hermann Kunz für die angenehme Zusammenarbeit, Beratung und Bereitstellung sämtlicher Daten

Markus Bachmann, Marie Ammeter, Magalie Bassan und Elena Comino für inspirierende Diskussionen und redaktionelle Unterstützung

ZUSAMMENFASSUNG

Die Masterarbeit bietet eine umfassende Betrachtung der Co-Vergärung in ARA und landwirtschaftlichen Betrieben. Die Beschreibung der gesetzlichen Regelungen und Prozessabläufe bietet die Grundlage für die nachfolgende Analyse der ARA Bern und von vier landwirtschaftlichen Anlagen.

Für die ökologische Betrachtung wurde eine Stoffflussanalyse durchgeführt, welche eine Quantifizierung des Nährstoffverlustes durch die Co-Vergärung in ARA erlaubt. Auch die Energie- und CO₂-Bilanz der Anlagen wurden zur Beurteilung der Umwelteinflüsse erstellt. Für die ökonomische Untersuchung wurden der Jahresgewinn, die Arbeitsverwertung und die Energiegestehungskosten berechnet, was eine Beurteilung der Rentabilität und Effizienz der Anlagen erlaubt. Die soziale Dimension wurde anhand einer Untersuchung der Sicherheit, des betrieblichen Risikos, des Einflusses auf Arbeitsplätze und die regionale Wirtschaft in die Studie integriert.

Es wurden die folgenden Resultate ermittelt:

- **Stoffflüsse:** In der ARA Bern entsteht durch die Vergärung der Co-Substrate ein jährlicher Verlust von 39 t pflanzenverfügbarem Stickstoff und 14 t Phosphor. Dies entspricht 4.6 % (Stickstoff) resp. 4.8 % (Phosphor) der gesamten Nährstoffe, welche in der ARA dem Stoffkreislauf entzogen werden. Durch eine Auslastung der landwirtschaftlichen Anlagen könnte pro Betrieb bis zu 3.9 t Stickstoff und 1.3 t Phosphor pro Jahr dazu gewonnen werden.
- **Energiebilanz:** In der ARA Bern wird ein Vielfaches der Nettoenergie produziert, die in einem landwirtschaftlichen Betrieb produziert werden kann, was die Wichtigkeit der ARA für die regionale Energieproduktion aufzeigt. Auf die organische Substanz normalisiert (die dem Fermenter zugeführt wird), zeigt die ARA ebenfalls die besseren Resultate.
- **CO₂-Bilanz:** Die Resultate der CO₂-Bilanz sind analog zu jenen der Energiebilanz. Die Verwertung des Granulats als Brennstoff hat einen sehr positiven Einfluss auf die Bilanz.
- **Wirtschaftlichkeitsanalyse:** Die Co-Vergärung der ARA Bern zeigt eine ausgezeichnete Rentabilität. In den landwirtschaftlichen Anlagen besteht eine grosse Variabilität der Wirtschaftlichkeit. Bei einer besseren Auslastung könnten aber alle Betriebe gute finanzielle Resultate ausweisen.
- **Soziale Aspekte:** Es kann eine sehr positive Bilanz der Co-Vergärung in ARA und landwirtschaftlichen Betrieben gezogen werden.

Bezüglich des Nährstoffverlustes in ARA wird eine Grenzziehung vorgeschlagen: wenn der energetische Verlust durch die Nährstoffe grösser ist als die Nettoenergiegewinnung eines Co-Substrats, wird von einer Vergärung in ARA abgeraten. Berechnungen für die Co-Substrate der ARA Bern ergaben, dass sich alle im Grünbereich dieser Grenzziehung befinden.

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Nachhaltigkeit der Co-Vergärung nicht branchenspezifisch sondern von Anlage zu Anlage beurteilt werden soll. Als Faktoren, welche die Nachhaltigkeit beeinflussen, wurden die Anlagegrösse und Auslastung, der Nutzungsgrad der erzeugten Energie, die Transportdistanz der Co-Substrate und – in der landwirtschaftlichen Co-Vergärung – die Lagerungs- und Ausbringtechniken des Gärguts ermittelt.

Zur verstärkten Umsetzung der Nachhaltigkeitskriterien sollte auf schon bestehende Infrastrukturen wie dem Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE) und der landwirtschaftlichen Biogasanlagenbetreiber (Ökostrom Schweiz) gesetzt werden. Über sie sollte auch die Kommunikation und Koordination zwischen ARA und Landwirtschaft gefördert werden.

RESUME

Ce Travail de Master offre une vaste illustration de la co-digestion dans les stations d'épuration (STEP) et les exploitations agricoles suisses. Une description du cadre légal et des procédés techniques permet de comprendre l'analyse approfondie des données issues de la STEP de Berne ainsi que de quatre installations agricoles.

Une évaluation écologique est faite par le biais d'une analyse des flux de matières afin de quantifier les pertes en nutriments à l'issue d'une co-digestion à la STEP. Ainsi, un bilan d'énergie et de CO₂ a été établi. Pour l'évaluation économique, divers indicateurs ont été calculés pour juger la rentabilité et l'efficacité des plans de co-digestion. La dimension sociale est intégrée grâce à l'analyse de la sécurité, du risque financier, de l'impacte sur les places de travail ainsi que sur l'économie régionale.

Dans l'analyse les résultats suivants sont apparus:

- **Flux de matières :** La digestion de déchets organiques externes à la STEP de Berne provoque une perte annuelle de 39 t d'azote (disponible pour les plantes) et de 14 t de phosphore. Ceci correspond à 4.8 % (phosphore) et 4.6 % (azote) de la perte totale de nutriments à la STEP. L'augmentation du taux d'exploitation du digesteur permettrait à un agriculteur de gagner jusqu'à 3.9 t d'azote et 1.3 t de phosphore par année.
- **Bilan d'énergie :** La production d'énergie nette totale de la STEP de Berne est considérable, d'où son importance pour le secteur de production des énergies renouvelables régionales. L'énergie nette, normalisée à la matière organique entrant dans le digesteur, est également meilleur pour la co-digestion à la STEP que pour le milieu agricole.
- **Bilan de CO₂ :** Les résultats sont analogues à ceux du bilan d'énergie. L'utilisation des boues séchées de la STEP en tant que carburant, a un effet très positif sur le bilan.
- **Rentabilité :** La co-digestion de la STEP de Berne présente une excellente rentabilité alors que les plans de digestion agricoles dénotent une grande variabilité. Cependant, l'augmentation des taux d'exploitation des installations agricoles améliorerait leur rentabilité de manière importante.
- **Aspects sociaux :** Un impact très positif de la co-digestion a été constaté pour la STEP et le milieu agricole – à condition d'une rentabilité satisfaisante.

Concernant la perte de nutriments issue de la co-digestion à la STEP, un seuil limite est proposé: si la perte énergétique de nutriments est supérieure au gain d'énergie nette d'un substrat, ce dernier ne devrait pas être digéré dans une STEP. Les calculs ont montré que les substrats de la STEP de Berne sont tous dans la zone acceptable de ce seuil.

La présente étude montre que la durabilité de la co-digestion ne peut pas être jugée selon le secteur – STEP ou agriculture – mais qu'elle dépend des modalités de chaque installation. Comme critères de durabilité ont été déterminés la taille et le taux d'exploitation d'une installation, le taux d'utilisation de l'énergie produite, la distance de transport des co-substrats et, dans le milieu agricole, la manière de stocker et d'épandre le digestat.

Pour une meilleure application de ces critères il est avantageux de profiter d'infrastructures existantes comme le VUE (Verein für umweltgerechte Elektrizität) ou l'association Ökostrom Schweiz. Elles pourraient également servir de plateforme pour une meilleure communication et coordination entre les acteurs de la STEP et de l'agriculture.

ABSTRACT

This Master Project offers a survey on several aspects of co-digestion in wastewater treatment plants (WWTP) and in agriculture. The description of the legal context and the technical processes present the basis for the subsequent analysis of the WWTP in Bern and four agricultural installations.

For the ecological evaluation a material flow analysis was made to determine the nutrient loss due to co-digestion in WWTP. In addition, the energy and CO₂ balance were established to understand environmental impacts. For the economical evaluation financial indicators were calculated in order to judge profitability and efficiency of the installations. The social impacts analyzed include worker security, financial risk, employments and regional economy.

The following results were obtained:

- **Material flow:** Due to the co-digestion in the WWTP in Bern a loss of 39 t Nitrogen (plant available) and 14 t of phosphor is produced. This corresponds to 4.6 % (nitrogen) and 4.8 (phosphor) of all nutrients lost in this WWTP. One farmer could realize a plus up to 3.9 t of nitrogen and 1.3 t of phosphor by taking advantage of the installation's capacity.
- **Energy balance:** The net energy production in the WWTP is considerable and shows the importance for the locale production of renewable energy. Normalized to organic matter, WWTP produce still better results than agriculture.
- **CO₂ balance:** The results are similar to those of the energy balance. The use of dried sewage sludge as fuel has a very positive impact on the balance.
- **Profitability:** The co-digestion of the WWTP in Bern shows a high profitability while the agricultural plants represent a large variability. By improving the degree of capacity utilization all of them would achieve a good profitability.
- **Social aspects:** WWTP and agricultural co-digestion make proof of a very positive social impact – on condition of a good profitability.

Considering the loss of nutrient, a threshold for co-digestion in WWTP is proposed: if energy loss by the nutrients exceeds the net energy production of a co-substrate, it should not be digested in WWTP. Though, all substrates of the WWTP in Bern are within these limits.

The present study shows that sustainability of co-digestion does not depend on the sector but on the modalities of each plant. The main factors determinating durability are size and degree of capacity utilization of the plant, the degree of utilization of produced energy, transport distance of co-substrates and, in agriculture, the stocking and deploying of digestate.

For the realization of these criteria existing infrastructure as the VUE (Verein für umweltgerechte Elektrizität) or the association Ökostrom Schweiz should be contacted. They could also serve as a platform for improved communication and coordination between WWTP and agriculture.

ABKÜRZUNGEN

ARA	Abwasserreinigungsanlage	MF	Massenfluss
BFE	Bundesamt für Energie	NED	Nacheindicker
BHKW	Blockheizkraftwerk	Nm³	Normkubikmeter (0°C, 1013 mbar, trocken)
Bm³	Betriebskubikmeter (Volumen unter gegebenen Umständen)	N_{tot}	Gesamtstickstoff (org. Stickstoff, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N)
EGW	Einwohner Gleichwerte	oTS	Organische Trockensubstanz
EWB	Energie Wasser Bern	P_{tot}	Gesamtphosphor (partikulär und gelöst)
FAT	Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik	SBR	Sequencing Batch Reactor
FFS	Fett- und Flotat Sammelstelle	TS	Trockensubstanz
FS	Frischsubstanz	VB	Vorlagebehälter für Co-Substrate
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung	VED	Voreindicker
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage	VUE	Verein für umweltgerechte Elektrizität
KWM	Kennwertmodell	WKK	Wärme-Kraft-Koppelung
LKW	Lastkraftwagen		

DEFINITIONEN

Actiflo®	Schnellsandfilter der Abwasserreinigung zur Aufkonzentrierung und Abtrennung des Bioschlammes
Bioschlamm	Überschussschlamm aus dem Biostyr (ARA)
Biostyr®	Biologische Abwasserreinigungsstufe. Festbettbiologie, wobei die Träger der Biomasse aus Polystyrolkugeln bestehen
Brüden	Rücklauf aus der Trocknung, stark verdünnt mit gereinigtem Abwasser zur Kühlung (ARA)
Co-Vergärung	Simultane Vergärung von zwei oder mehr Substraten
Frischschlamm	Schlamm aus dem Vorklärbecken (ARA)
Hofdünger	Gülle, Mist, Mistwässer, Gülleseparierungsprodukte, Silosäfte und vergleichbare Abgänge aus der Tierhaltung oder dem Pflanzenbau sowie maximal 20% Material nicht landwirtschaftlicher Herkunft
Recyclingdünger	Dünger pflanzlicher, tierischer, mikrobieller oder mineralischer Herkunft wie Kompost, Gärgut und unverrottetes pflanzliches Material
Trübwasser	Rücklauf aus dem Nacheindicker (ARA)
Zentrat	Rücklauf aus der Entwässerung (ARA)

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	3
RÉSUMÉ.....	4
ABSTRACT	5
ABKÜRZUNGEN	6
DEFINITIONEN	6
TEIL I: EINLEITUNG, ZIELE UND GRUNDLAGEN.....	10
1 EINLEITUNG	11
2 ZIELE.....	13
3 RAHMENBEDINGUNGEN	14
TEIL II: CO-VERGÄRUNG IN ABWASSERREINIGUNGSANLAGEN.....	16
4 EINLEITUNG	17
5 DIE ARA BERN.....	17
6 PROZESSBESCHREIBUNG.....	19
7 SYSTEMGRENZEN.....	21
8 VORGEHEN	22
8.1 Stoffflussanalyse	22
8.2 Energiebilanz	22
8.3 Emissionen.....	23
8.4 Ökobilanz	23
8.5 Wirtschaftlichkeit	23
8.6 Soziale Faktoren	24
9 STOFFFLÜSSE	25
9.1 Massenfluss	25
9.1.1 Allgemeine Situation der ARA.....	25
9.1.2 Aufschlüsselung: Nullwert und Co-Substrate.....	26
9.1.3 Resultate und Plausibilität.....	27
9.2 Nährstoffe.....	29
9.2.1 Stickstofffluss.....	30
9.2.2 Aufschlüsselung: Nullwert und Co-Substrate.....	30
9.2.3 Phosphorfluss.....	31
9.2.4 Aufschlüsselung: Nullwert und Co-Substrate.....	31
9.3 Zusammenfassung und Folgerungen.....	32
10 ENERGIEBILANZ	33
10.1 Energieträger	33
10.1.1 Biogas.....	33
10.1.2 Granulat.....	34
10.2 Fremdenergiebezug für die Co-Substrate	35
10.3 Energieerzeugung durch die Co-Substrate	36
10.4 Nettoenergieproduktion	36
11 EMISSIONEN	37
12 VEREINFACHTE ÖKOBILANZ	38
12.1 Grundlagen des Kennwertmodells	38
12.2 Resultate und Diskussion.....	39

13	WIRTSCHAFTLICHKEIT	40
13.1	Kosten- und Leistungsrechnung.....	40
13.1.1	<i>Vollkostenrechnung der Substratannahme</i>	40
13.1.2	<i>Grenzkostenrechnung</i>	41
13.1.3	<i>Erlöspositionen</i>	41
13.2	Kennzahlen	42
13.2.1	<i>Kalkulatorischer Gewinn</i>	42
13.2.2	<i>Arbeitsverwertung</i>	42
13.2.3	<i>Strom- und Gasgestehungskosten</i>	42
13.3	Zusammenfassung und Folgerungen.....	43
14	SOZIALE FAKTOREN	44
TEIL III: CO-VERGÄRUNG IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BETRIEBEN		45
15	EINLEITUNG	46
16	AUSWAHL DER ANLAGEN UND DATENQUELLEN.....	46
17	PROZESSBESCHREIBUNG.....	47
18	SYSTEMGRENZEN.....	48
19	VORGEHEN	49
19.1	Stoffflüsse	49
19.2	Energiebilanz	50
19.3	Emissionen.....	50
19.4	Vereinfachte Ökobilanz	50
19.5	Wirtschaftlichkeit	50
19.6	Soziale Faktoren	50
20	STOFFFLÜSSE	51
20.1	Biogas	51
20.2	Nährstoffe.....	51
20.3	Zusammenfassung und Folgerungen.....	52
21	ENERGIEBILANZ	53
21.1	Energieträger	53
21.2	Nettoenergieproduktion	53
22	EMISSIONEN	55
23	VEREINFACHTE ÖKOBILANZ	57
23.1	Resultate und Diskussion.....	57
23.2	Sensitivität der Resultate.....	58
23.3	Zusammenfassung und Folgerungen.....	58
24	WIRTSCHAFTLICHKEIT	59
24.1	Grundlagen	59
24.2	Kosten- und Leistungsrechnung.....	59
24.3	Kennzahlen	61
24.4	Zusammenfassung und Folgerungen.....	62
25	SOZIALE ASPEKTE.....	63
25.1	Einflussbereiche	63
25.2	Zusammenfassung.....	63

TEIL IV: AUSWERTUNG – VORTEILE UND GRENZEN DER CO-VERGÄRUNG	64
26 VERGLEICH DER CO-VERGÄRUNG IN ARA UND LANDWIRTSCHAFT	65
26.1 Umwelteinflüsse	65
26.1.1 Stoffflüsse	65
26.1.2 Energie	66
26.1.3 Emissionen	67
26.1.4 Vereinfachte Ökobilanz	68
26.2 Wirtschaftlichkeit	69
26.2.1 Kennzahlen	69
26.2.2 Vergleich der Annahmegebühren	69
26.3 Soziale Faktoren	70
26.4 Folgerungen: Spezifische Vor- und Nachteile	70
27 STOFFLICHE GRENZEN	71
28 PARAMETER DER NACHHALTIGKEIT	72
28.1 Gasausbeute der Co-Substrate	72
28.2 Annahmegebühren	72
28.3 Transportdistanz	72
28.4 Anlagegrösse und Auslastung	73
28.5 Gärgutverwertung	73
28.6 Biogasverwertung	73
29 LÖSUNGSANSÄTZE	74
29.1 Ergänzung der gesetzlichen Regelungen	74
29.2 Anreize bei den Co-Vergärungsanlagen	74
29.3 Anreize bei den Abfallproduzenten	75
30 PERSPEKTIVEN	75
31 SCHLUSSFOLGERUNGEN	76
32 LITERATURVERZEICHNIS	77
33 LISTE DER TABELLEN	78
34 LISTE DER ABBILDUNGEN	79

Anhänge Teil II, ARA:

Anhang	I :	Gasausbeuteversuche
Anhang	II:	TS-Fluss der Schlammbehandlung, Granulatproduktion
Anhang	III:	Zusammensetzung und Gasausbeute der Co-Substrate
Anhang	IV:	Massenfluss - (a) Gesamtfluss, (b) Nullwert, (c) Co-Substrate
Anhang	V:	Stickstofffluss - (a) Gesamtfluss, (b) Nullwert, (c) Co-Substrate
Anhang	VI:	Phosphorfluss - (a) Gesamtfluss, (b) Nullwert, (c) Co-Substrate
Anhang	VII:	Energieverbrauch der Co-Substrate

Anhänge Teil III, Landwirtschaft:

Anhang	VIII:	Input / Output Vergärung - (a) Ist-Situation, (b) Szenario 20 % Co-Substrat, (c) Szenario 50 % Co-Substrat
Anhang	IX:	Energie: Produktion und Eigenverbrauch
Anhang	X:	Nettoenergieproduktion
Anhang	XI:	Basisdaten der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Anhänge Teil IV, Auswertung:

Anhang	XII:	Stoffliche Grenzen der Co-Vergärung
--------	------	-------------------------------------

TEIL I:
EINLEITUNG, ZIELE UND
GRUNDLAGEN

1 EINLEITUNG

Diskussionen um das Thema Energie sind wegen den schwindenden fossilen Ressourcen und den hohen Energiepreisen weltweit aktuell. Die Herausforderungen des Klimawandels und die starke Auslandsabhängigkeit der Energieversorgung bringen erneuerbare und lokale Energien zunehmend ins Zentrum der Interessen. Auch in der Schweiz werden Energiefragen auf nationaler und regionaler Ebene heftig diskutiert. Die Verabschiedung der Revision der Energieverordnung, welche seit Januar 2009 eine kostendeckende Einspeisevergütung für erneuerbare Energien garantiert, bringt der Branche einen zusätzlichen Aufschwung.

Im Rahmen der Erschliessung erneuerbarer Energien gewinnt auch die Produktion von Biogas immer mehr an Bedeutung. Die anaerobe Aufbereitung von organischen Substanzen ist eine ökologisch sinnvolle Verwertung von Abfallstoffen, welche es erlaubt, lokal und CO₂-neutral, einen hochwertigen Kraftstoff bzw. Brennstoff herzustellen. Vergärungsanlagen werden zur Ergänzung von Kompostieranlagen, Kläranlagen und landwirtschaftlichen Betrieben, aber auch als eigenständige Anlagen gebaut.

Um die Biogasproduktion zu steigern, werden in Kläranlagen und in landwirtschaftlichen Gäranlagen oft externe organische Abfälle mitvergoren – man spricht von Co-Vergärung.

Leicht abbaubare Co-Substrate sind wegen ihrem positiven Einfluss auf den Gärungsprozess sehr gefragt. Nachwachsende Rohstoffe sind in der Schweiz für die Vergärung kaum ein Thema, weil die Ackerbauflächen gering sind. Co-Vergärungsanlagen sind vor allem auf Abfälle aus der Lebensmittelindustrie angewiesen. Die Landwirtschaft sowie auch Kläranlagen bemühen sich insbesondere um flüssige, leicht abbaubare Industrieabfälle ohne wesentliche Verschmutzung, da diese ohne grossen Aufwand zu einem wesentlich besseren Gasertrag führen.

Wirtschaftlich sind die ARA im Vorteil, da sie nur mit den Grenzkosten rechnen müssen. Zudem bieten sie logistische Vorteile und können mehr Substrat annehmen; daher sind sie für Grosskunden interessanter. Negativ schlägt zu Buche, dass wegen der Verbrennung der Restorganik der Stoffkreislauf unterbrochen wird. Zurzeit wird die Co-Vergärung in ARA bei den landwirtschaftlichen Vergärern durchwegs negativ dargestellt, ohne dass die nötigen Grundlagen dazu vorhanden sind.

Die wirtschaftlichen, umwelttechnischen und sozialen Dimensionen der Problematik führen auch auf politischer Ebene zu einer wachsenden Relevanz.

In diesem Zusammenhang wird in der vorliegenden Arbeit die Co-Vergärung in ARA und landwirtschaftlichen Betrieben auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene untersucht und verglichen. Die Problematik der Nährstoffe wird analysiert und die Frage evaluiert, wann es Sinn macht, Co-Substrate in ARA zu vergären.

Die weiteren Parameter der Nachhaltigkeit der Co-Vergärung werden bestimmt und es wird ermittelt, welcher Stellenwert ihnen zuzuordnen ist. Damit kann beurteilt werden, ob auf gesetzlicher Ebene ein Bedarf nach Ergänzungen besteht oder wie mit Anreizen bei Co-Vergärungsanlagen die Nachhaltigkeit gefördert werden kann.

Die Arbeit setzt sich aus vier Teilen zusammen. Im **ersten Teil** werden in der Einleitung der Kontext und die Problematik des Themas beschrieben. Die Ziele der Arbeit werden genannt, gefolgt von den gesetzlichen Rahmenbedingungen. Im **zweiten Teil** wird die Vergärung von organischen Abfällen in Kläranlagen analysiert. Dafür werden Daten der ARA Bern verwendet. Der **dritte Teil** setzt sich mit der landwirtschaftlichen Co-Vergärung auseinander. Anhand von Fallstudien werden die Effizienz und Zukunftsfähigkeit, sowie das Auslastungspotential untersucht. Im **vierten Teil** findet die Auswertung der Resultate statt. Co-Vergärung in ARA und Landwirtschaft werden verglichen und die wichtigsten Parameter für ihre

Nachhaltigkeit bestimmt. Die Frage, wann es Sinn macht, Substrate in Kläranlagen zu vergären, wird diskutiert und Lösungsansätze werden vorgeschlagen.

Am Ende der längeren Kapitel stehen eine Zusammenfassung der Resultate und die Folgerungen, was ein verkürztes lesen erlauben soll. Die Struktur der Arbeit ist in Abbildung 1 schematisch aufgezeigt:

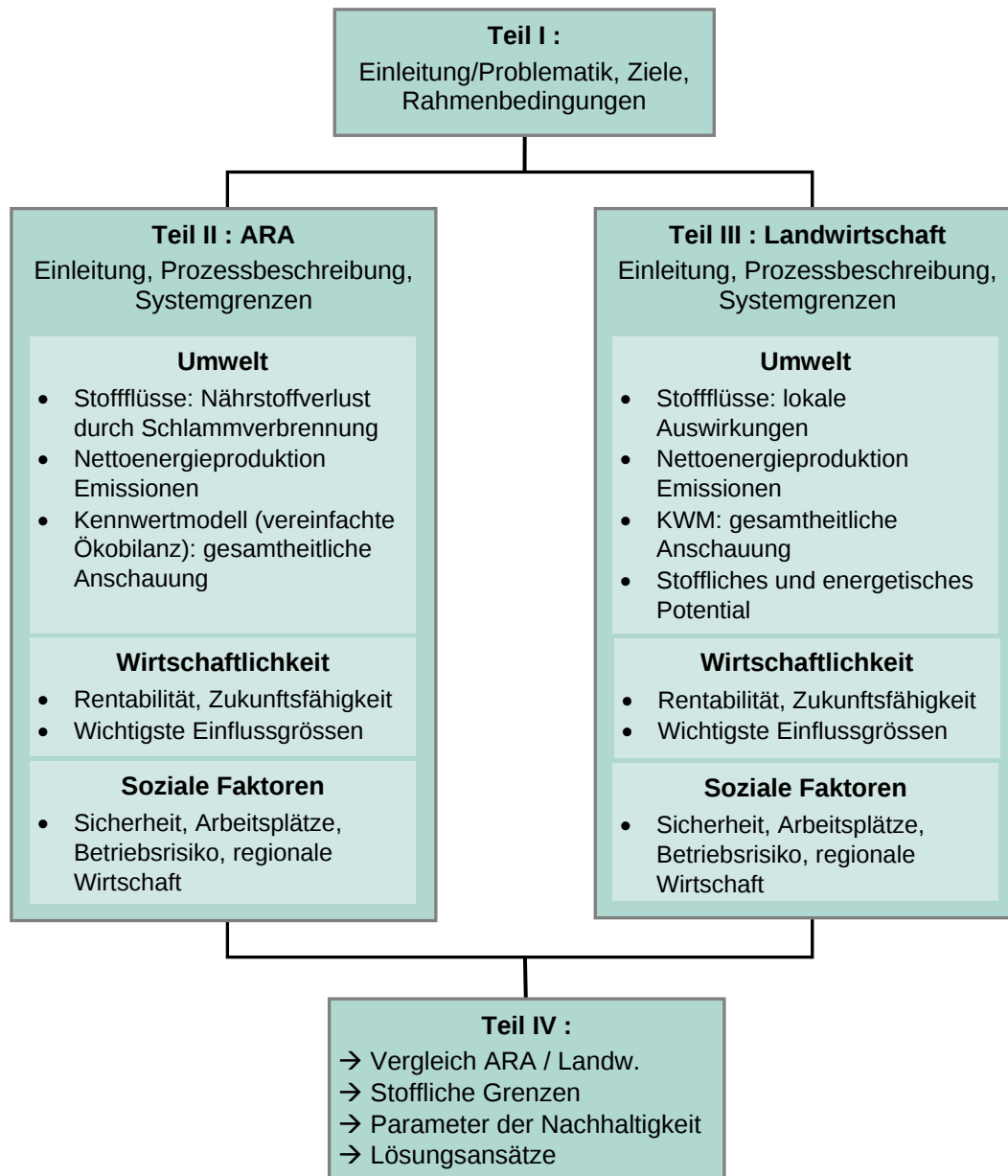


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

2 ZIELE

Das Ziel der Arbeit ist eine umfassende Betrachtung der Vergärung von leicht abbaubaren Industrie- und Lebensmittelabfällen in Abwasserreinigungsanlagen und in landwirtschaftlichen Betrieben. Die spezifischen Vor- und Nachteile sollen hervorgehoben und gewichtet werden. Die wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der Co-Vergärung werden daraus abgeleitet und so eine Entscheidungsgrundlage geschaffen, wann es Sinn macht, organische Abfälle in ARA oder in der Landwirtschaft zu verwerten.

Alle Komponenten der nachhaltigen Entwicklung werden für die Untersuchung in Betracht gezogen; ökologische, ökonomische und soziale Faktoren:

Die **ökologischen Faktoren** werden in der Arbeit am stärksten gewichtet, weil die Problematik der Stoffflüsse sehr aktuell ist und bis jetzt nur wenig sachliche Grundlagen für die Beurteilung existieren. Die präzisen Zielsetzungen sind:

- Ermittlung der Biogas- und Granulatproduktion der ARA Bern. Quantifizierung des Nährstoffverlustes durch die Co-Vergärung.
- Ermittlung der Situation der landwirtschaftlichen Co-Vergärung sowie des stofflichen und energetischen Potentials bei einer Auslastung der Anlagen.
- Ermittlung der Energieeffizienz resp. der Nettoenergieproduktion. Relevanz der verschiedenen Faktoren auf die Energiebilanz.
- Erstellung einer vereinfachten Ökobilanz (Kennwertmodell des VUE) zur gesamtheitlichen Betrachtung – Vergleich mit den eigenen Resultaten.

Bei den **ökonomischen Faktoren** wird die Rentabilität der Co-Vergärung analysiert und damit deren Zukunftsfähigkeit erwogen. Zur Analyse werden die folgenden wirtschaftlichen Kennzahlen berechnet:

- Kalkulatorischer Gewinn: Differenz aus Jahreskosten und –Erträgen
- Arbeitsverwertung: tatsächliche Entlohnung des Arbeitseinsatzes
- Energiegestehungskosten: kostendeckender Energiepreis

Im Weiteren wird untersucht, ob die Preispolitik der ARA zu einem Druck auf die Annahmegebühren führt.

Um die Nachhaltigkeit der Co-Vergärung zu untersuchen, dürfen **soziale Faktoren** nicht vernachlässigt werden. Der Einfluss auf die Gesellschaft ist langfristig ein wichtiger Punkt für die Akzeptanz von Seiten der Bevölkerung und damit auch der Politik. Einflüsse auf Arbeitsplätze, die Sicherheit, das betriebliche Risiko und Unterstützung der regionalen Wirtschaft werden betrachtet.

3 RAHMENBEDINGUNGEN

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen rund um die Co-Vergärung sind in einer Vielzahl von Gesetzes- und Verordnungstexten beschrieben. Hier erwähnt wird eine Auswahl der wichtigsten Bestimmungen auf Bundesebene. Je nach Umständen und Region, sind jedoch weitere, oft auch kantonale Regelungen zu beachten.

Die wichtigsten Bestimmungen sind in den folgenden Gesetzestexten zu finden:

- Umweltschutzgesetz. USG, Stand 1. August 2008.
- Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen. ChemRRV, Stand 1. September 2008.
- Stromversorgungsgesetz. StromVG, Stand am 17. März 2008.
- Mineralölsteuergesetz. MinöStG, Stand am 1. Juli 2008.
- Dünger-Verordnung. DüV, Stand am 1. Oktober 2008.
- Verordnung über die Entsorgung von tierischen Nebenprodukten. VTNP, Stand 1. Juli 2008.
- Raumplanungsgesetz. RPG, Stand am 1. August 2008.
- Gewässerschutzgesetz. GSchG, Stand 1. August 2008.
- Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft. DZV, Stand 1. Oktober 2008.
- Energieverordnung. EnV, Stand 1. Januar 2009.

In Tabelle 1 wird auf die wichtigsten Artikel hingewiesen, von welchen Auswirkungen auf die Co-Vergärung ausgehen.

Es wird deutlich, dass die Rahmenbedingungen für ARA und landwirtschaftliche Betriebe verschieden sind. Ein wichtiger Punkt ist das Verbot über die Verwendung von Klärschlamm als Dünger. Das Gärgut aus den Co-Substraten der ARA ist mit dem Klärschlamm vermischt und muss somit auch verbrannt werden. Viel wertvoller Stickstoff und Phosphor können jährlich deswegen nicht in den Boden zurückgeführt werden. Der Grund für das Verbot sind die Schadstoffe, die im Klärschlamm vorkommen können, sowie auch die Befürchtung, dass durch Abwässer aus Schlachthöfen der Klärschlamm mit BSE-auslösenden Prionen belastet sein könnte.

Ein einschränkender Punkt für die Landwirtschaft ist die Limitierung der Co-Substrate (RPG und DüV). Um mit der Landwirtschaftszone konform zu sein, dürfen nicht mehr als 50 % Co-Substrate, also Substrate nicht landwirtschaftlicher Herkunft, vergoren werden.

Innerhalb der Richtlinien der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) sind es sogar höchstens 20 % Co-Substrat. Es besteht keine Verpflichtung, die KEV-Richtlinien einzuhalten, wer sie aber befolgt, profitiert von wesentlich höheren Einspeisevergütungen.

Obwohl sie ihre Tätigkeit unter verschiedenen Rahmenbedingungen ausführen, müssen Vergärungsanlagen in ARA und in landwirtschaftlichen Betrieben effizient und rentabel wirtschaften, um längerfristig überleben zu können. So muss jede Anlage ihr Geschäft im gegebenen gesetzlichen Rahmen optimieren. Ob auf ökologischer Ebene eine gesetzliche Lücke vorliegt, soll unter anderem in dieser Arbeit diskutiert werden.

	Inhalt:	Betrifft:
USG Art. 10 & 10 a-d	Gewährleistung von technischen Sicherheitsvorkehrungen, Überwachung und Alarmorganisation. Meldepflicht ausserordentlicher Ereignisse. Umweltverträglichkeitsprüfung und –bericht.	Vergärungsanlagen allgemein
EnV Anhang 1.5	Kostendeckende Einspeisevergütungen (KEV): Anschlussbedingungen für Biomasseenergieanlagen.	Vergärungsanlagen allgemein
MinöStG	Befreiung von der Mineralölsteuer.	Vergärungsanlagen allgemein
VTNP Anhang 4, Ziffer 34	Regelungen bei der Verwertung von tierischen Nebenprodukten in Biogasanlagen (Hygienisierung).	Vergärungsanlagen allgemein
ChemRRV Anhang 2.6, Ziffer 2.1	Klärschlamm darf nicht als Dünger abgegeben werden.	Kläranlagen
DZV Art. 6	Ausgeglichene Nährstoffbilanz bezüglich Stickstoff und Phosphor.	Landwirtschaftliche Betriebe
ChemRRV Anhang 2.6, Ziffer 2.2 & 3.2.1	Angaben der Qualitätsanforderungen für Gärgut als Dünger (Grenzwerte für Schadstoffe, Anforderungen für inerte Fremdstoffe, etc.). Einschränkungen bezüglich der Verwendungsmengen.	Landwirtschaftliche Betriebe
RPG Revision vom 23.03.2007	Zonenkonformität von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. (Es müssen hauptsächlich landw. Substrate vergoren werden, Transportdistanz der Co-Substrate höchstens 50 km).	Landwirtschaftliche Betriebe
DüV Revision vom 01.01.2008	Vorschriften über Bewilligungen und Anmeldepflicht von festem und flüssigem Gärgut als Dünger. Pflicht, ein Verzeichnis über die Abnehmer des Düngers zu führen.	Landwirtschaftliche Betriebe

Tabelle 1: Wichtigste Gesetzestexte zur Co-Vergärung

TEIL II:

CO-VERGÄRUNG IN ABWASSERREINIGUNGSANLAGEN



4 EINLEITUNG

In über 450 Abwasserreinigungsanlagen der Schweiz wird der Klärschlamm zur Energiegewinnung vergärt [18]. Durch die Umsetzung des Biogases in Wärme und Strom können die Energiekosten der Anlage gesenkt werden. Überschüsse an Biogas, Strom und Wärme können vermarktet werden. Die Faultürme der ARA sind meist grosszügig dimensioniert. Zu ihrer Auslastung können organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe angenommen werden. Dies bringt nicht nur eine wesentlich bessere Gasausbeute, sondern auch Einnahmen über die Entsorgungsgebühren.

Die Co-Vergärung in ARA wird oft kritisiert, weil durch die Verbrennung der Restorganik Stoffkreisläufe unterbrochen werden. Die Nährstoffe können so nicht in den Boden zurückgeführt werden. Dieser Teil der Studie soll zur Klärung der positiven und negativen Aspekte der Co-Vergärung in ARA beitragen. Die quantitative Ermittlung der Stoffflüsse, der Energiebilanz und der Wirtschaftlichkeit soll die Grundlage bieten für eine sachliche Beurteilung.

Die ARA Bern stellt ein gutes Beispiel für eine Anlage mit Co-Vergärung dar und dient dieser Studie als Grundlage. Aufgrund der genauen und konsequenten Datenerfassung des Betriebs können die ökologischen und ökonomischen Analysen durchgeführt werden.

Die Verfahrensschritte, Technologien und vor allem auch das Management sind natürlich von Anlage zu Anlage verschieden. Folglich können die hier beschriebenen und ermittelten Aspekte nicht verallgemeinert werden. Da die ARA Bern als sehr effizient und fortschrittlich gilt, können die Resultate jedoch als Potenzial für Kläranlagen angesehen werden.

5 DIE ARA BERN

Seit Inbetriebnahme der ARA Bern 1967 wird der anfallende Klärschlamm vergärt. Zu Beginn wurde das Biogas für die Beheizung der Faulräume und des Dienstgebäudes eingesetzt. So konnte schon damals die Verpflichtung der ARA, Wärme aus erneuerbaren Energie zu verwenden, eingehalten werden. Um neben Wärme auch Strom zu erzeugen, wurde die Anlage mit Gasturbinen ausgerüstet, diese wurden später durch ein Blockheizkraftwerk ersetzt.

Vor etwa 5 Jahren hat die ARA begonnen im grösseren Rahmen organische Abfälle aus Gewerbe und Industrie anzunehmen und gemeinsam mit dem Klärschlamm zu vergären. Diese Co-Vergärung erforderte Investitionen für die Annahme, Aufbereitung und Lagerung der Substrate, brachte jedoch zusätzliche Einnahmen durch Annahmgebühren und einen höheren Gasertrag. Nun konnte ein Teil des Gases vermarktet und die gesamte Gasnutzung optimiert werden.

Heute muss praktisch kein Gas mehr abgefackelt werden und mit dem Blockheizkraftwerk wird nicht mehr Wärme produziert, als auch genutzt werden kann. Ein Drittel des produzierten Biogases dient 30 Bussen der Stadt Bern als Treibstoff.

Die wichtigsten Anlagedaten der ARA Bern sind in Tabelle 2 beschrieben:

Inbetriebsetzung	-	1967
Ausbaugrösse	EGW	350'000
Elektrische Leistung BHKW	kW	640
Faulraumvolumen	m ³	18'000 (3 × 6'000)
Anfallender Klärschlamm	t FS/a	229'950
Angenommene Co-Substrate	t FS/a	27'977
Biogasproduktion	Nm ³ /a	5'347'250

Tabelle 2: Anlagedaten der ARA Bern

Im Jahr 2008 wurden der ARA 27'977 Tonnen Co-Substrate geliefert, im Schnitt beläuft sich dies auf 76.6 Tonnen pro Tag. In ihrer Zusammensetzung sind die Substrate sehr unterschiedlich; um einen Überblick zu gewinnen, sind sie in Tabelle 3 inklusive Herkunftsbranche aufgelistet.

Co-Substrate	Herkunft , Beschreibung	Menge [t/d]
Hefezellwände	Cellulosefabrik, Zellwände lysiert	29.3
Kaffeepresswasser	Herstellung von löslichem Kaffee	15.5
Speisereste	Gewerbeküchen	13.4
Fettabscheider	Kanalreinigung	6.7
Flotat	Geflügel-Schlachthof	4.3
Milchserum	Milchindustrie, „Molke“	2.9
Enteisungswasser	Flughafen	2.6
Ethanol-Wassergemisch	Chem. Industrie, 40% Ethanol	0.9
Getränke Abfall	Fruchtsaft und Süssgetränke	0.8
Speiseöl	Fettverarbeitung	0.1
TOTAL		76.6

Tabelle 3: Co-Substrate der ARA Bern

In der ARA hat es zwei Annahmestellen für die Co-Substrate:

- Einen Trichter, in den das Material vom Lastwagen hineingeschüttet werden kann.
- Ein Stutzen, über welchen Fette und Flotate angenommen werden können (FFS).

Direkt oder über eine Hammermühle (Zerkleinerung und Beseitigung von Verunreinigungen) wird das Material in einen der drei beheizten Vorlagebehälter geleitet.

Im Weiteren nimmt die ARA Schlamm von anderen Kläranlagen an, dieser ist jedoch schon ausgefault und wird erst nach der Vergärung beigefügt. Dabei handelt es sich um die folgenden Schlämme:

- Nasser Faulschlamm der ARA Worblaufen, TS = 3.8 %. Er wird dem NED beigefügt.
- Nasser Faulschlamm aus diversen Kläranlagen der Region Bern, TS = 8 %. Er wird der Homogenisierer beigefügt.
- Entwässerter Faulschlamm aus diversen Kläranlagen der Region Bern , TS = 27.4 %. Er wird der Trocknung beigefügt.

Die Fremdschlämme zählen in dieser Studie zum Nullwert (nicht als Co-Substrate).

6 PROZESSBESCHREIBUNG

Um ein besseres Verständnis der Prozesse zu erlangen, werden in diesem Kapitel die Verfahrensschritte für die Vergärung der externen Abfälle in der ARA Bern im Einzelnen beschrieben. In Abbildung 2 sind sie schematisch dargestellt.

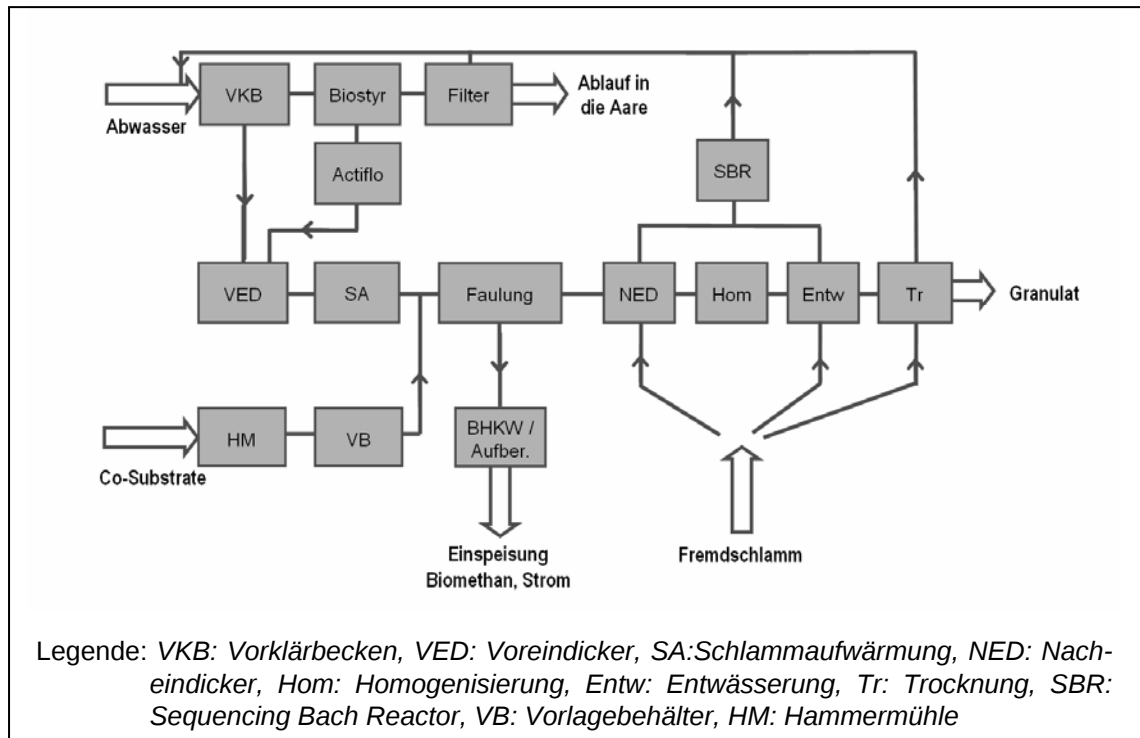


Abbildung 2: Prozessbeschreibung der Co-Vergärung in ARA

Annahme, Aufbereitung und Lagerung der Co-Substrate

Die Co-Substrate werden per Lastwagen der ARA geliefert und an einer der beiden Annahmestellen entladen: bei der Fett- und Flotatannahmestelle (FFS) werden die Substrate mit Hilfe eines Stutzens abgepumpt. Speisereste und ähnliches werden in einen Trichter abgeworfen. Wenn nötig werden die Substrate in die Hammermühle befördert, wo sie zerkleinert und von Störstoffen befreit werden. Ansonsten werden sie direkt in einen der drei Vorlagebehälter gepumpt. Fette und Flotate werden dort auf 60°C, der Rest auf 35°C erhitzt. Über ein Leitsystem werden die Faultürme kontinuierlich beschickt.

Faulung

Die Faulung besteht aus 3 Faultürmen (2 parallel, 1 nachfolgend in Serie). Abwechselnd werden in vorgewählten Zeitintervallen Faulturm 1 oder 2 beschickt. Im Innern halten Rührwerke den Schlamm möglichst homogen. Aus dem Faulturm 3 wird Impfschlamm zurückgepumpt, um die mikrobiologische Aktivität hoch zu halten.

Bei der Faulung entsteht das energiehaltige Biogas, welches entschwefelt und dann zur Lagerung in einen Niederdruckgasometer befördert wird. Der ausgefaulte Schlamm wird in den Nacheindicker geleitet.

Biogasverwertung

Etwa zwei Drittel des Gases werden direkt auf der Anlage verwertet. In zwei Heizkesseln wird es zu Wärme konvertiert, in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zu Wärme und Strom.

Die Wärme wird grössten Teils in der Schlamm Trocknungsanlage verwendet, der Strom auf der gesamten Anlage, wobei Überschüsse ins Stromnetz eingespiessen werden. Das andere Drittel des Gases geht ins Erdgasnetz der EWB. Dafür muss es zuerst eine Aufbereitungsanlage durchlaufen, wo der Methangehalt auf mindestens 96 % angereichert wird.

Nacheindicker (NED)

Der ausgefaulte Schlamm wird in Doppelmantel-Rohrschlangen gekühlt, damit er im NED besser absetzt. Dem NED wird auch Faulschlamm der ARA Worblauen beigelegt. Hier findet eine statische Eindickung statt, das Trübwasser im Überstand wird abgepumpt und in den SBR geleitet.

Homogenisierung, Entwässerung

Die Homogenisierung dient als Vorstufe der Schlamm entwässerung. Damit wird sichergestellt, dass der Faulschlamm einen gleichmässigen Trockensubstanzgehalt aufweist, was ein automatisches Fahren der Zentrifuge erlaubt.

In zwei Zentrifugen wird der Schlamm auf einen TS-Gehalt von etwa 33 % entwässert; das Zentrat wird dem SBR-, der Schlamm der Trocknungsanlage zugeführt.

Trocknung / Granulatherstellung

Der eingedickte Faulschlamm wird in einer Wirbelschicht-Trocknungsanlage nun noch thermisch entwässert. Das staubfreie und energiereiche Produkt, das Granulat, hat einen TS-Gehalt von noch ca. 92 %.

Die Abluft wird mit gereinigtem Abwasser gekühlt, wobei der Dampf kondensiert. Die so genannte Brüde wird in den Zulauf der ARA zurückgeleitet.

Rückbelastung der Kläranlage durch das Prozesswasser

Das bei der Faulung anfallende Prozesswasser (Trübwasser und Zentrat) ist stark ammoniumhaltig und stellt eine zusätzliche Belastung für die ARA dar. In der Regel wird es vor der Rückführung in die Wasserbehandlung durch den Sequencing Batch Reactor (SBR) geleitet. Dort bewirkt ein Wechsel von aeroben und anaeroben Sequenzen die Entfernung des Stickstoffes (Nitrifikation / Denitrifikation). Der Ablauf des SBR, der vor allem noch mit hohen Konzentrationen an Nitritstickstoff belastet ist, wird in den Zulauf der ARA geleitet und durchläuft die gleiche Behandlung wie das kommunale Abwasser.

Bei ungenügender Kapazität des SBR wird das Prozesswasser in den Biostyr geleitet.

Abluftsystem

Bei den verschiedenen Verfahrensschritten entsteht stark geruchsbelastete Abluft. Über ein aufwendiges Netz von Rohrleitungen wird diese abgesaugt und zum Biostyr gefördert, wo sie der Belüftung des aeroben Behandlungsbeckens dient. Durch die Bakterien des Biostyr vorgereinigt und arm an Sauerstoff, wird die Abluft an der Wasseroberfläche wieder abgesaugt und zu den Biofiltern geblasen. Letztere bestehen aus Containern mit Hackschnitzelfüllung als Träger von Mikroorganismen, welche die Verunreinigungen in der Abluft als Nahrungsquelle nutzen und so die Luft desodorieren.

7 SYSTEMGRENZEN

Zeitliche Eingrenzung: Für die Studie werden Daten aus dem Betriebsjahr 2008 verwendet. Fehlende Werte werden durch aktuelle Messungen (2009) ergänzt.

Räumliche Eingrenzung: Die Vergärung der Co-Substrate wird betrachtet, wobei alle Verfahrensschritte zur Vorbehandlung der organischen Abfälle und zur Nachbehandlung des flüssigen und festen Gärguts in die Studie miteinbezogen werden.

Die Abwasserreinigung und die Vergärung des Klärschlammes liegen ausserhalb der Systemgrenzen. Wegen der Rückläufe des Prozesswassers in das Abwasser, müssen jedoch sämtliche Verfahrensschritte der ARA betrachtet werden.

Ebenfalls innerhalb der Systemgrenzen sind die Transportwege der Co-Substrate und die Verwertung von Biogas und Granulat.

In der Abbildung 3 sind die Systemgrenzen schematisch dargestellt.

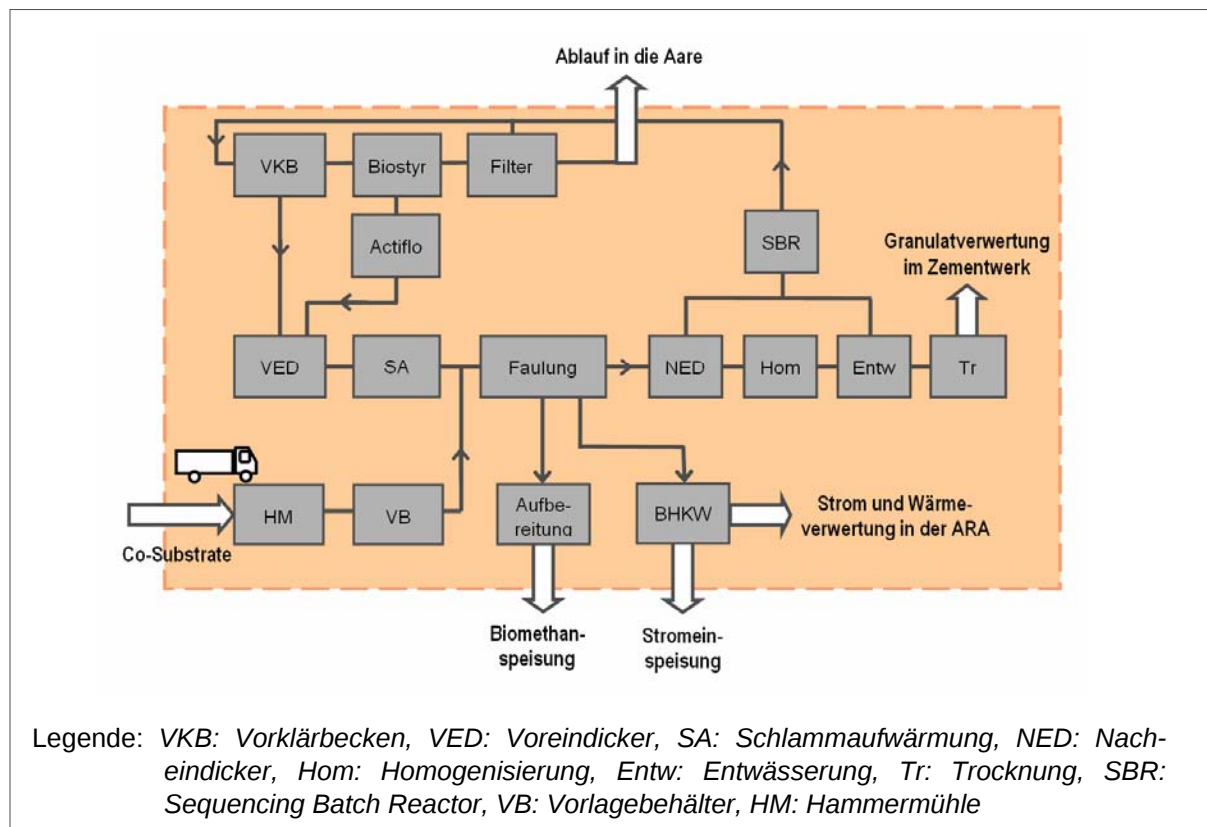


Abbildung 3: Systemgrenzen der Co-Vergärung in ARA

8 VORGEHEN

Es wird eine ökologische, ökonomische und soziale Betrachtung vorgenommen, wobei die ökologische Untersuchung aus mehreren Teilen besteht: einer Stoffflussanalyse, einer Energiebilanz, einer Betrachtung der Emissionen und einer vereinfachten Ökobilanz. Die Vorgehensweise für die einzelnen Etappen wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

8.1 Stoffflussanalyse

Es werden der Massenfluss sowie der Stickstoff- und Phosphorfluss analysiert. In einem ersten Schritt wird jeweils die Situation der ARA Bern (2008) dargestellt. Der Stofffluss wird anschliessend in den Nullwert, also die Situation ohne Co-Vergärung, und den Stofffluss der Co-Substrate aufgeschlüsselt.

Für die Ermittlung des Nullwerts des **Massenflusses** wurden zwei Varianten geprüft:

- 1) Erhebung von Daten, als noch keine Co-Substrate vergärt wurden. Verwendung der Messwerte als Nullwert.
- 2) Berechnung aufgrund der Ist-Situation.

Variante 1 stellte sich als nicht durchführbar heraus. Einerseits, weil die ARA Co-Substrate annimmt, seit sie in der heutigen Form besteht (Inbetriebnahme des Biostyr im Jahre 2004); andererseits, weil die Zuflussbedingungen in den letzten Jahren durch die Fremdwassereliminierung relevant geändert haben.

Somit wird Variante 2 weiterverfolgt. Durch die detaillierte Betrachtung der Situation werden Massenverteilungsgrade für jeden Prozess ermittelt. Mit den Daten wird ein Excel-Modell erarbeitet, um den Nullwert zu simulieren. Das Modell wird mit Daten aus vorgängigen Jahren geprüft. Der Massenfluss der Co-Substrate wird durch Differenzrechnung bestimmt.

Für die Berechnung der **Biogasproduktion** aus Klärschlamm werden Literaturwerte verwendet. Für die wichtigsten Co-Substrate wurde die Gasausbeute im Labor von Nova Energie in Aadorf bestimmt, die fehlenden Werte werden der Literatur entnommen.

Um den Fluss der **Nährstoffe** nach Klärschlamm und Co-Substraten aufzuschlüsseln, werden die Abbaugrade der einzelnen Verfahrensschritte anhand der Daten ermittelt. Damit wird auch ein Excel-Modell erarbeitet und der Nullwert berechnet. Der Nährstofffluss der Co-Substrate wird durch Differenzrechnung bestimmt.

8.2 Energiebilanz

Zur Vergärung der Co-Substrate wird einerseits Energie benötigt und andererseits in Form von Biogas und Gärgut erzeugt. In der Energiebilanz werden Verbrauch und Erzeugung einander gegenübergestellt.

Um die Energiebilanz zu erstellen, wird die ARA als Blackbox betrachtet. D.h. der Fremdenergiebezug wird der Energieerzeugung gegenübergestellt; den internen Kreisläufen wird indirekt über den niedrigeren Bezug Rechnung getragen.

Bezug und Erzeugung der Co-Substrate müssen also von jenen des Abwassers abgegrenzt werden. Dafür wird der Energieverbrauch resp. -Ertrag der Co-Substrate bestimmt und ins Verhältnis zum Gesamtverbrauch resp. -Ertrag gestellt. Dieses Verhältnis wird dann auf den Fremdenergiebezug und die Erzeugung der gesamten ARA angewendet.

Der Elektrizitätskonsum der einzelnen Prozesse der ARA ist sehr gut dokumentiert. Für den Verbrauch der Co-Substrate in den einzelnen Prozessen wird jeweils eine relevante

Bezugsgrösse bestimmt (Massenanteil, Anteil TS oder Abwasserbelastung durch N_{tot}) und nach ihr wird der Verbrauch proportional aufgeteilt.

Der thermische Energiekonsum wird nicht konsequent gemessen. So muss er anhand der thermischen Wärmekapazität und des Temperaturunterschiedes berechnet werden.

Der Energieverbrauch durch den Transport der Co-Substrate wird ebenfalls in die Bilanz einbezogen. Er wird aufgrund der Masse, Distanz und Fahrzeugtyp ermittelt.

8.3 Emissionen

Bei der Vergärung entstehen Stoffe, die schädlich auf Mensch und Klima wirken, wenn sie in die Umwelt gelangen. So zum Beispiel Methan, Lachgas oder Ammoniak. Da in der ARA der Gasschlupf sehr klein ist, kann dieser jedoch vernachlässigt werden.

Ermittelt wird in diesem Kapitel die CO_2 -Bilanz, wobei die Emissionen durch den Fremdenergieverbrauch (inkl. Transport) und die Einsparungen durch die Abgabe der CO_2 -neutralen Energieträger (Biomethan, Strom und Granulat) in Betracht gezogen werden.

8.4 Ökobilanz

Eine vereinfachte Ökobilanz der Biogasproduktion wird erstellt. Dies geschieht mit Hilfe des Kennwertmodells des Vereins für Umweltgerechte Elektrizität (VUE), welches im Rahmen der *naturemade Star* Zertifizierung entwickelt wurde.

Das Modell berechnet aufgrund verschiedener Kriterien Ecoindicator99-Punkte und stellt diese ins Verhältnis zu einem Referenzmodell. Der resultierende Prozentwert dient der Beurteilung der Anlage und stellt eine Vergleichsgrösse dar. Ausserdem kann den Resultaten entnommen werden, welche Prozesse die grösste Umweltbelastung darstellen.

8.5 Wirtschaftlichkeit

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird eine Spartenrechnung in Bezug auf die Annahme und Vergärung der Co-Substrate durchgeführt. Die Werte werden der Finanzbuchhaltung der ARA entnommen.

Als Erstes wird eine Kosten- und Leistungsrechnung durchgeführt. Bei Prozessen, die ausschliesslich den Co-Substraten dienen (Annahme, Aufbereitung, Lagerung), werden die Vollkosten berechnet, d.h. fixe und proportionale Kosten werden in die Rechnung einbezogen. Bei Prozessen, die auch vom Abwasser resp. Klärschlamm durchlaufen werden, wird mit den Grenzkosten gerechnet, d.h. nur die proportionalen Kosten werden den Co-Substraten angerechnet. Der Erlös wird über die Annahmehöhen, Strom- und Biomethanvergütung bestimmt.

Sobald Kosten und Erlöse bekannt sind, können verschiedene Kenngrössen berechnet werden. Diese dienen der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Co-Vergärung in der ARA, sowie auch dem Vergleich mit der Landwirtschaft. Die Kennzahlen, ihre Berechnung und Bedeutung sind folgende [7]:

- **Kalkulatorischer Gewinn bzw. Verlust:** Differenz aus der Summe der Erlöse (Stromverkauf, Entsorgungsgebühren, etc.) sowie den totalen Kosten. Ein Gewinn entspricht einer Entschädigung für Management und Risiko.
- **Arbeitsverwertung:** Tatsächliche Entlohnung des Arbeitseinsatzes. Die totalen Kosten werden um den kalkulierten Personalaufwand reduziert. Die Differenz zum Gesamterlös wird dann durch die Anzahl Arbeitsstunden dividiert.

- **Die Strom- und Biomethan - Gestehungskosten (Rp./kWh):** Strompreis bzw. Biomethanpreis, der für eine Kostendeckung nötig ist (Gewinn=0).

$$\text{Bruttogestehungskosten: } \frac{\text{Kosten}}{\text{EingespieseneEnergie}}$$

$$\text{Nettogestehungskosten: } \frac{\text{Kosten} - \text{Annahmegebühren}}{\text{EingespieseneEnergie}}$$

Die totalen Kosten werden nach Strom- und Biomethanproduktion aufgeteilt. Dafür wird das Verhältnis der Bruttoenergie, die für die Erzeugung des eingespierten Stroms bzw. Biomethans nötig war, zur gesamten Bruttoenergie der eingespierten Energie verwendet.

8.6 Soziale Faktoren

Einflüsse auf Arbeitsplätze, die Sicherheit, das betriebliche Risiko und Unterstützung der regionalen Wirtschaft werden beschrieben. Als Grundlage dafür dienen hauptsächlich Beobachtungen und Diskussionen vor Ort.

9 STOFFFLÜSSE

In diesem Kapitel geht es darum, den Stofffluss der Co-Substrate im Gesamtfluss der ARA zu identifizieren. Daraus kann der Nährstoffverlust durch die Vergärung der Co-Substrate ermittelt werden sowie auch deren Einfluss auf die Biogas- und Granulatproduktion und die zusätzliche Belastung des Abwassers.

In einem ersten Schritt wird der Massenfluss ermittelt. Dabei wird in Erfahrung gebracht, wie viel Biogas, Granulat und Prozesswasser produziert wird. Weiter ist beim Granulat und Prozesswasser der Nährstoffgehalt von Interesse. Dabei werden folgende Stoffe betrachtet:

- Die organische Substanz: sie wird zu einem grossen Teil bei der Faulung abgebaut. Die zurückbleibende Fracht findet sich hauptsächlich im Granulat wieder. Dieses könnte in der Landwirtschaft als Humusvorläufer dienen.
- Stickstoff und Phosphor: Diese Nährstoffe finden sich im Prozesswasser und Granulat wieder. In der Landwirtschaft könnten sie als Düngemente verwendet werden. Der Stickstoff im Prozesswasser führt in der ARA zu einem erhöhten Energieverbrauch (Entstickung im SBR und im Biostyr).

9.1 Massenfluss

Der Verlauf der Massenströme über die verschiedenen Verfahrensschritte der Anlage wird hier aufgezeigt. Die Ermittlung des Massenflusses basiert auf folgenden Quellen:

Abwasser:	Mittelwerte 2008, aus täglichen Messungen
Schlamm:	Mittelwerte 2008, Messungen 2-mal wöchentlich
Co-Substrate:	Mittelwerte 2008. Die Menge wird vom Lieferanten angegeben. Zur Vereinfachung gilt $1\text{m}^3 = 1\text{ Tonne}$
Biogas:	Mittelwerte 2008, aus täglichen Messungen. Die Volumen sind in Nm^3 (trocken) umgerechnet
Granulat:	Mittelwert 2008, aus täglichen Messungen

9.1.1 Allgemeine Situation der ARA

Eine möglichst genaue Aufzeichnung des durchschnittlichen Massenflusses 2008 ist in der Abbildung 4 wiedergegeben (Vergrösserung der Abbildung im Anhang IV a). Für eine übersichtliche Darstellung sind die Tages-Mittelwerte angegeben. Der TS-Fluss (der Schlammbehandlung) ist im Anhang II beschrieben.

Zur Kontrolle sind die Flüsse in Tabelle 4 bilanziert. Es ergibt sich eine sehr geringe Differenz von -4 t pro Tag, was auf eine sehr gute Qualität der Daten hinweist.

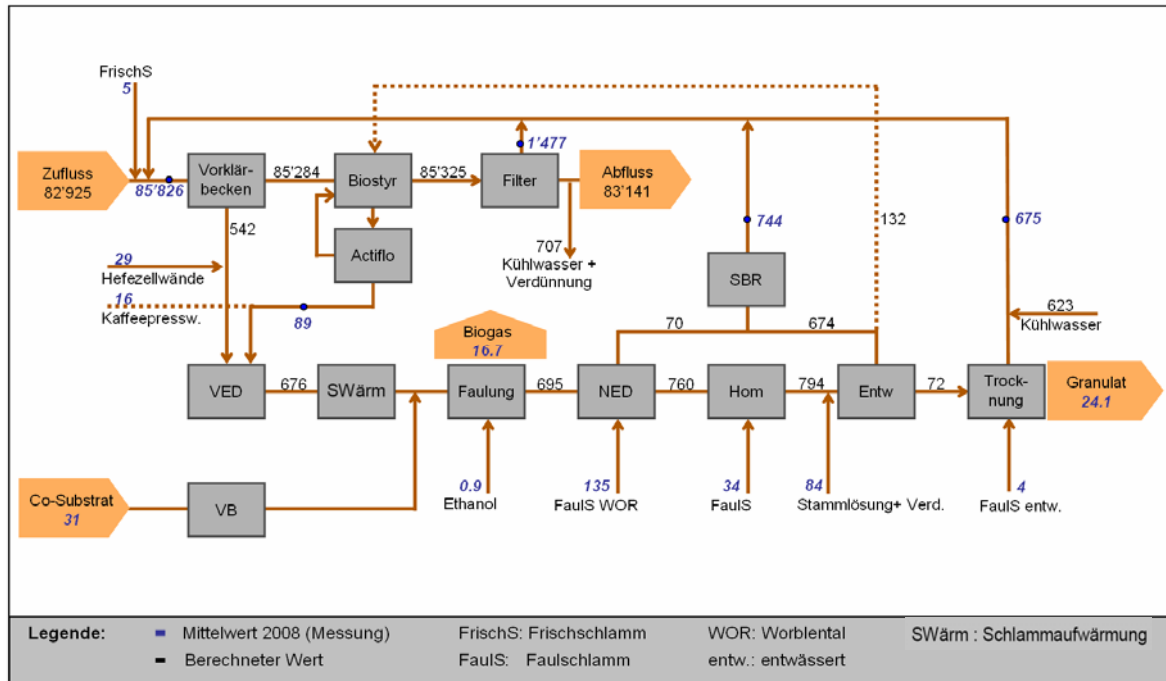


Abbildung 4: Massenfluss der ARA [t/d]

Import [t/d]		Export [t/d]	
Zufluss	82'925	Abfluss	83'141
Co-Substrate	76.5	Biogas ¹	16.7
Faulschlamm (fremd)	169	Granulat	24.1
Faulschlamm entw. (fremd)	4	KVA ²	2.8
Hausklärschlamm	5		
Prozessbedingte Hilfsmittel ³	1		
Total	83'181	Total	83'185

Tabelle 4: Bilanzierung des Massenflusses

9.1.2 Aufschlüsselung: Nullwert und Co-Substrate

Der Nullwert wird rechnerisch bestimmt (vergl. Kapitel 8, Vorgehen). So wird die Situation der ARA beschrieben, wenn keine Co-Substrate angenommen würden. Fremdschlämme, welche die ARA annimmt, sind im Nullwert enthalten.

Abwasserreinigung und Schlammbehandlung:

Im Bereich der Abwasserreinigung (Vorklärung, Biostyr/Actiflo, Filter) wird bei den Reinigungsstufen eine prozentuale Massenverteilung angenommen. Die Verteilungsgrade werden aufgrund der allgemeinen Situation ermittelt und sind im Anhang IV b) beschrieben.

In der Schlammbehandlung (Faulung, NED, Entwässerung, Trocknung) wird die Trockensubstanz in die Analyse mit einbezogen. Jeder Prozess wird im Einzelnen betrachtet und die Verteilungsgrade der Gesamtmasse, TS und oTS mit einbezogen. Bei der Faulung wird für

¹ Spezifisches Gewicht von Biogas: 1.15 kg/m³ (CH₄: 65.5 %, 16 g/mol; CO₂: 34.5%, 44 g/mol)

² KVA: Rechengut und Rückstand aus Strainpressen und Hammermühle

³ Flockungsmittel, Ethanol und Ameisensäure.

den Klärschlamm ein Abbaugrad von 50 % angenommen⁴; daraus ergeben sich 71 % bei den Co-Substraten. Im Anhang II sind die gesamt-, TS- und oTS-Flüsse beschrieben. In Tabelle 5 sind die Resultate bzw. die Granulatproduktion zusammengefasst:

	Granulatproduktion		
	[t/d]	[t TS/d]	[t oTS/d]
Klärschlamm	22.1	20.3	9.6
Co-Substrate	2	2	1.9
Total	24.1	22.3	11.5

Tabelle 5: Granulatproduktion

Biogasproduktion:

Täglich werden im Schnitt 14'650 Nm³ Biogas produziert. Um die Produktion durch den Klärschlamm zu schätzen, wird Bezug auf die organische Substanz im Klärschlamm genommen. Für eine Kläranlage wie die ARA Bern (mit Vorklärung) wird mit folgenden Werten gerechnet ⁴:

- Zufuhrspezifische Produktion: 0.45 - 0.5 Nm³/kg oTS
- Abbauspezifische Produktion: 0.9 - 1.0 Nm³/kg oTS_{abgebaut}

Die Berechnungen nach den beiden Varianten ergeben eine Gasproduktion zwischen 4'700 und 5'300 Nm³ pro Tag. Der Mittelwert liegt bei 5'011 Nm³ pro Tag.

Weiter wird die Gasproduktion der Co-Substrate berechnet. Für die wichtigen Substrate (Speisereste, Kaffeepresswasser, Flotat, Fettabscheider und Milchserum) sind von Nova Energie Gasausbeuteversuche durchgeführt worden. Die Analyseresultate sind im Anhang I zu finden. Die fehlenden Gasausbeuten werden aufgrund von Literaturwerten ergänzt. Im Anhang III sind die Gasausbeuten und die Gasproduktion je Co-Substrat beschrieben. Die theoretische Biogasproduktion der Co-Substrate liegt bei 10'525 Nm³ pro Tag.

Die gesamte berechnete Gasproduktion von Klärschlamm und Substraten (5011+10'525 = 15'536 Nm³/d) ist leicht höher als die real gemessene Menge (14'650 Nm³/d). Die weiter verwendeten Werte sind in Tabelle 6 aufgeführt:

	Verwendete Werte
Klärschlamm	5'000 Nm ³ /d
Co-Substrate	10'000 Nm ³ /d
Total	15'000 Nm³/d

Tabelle 6: Gasproduktion nach Klärschlamm und Co-Substraten

9.1.3 Resultate und Plausibilität

Mit den berechneten Verteilungs- und Abbaugraden wurde ein Excel-Modell erarbeitet, welches die Simulierung des Nullwerts ermöglicht. Wegen der Rückläufe aus dem SBR und der Trocknung ist die Berechnung ein iterativer Prozess.

Um die Plausibilität des Modells zu prüfen, wurden die „Input-Daten“ (Zufluss und Fremdschlämme) von 2005, 2006 und 2007 eingegeben und die Resultate mit den Messwerten verglichen. Es traten Abweichungen in der Grössenordnung von 10 % auf, welche im Rahmen der Datengenauigkeit zu erwarten waren.

⁴ Quelle: Persönliche Mitteilung von T. Haltmeier (BG Ingenieure und Berater)

Der Massenfluss für den Nullwert ist in Abbildung 5 dargestellt (Abbildung vergrößert im Anhang IV b), zur Kontrolle wird er anschliessend bilanziert (Tabelle 7).

Durch Differenzrechnung (allgemeine Situation - Nullwert) wird der Massenfluss der Co-Substrate berechnet. Das Resultat ist in Abbildung 6 dargestellt (Abbildung vergrößert im Anhang IV c), gefolgt von der Bilanzierung (Tabelle 8).

In den Bilanzen tritt in beiden Fällen eine sehr geringe Differenz von weniger als 3 t pro Tag auf. Damit werden die Resultate als plausibel gewertet.

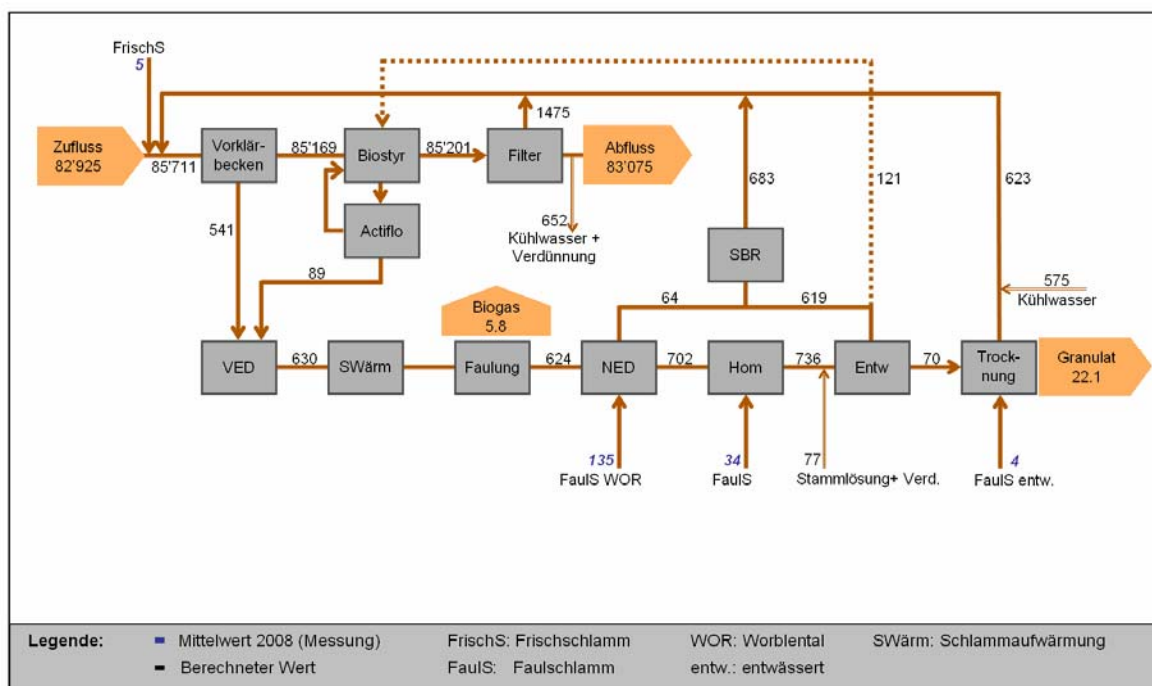


Abbildung 5: Nullwert des Massenflusses

Import [t/d]		Export [t/d]	
Zufluss	82'925	Abfluss	83'075
Faulschlamm	169	Biogas	5.8
Faulschlamm entw.	4	Granulat	22.1
Hausklärschlamm	5	KVA	2.8
Prozessbedingte Zugaben	1		
83'104		83'106	

Tabelle 7: Bilanzierung des Massenflusses, Nullwert

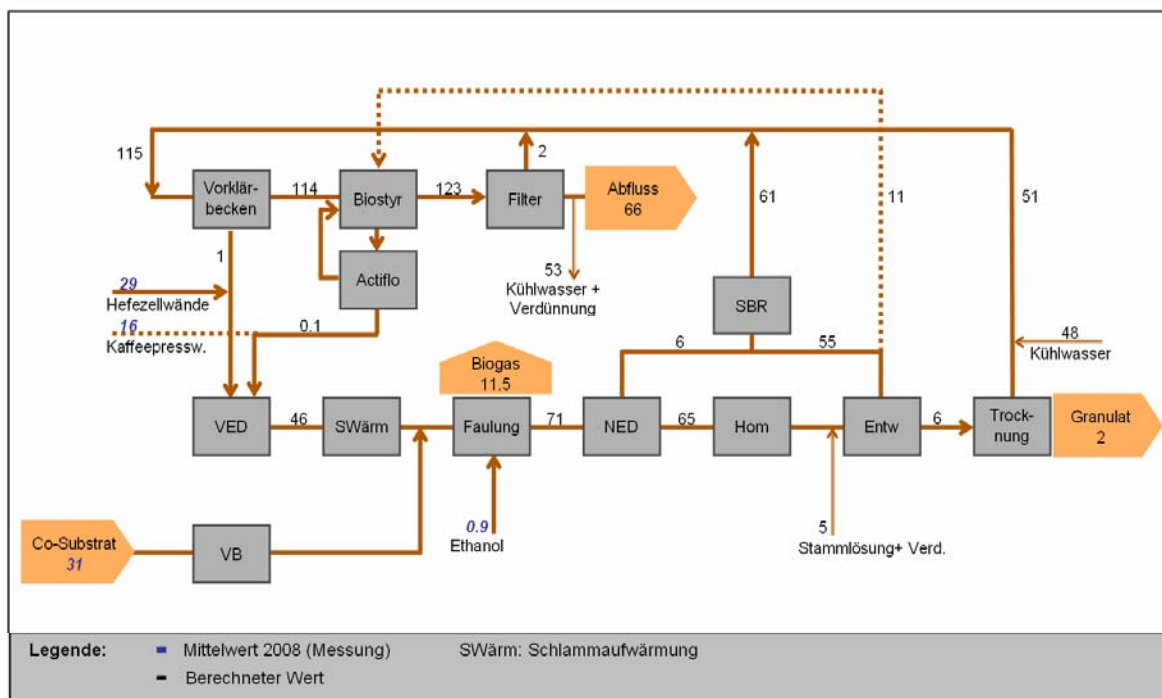


Abbildung 6: Massenfluss der Co-Substrate

Import [t/d]		Export [t/d]	
Co-Substrate	76.6	Abfluss	66
		Biogas	11.5
		Granulat	2
76.6		79.5	

Tabelle 8: Bilanzierung des Massenflusses, Co-Substrate

9.2 Nährstoffe

Die Stickstoff- und Phosphorflüsse werden aufgrund folgender Quellen als Elementarkonzentration bzw. –Fracht (N_{tot} und P_{tot}) ermittelt:

Abwasser: Mittelwerte 2008, aus täglichen Messungen.

Schlamm: Aus 2008 sind keine Messungen vorhanden. 5 Messungen wurden im Februar 2009 durchgeführt.

Co-Substrate: Für einige Co-Substrate der ARA haben Laboranalysen stattgefunden, die Nährstoffwerte der übrigen Substrate werden mit Hilfe von Literaturwerten geschätzt. Im Anhang III sind die Nährstoffkonzentrationen der Co-Substrate beschrieben.

Faulschlamm Worblental: Mittelwert 2008. Vier Analysen wurden vom Labor des Amtes für Umweltumweltschutz der Stadt Bern durchgeführt.

Fremdschlamm: Mittelwerte 2008. Die Werte der ARA Worblental werden verwendet.

Brüden: Es sind keine Messungen vorhanden. Die Werte sind berechnet.

Granulat: Mittelwert 2008. Vier Analysen wurden vom Labor des Amtes für Umweltumweltschutz der Stadt Bern durchgeführt.

9.2.1 Stickstofffluss

Der Stickstoff gelangt grösstenteils über das Abwasser in die ARA, aber auch über die Co-Substrate und den Fremdschlamm. Er verlässt die ARA wieder über den Ablauf, das Granulat und die Abluft (schematisch in Abbildung 7 dargestellt). Der detaillierte Stickstofffluss ist im Anhang V a dargestellt.

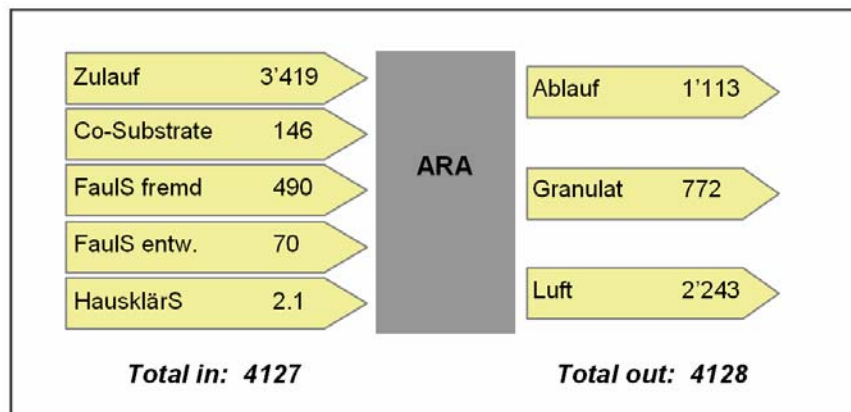


Abbildung 7: Stickstoffbilanz der ARA [kgN/d]

In der Bilanz besteht eine Differenz von +1 kg. Dies ist verschwindend klein und deutet auf eine gute Qualität der verwendeten Daten.

Es fällt auf, dass der grösste Teil des Stickstoffs durch die Abluft wieder aus der ARA entweicht. Dies ist auf die Nitrifikation/Denitrifikation im Biostyr und im SBR zurückzuführen.

9.2.2 Aufschlüsselung: Nullwert und Co-Substrate

Um den Stickstofffluss nach Abwasser und Co-Substraten aufzuschlüsseln, werden die Wirkungsgrade der einzelnen Verfahrensschritte berechnet. Die Massenverteilung des Stickstoffs ist in Anhang V b beschrieben.

Der Nullwert wird wieder mit Hilfe von Excel berechnet und der Stickstofffluss der Co-Substrate durch Differenzrechnung ermittelt. Die detaillierten Stickstoffflüsse sind im Anhang V b und c dargestellt, in Abbildung 8 sind sie schematisch zusammengefasst und bilanziert.

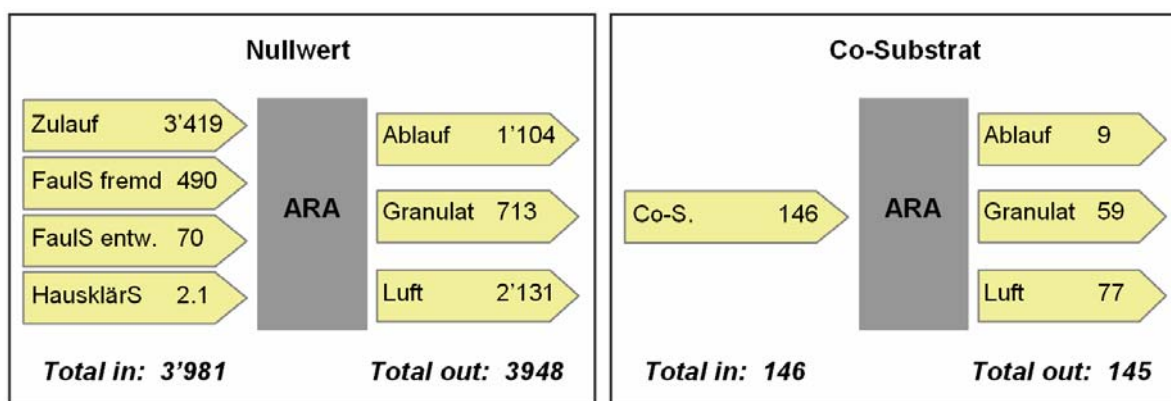


Abbildung 8: Stickstoffbilanz für Nullwert und Co-Substrate [kgN/d]

Aufgrund der sehr geringen Differenzen in den Bilanzen werden die Resultate als plausibel betrachtet. 4.5 % des Stickstoffs, der dem Stoffkreislauf entzogen wird, ist durch die Co-Substrate zu verantworten.

9.2.3 Phosphorfluss

Der Phosphor gelangt über Abwasser, Co-Substrate, Fremdschlamm und Zudosierung in die ARA. Letztere dient der Vermeidung von Kalkablagerungen in den Leitungen: dem Trübwasser wird eine 75 %-ige Phosphorsäure (H_3PO_4) beigemischt, wodurch Härtebildner ausgefällt werden. Im 2008 wurden 16'700 kg der Phosphorsäure verwendet – umgerechnet auf Elementarphosphor entspricht dies 3'960 kg P pro Jahr oder 10.8 kg P pro Tag. Der Phosphor tritt durch das Abwasser und das Granulat wieder aus der ARA aus.

Im Anhang VI a ist der detaillierte Phosphorfluss abgebildet. In Abbildung 9 ist die Phosphorbilanz beschrieben:

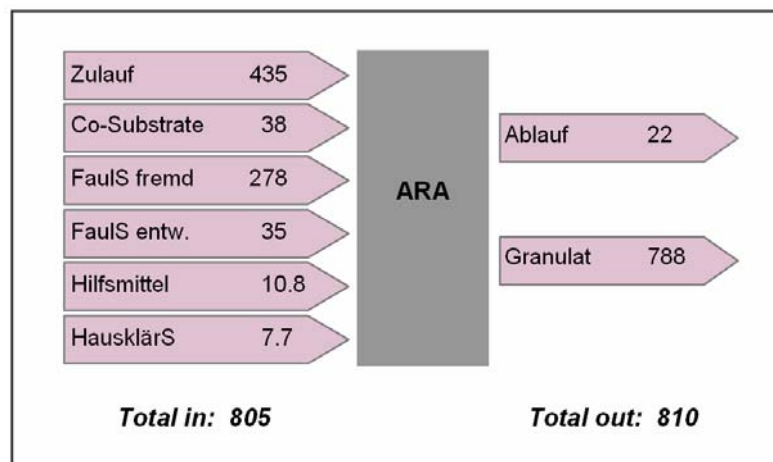


Abbildung 9: Phosphorbilanz der ARA [kgP/d]

9.2.4 Aufschlüsselung: Nullwert und Co-Substrate

Die Wirkungsgrade der Verfahrensschritte werden ermittelt (Anhang VI b). Der prozessbedingte Phosphor wird proportional zur Zentratmenge beigegeben, dabei handelt es sich um 13.2 gP/m³ Zentrat. Zur Berechnung des Nullwertes wird diese Menge pro m³ angewendet, beim Zentrat der Co-Substrate muss jedoch keine Phosphorsäure beigegeben werden, da diese praktisch keine Härtebildner enthalten.

Die detaillierten Phosphorflüsse des Abwassers und der Co-Substrate sind im Anhang VI b und c zu finden. In Abbildung 10 sind sie zusammengefasst:

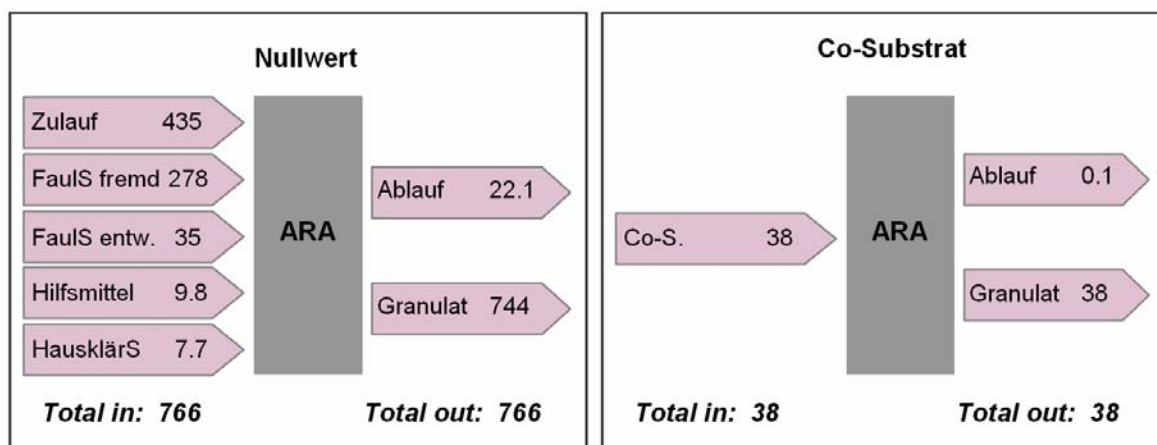


Abbildung 10: Phosphorbilanz für Nullwert und Co-Substrate [kgP/d]

Durch die Co-Substrate gelangen täglich im Schnitt 38 kg Phosphor ins Granulat, also genauso viel wie in den Co-Substraten enthalten ist. In Bezug auf den Phosphor im gesamten Granulat der ARA macht dies 4.8 % aus.

9.3 Zusammenfassung und Folgerungen

Der jährliche Stofffluss der Co-Substrate ist in Tabelle 9 zusammengefasst. Weiter ist der Anteil am Gesamtfluss der ARA angegeben:

	Masse [t/a]	Anteil an Gesamtmenge [%]
Energieträger		
- Biogas	4'198	66.7
- Granulat	767	8.3
Abwasserbelastung		
- N _{tot} entstickt (SBR + Biostyr)	28.1	3.5
Nährstoffverlust		
- P _{tot} im Granulat	13.9	4.8
- N _{tot} im Granulat und entstickt	49.6	4.6
- oTS im Granulat	683	16.3

Tabelle 9: Stofffluss der Co-Substrate

Der Anteil der Co-Substrate an der Biogasproduktion von 66.7 % ist beträchtlich. Alle anderen anteilmässigen Einflüsse sind relativ klein – können deswegen aber nicht vernachlässigt werden. In den folgenden Kapiteln wird ihr Einfluss auf die Energiebilanz, Emissionen und Wirtschaftlichkeit der Anlage ermittelt.

Beim Stickstoff im Gärgut ist zu beachten, dass bei einer Verwendung als Dünger nur etwa 78 % davon, also 36.7 t, pflanzenverfügbar wären [10].

Um den Nutzen der einzelnen Co-Substrate zu beurteilen, wird in Tabelle 10 ihr Einfluss auf den Stofffluss beschrieben:

	Biogasproduktion [m ³ /a]	Nährstofffrachten	
		[t N/a]	[t P/a]
Hefezellwände	96'282	0	5.8
Speisereste	1'321'650	28.7	3.7
KaffeePresswasser	106'936	2.2	0.2
Fettabscheider	567'336	0	0
Flotat	1'450'944	20	3.7
Milchserum	158'804	2.4	0.5
Enteisungswasser	8'622	0	0
Ethanol-Wassergemisch	103'620	0.1	0
Getränke Abfall	2'781	0	0
Speiseöl	24'832	0	0

Tabelle 10: Einfluss der einzelnen Co-Substrate auf den Stofffluss

Die wichtigsten Nährstoffverluste sind der Vergärung von Speiseresten und Flotat zuzuschreiben. Mit den hohen Stickstoffwerten tragen sie auch zur Belastung des Prozesswassers und hohen Energiekosten bei. Gleichzeitig weisen diese beiden Substrate jedoch die höchsten Gaserträge aus und stellen damit wichtige Energiespender für die ARA dar.

Eine relevante Phosphorfracht ist bei den Hefezellwänden festzustellen. Hier muss erwähnt werden, dass die Phosphorkonzentration ein unsicherer Wert darstellt (Schätzung); ausserdem werden die Hefezellwände seit Dezember 2008 wegen Schliessung des Betriebs nicht mehr vergärt. KaffeePresswasser und Milchserum weisen kleine Nährstofffrachten auf – alle anderen Substrate sind bei dieser Problematik ganz vernachlässigbar.

Fettabscheider und Ethanol können als wichtige Energiespender genannt werden, die auf stofflicher Ebene unproblematisch sind.

10 ENERGIEBILANZ

Durch die Vergärung wird Energie in Form von Biogas und Granulat produziert. Bei der Annahme, Aufbereitung, Entwässerung und Behandlung des Prozesswassers wird aber auch Energie verbraucht. Durch die Differenz aus Produktion und Verbrauch, kann die Nettoenergieproduktion bestimmt werden. In diesem Kapitel geht es darum, diese zu ermitteln und dafür eine detaillierte Energiebilanz aufzustellen. Als Grundlage für die Bestimmung des Energieverbrauchs und der Energieproduktion dienen die im Kapitel 9 erarbeiteten Stoffflüsse.

Die Energiebilanz der ARA ist in der Abbildung 11 dargestellt. Die Werte sind in MWh pro Jahr angegeben.

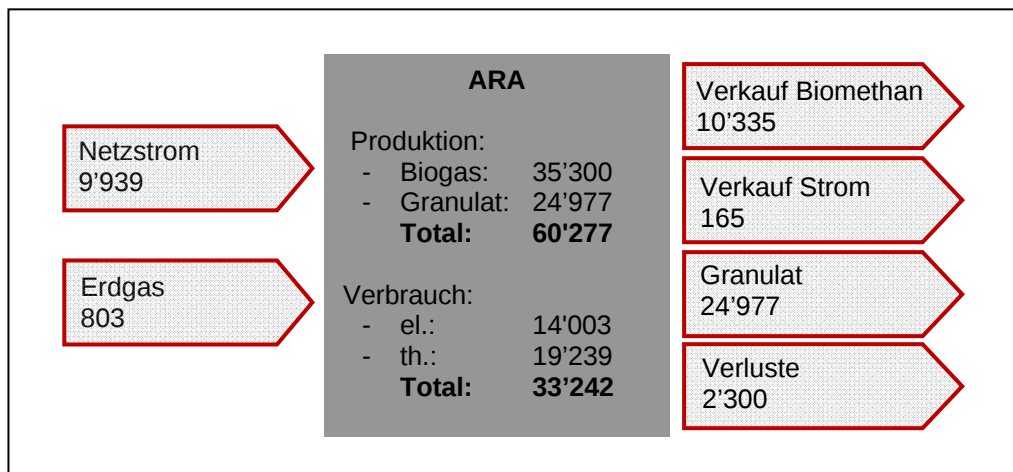


Abbildung 11: Energiebilanz der ARA Bern [MWh/a]

Die Verluste sind über die Bilanzierung berechnet. Dabei handelt es sich hauptsächlich um thermische Verluste im BHKW.

10.1 Energieträger

10.1.1 Biogas

Im Jahr 2008 wurden rund 5'347'000 Nm³ Biogas produziert. Mit einem durchschnittlichen Energiewert von 6.55 kWh/m³ (trocken) entspricht dies einer Bruttoenergie von 35'300 MWh. Der Anteil, der durch die Co-Substrate produziert wurde, ist in Tabelle 11 beschrieben. Beim Gas aus Klärschlamm wird mit einem Methangehalt von 67 %⁵ gerechnet, bei den Co-Substraten mit einem Durchschnitt von 65 % (Literaturwerte, siehe Anhang III).

	Gasproduktion [Nm ³ /d]	Methangehalt [%]	Energiewert [kWh/ Nm ³]	Bruttoenergie [MWh/a]
Klärschlamm	5'000	67	6.66	11'997
Co-Substrate	10'000	65	6.46	23'303
Total				35'300

Tabelle 11: Bruttoenergieproduktion durch das Biogas

Die berechnete Bruttoenergieproduktion stimmt gut mit der gemessenen überein. Die Co-Substrate sind also für 66 % der Bruttoenergieproduktion verantwortlich.

⁵ Quelle: Persönliche Mitteilung von T. Haltmeier

Das produzierte Biogas wird über verschiedene Wege verwertet. Etwa ein Drittel wird zu Erdgasqualität aufbereitet. Das so genannte Biomethan mit 98 % Methangehalt wird ins Gasnetz der EWB eingespeist. Die anderen zwei Drittel werden in der Kläranlage in Strom und Wärme umgewandelt. Die Wärme wird ausschliesslich auf der ARA verwendet, der Strom wird bei Überschüssen ins Stromnetz eingespeist. Der Abbildung 12 können die genauen Zahlen entnommen werden:

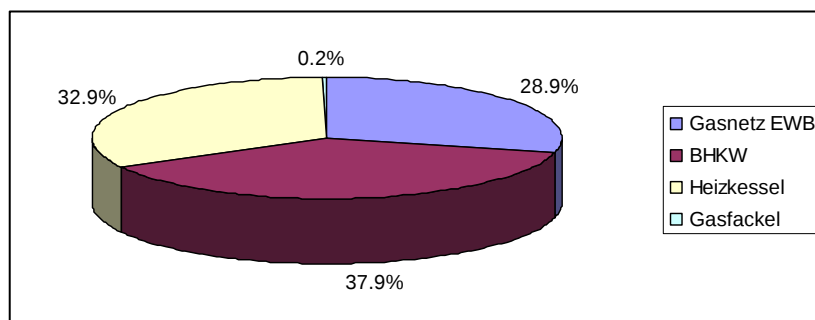


Abbildung 12: Verwendung des Biogases

10.1.2 Granulat

Durch die Trocknung des Schlammes entsteht eine staubfreie, körnige Masse, das Granulat. Dieses wird an vier Zementwerke der Schweiz geliefert. Die Verbrennung des Granulats senkt einerseits deren Verbrauch an fossilen Energieträgern, andererseits beinhaltet das Trockengut mineralische Inertstoffe, die bei der Verbrennung in den Klinker eingebunden werden. Dadurch muss weniger Steinmehl beigegeben und Rohstoffe können eingespart werden.

Mit einem Heizwert (H_u) von 3'069 kWh / tTS⁶ gilt das Granulat als Braunkohleäquivalent. Träger der Energie ist die organische Substanz, welche ca. 52 % des Granulats ausmacht.

Da die Co-Substrate wesentlich mehr oTS enthalten als der Klärschlamm, ist der Energiewert des daraus erzeugten Granulats entsprechend höher. Um dem Rechnung zu tragen, wird der Energiegehalt über die oTS bestimmt: 5'951.2 kWh/t oTS.

In Tabelle 12 ist der Energiegehalt des Granulats beschrieben, nach Klärschlamm und Co-Substraten aufgeteilt (Berechnung der Granulatproduktion im Anhang II):

	Granulatproduktion [t/a]	oTS [t/a]	Energiewert [MWh/a]
Klärschlamm	8067	3508	20'872
Co-Substrate	705	690	4105
Total	8772	4198	24'977

Tabelle 12: Bruttoenergieproduktion durch das Granulat

Wegen dem sehr geringen Gehalt an anorganischer Substanz in den Co-Substraten, wird der daraus resultierende Steinmehlersatz im Zementwerk vernachlässigt.

⁶ Mittelwert aus 8 Messungen von 2003 bis 2005

10.2 Fremdenergiebezug für die Co-Substrate

Der Energieverbrauch der Co-Vergärung wird zu einem grossen Teil über das produzierte Biogas gedeckt. Es wird aber auch Fremdenergie (Netzstrom und Erdgas) bezogen. Um den Anteil der Co-Substrate an dem gesamten Fremdenergiebezug zu berechnen, wird der Energieverbrauch der Co-Substrate mit dem Gesamtverbrauch der ARA ins Verhältnis gesetzt und dieses Verhältnis auf den Gesamt- Fremdenergiebezug angewendet.

Der Energieverbrauch der Co-Substrate je Prozess ist im Anhang VII beschrieben. Die Resultate sind in Tabelle 13 zusammengefasst und mit dem Gesamtverbrauch der ARA ins Verhältnis gestellt:

	Verbrauch ARA [MWh/a]	Verbrauch Co-S. [MWh/a]	Anteil für Co-S. [%]
El. Energie (Netzstrom)	14'085	726.6	5.16
Th. Energie	19'239	872.6	4.55
Total	33'324	1'599	4.80

Tabelle 13: Energieverbrauch durch die Co-Substrate

Der prozentuale Anteil (Tabelle 13) kann nun zur Berechnung des Fremdenergiebezugs der Co-Substrate verwendet werden:

	Fremdenergie [MWh/a]	Anteil für Co-S. [%]	Anteil für Co-S. [MWh/a]
Netzstrom (El. Energie)	9'939	5.16	512.7
Erdgas (für th. Energie)	803	4.55	36.5
Total	29'428		549.2

Tabelle 14: Fremdenergie für die Co-Substrate

Der Energieverbrauch durch den Transport der Co-Substrate wird ebenfalls in die Energiebilanz mit einbezogen. In Tabelle 15 ist die Berechnung der Transportenergie aufgezeigt. Gleichzeitig wird die CO₂-Produktion beziffert, die durch den Transport verursacht wird.

Co-Substrat	Masse [t/a]	Distanz [km]	LKW [t]	Verbrauch [kWh/tkm]	Total [MWh/a]	CO ₂ - Produktion [t/a]
Hefezellwände	10'698	40	22	0.28	119.8	27.4
Speisereste	4'895	20	15	0.31	30.3	6.5
Kaffeepresswasser	5'658	8	22	0.38	17.2	3.0
Fettabscheider	2'456	10	2-8	0.33	8.1	2.9
Flotat	1'584	85	14	0.38	51.2	8.8
Milchserum	1'073	25	14	0.36	9.7	1.8
Enteisungswasser	958	10	18	0.31	3.0	0.6
Ethanol (40%)	314	100	23	0.33	10.4	2.2
Getränke Abfall	309	20	18	0.31	1.9	0.4
Speiseöl	32	25	16	0.54	0.4	0.1
Total					252	53.5

Tabelle 15: Energieverbrauch durch den Transport der Co-Substrate [16]

Die Co-Substrate werden zum Teil über grosse Distanzen transportiert, was zu einem beträchtlichen Energieverbrauch führt.

Die Energie für den Transport des Granulats wird vernachlässigt, weil ein Brennstoff ohnehin zum Zementwerk transportiert werden müsste. Im Fall von Steinkohle oder Schweröl, welche anstelle von Granulat eingesetzt würden, wären die Distanzen wahrscheinlich viel grösser.

10.3 Energieerzeugung durch die Co-Substrate

Zur Erzeugung zählen die ins Netz eingespeiste (Biomethan und Strom) und die im Granulat enthaltene Energie. Die Gesamt-Energieerzeugung der ARA ist bekannt, nun muss aber noch der Anteil, welcher durch die Co-Substrate produziert wurde, bestimmt werden. Dafür werden die im Kapitel 9.1 berechneten prozentualen Anteile an der Energieproduktion durch Biogas und Granulat verwendet:

	Erzeugung total [MWh/a]	Anteil durch Co-S. [%]	Anteil durch Co-S. [MWh/a]
Biomethan	10'335	66	6'823
Strom	165	66	109
Granulat	23'082	16.3	3'773

Tabelle 16: Energieerzeugung durch die Co-Substrate

10.4 Nettoenergieproduktion

Nun kann die Energiebilanz der Co-Substrate (Tabelle 17) erstellt und die Nettoenergieproduktion daraus abgeleitet werden.

Fremdenergie [MWh/a]		Erzeugung [MWh/a]	
Erdgas	37	Biomethan	6'823
Strom	513	Strom	109
Transportenergie	252	Granulat	3'773
	802		10'705

Tabelle 17: Energiebilanz der Co-Substrate

Die Nettoenergieproduktion, also die Differenz aus Erzeugung und Bezug, beträgt **9'903 MWh/a** oder **27'132 kWh/d**.

Im Weiteren können folgende Grössen berechnet werden:

- Der Transport macht 31 % der Fremdenergie aus.
- Der elektrische Selbstversorgungsgrad liegt bei 29.4 %.
- Der thermische Selbstversorgungsgrad liegt bei 96 %.
- Pro Tonne oTS, die dem Fermenter in Form von Co-Substraten zugeführt wird, werden im Schnitt 4'111 kWh Netto produziert.

11 EMISSIONEN

In diesem Kapitel wird die CO₂-Bilanz der Co-Vergärung untersucht. Brennstoffe aus Biomasse gelten als CO₂-neutral, weil für ihren Aufbau genauso viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre gebunden wird, wie bei ihrer Verbrennung entsteht. Durch die Verwendung von Biogas und Granulat anstelle von fossilem Brennstoff werden also klimaschädliche CO₂ - Emissionen reduziert.

Um diese Einsparungen zu beziffern, werden die Emissionen berechnet, wenn Erdgas anstelle von Biomethan, Steinkohle (üblicher Brennstoff zur Beheizung des Drehrohofs im Zementwerk) anstelle von Granulat und gewöhnlicher Netzstrom verwendet würden.

Durch den Transport der Co-Substrate, den Netzstrom- und Erdgasbezug entstehen aber auch klimaschädliche CO₂-Emissionen, die in die Bilanz integriert werden müssen.

Für die Berechnungen werden folgende Werte verwendet:

- Erdgas: Produktion von 198 gCO₂/kWh [15]
- Strom: Produktion von 142 gCO₂/kWh [15]
- Steinkohle: Produktion von 331 gCO₂/kWh_{th} [15]
- Transport: Die CO₂-Produktion pro tkm ist von der LKW-Grösse und Auslastung abhängig. Mit der Annahme, dass die Fahrzeuge immer voll ausgelastet sind, liegen die Emissionen zwischen 0.13 und 0.06 kg CO₂/tkm [16].

Die Bilanz ist in Tabelle 18 erstellt:

	Menge	CO ₂ -Emissionen [t/a]
Einsparungen:		
Biomethan (Einspeisung)	6'823 MWh/a	- 1351
Strom (Einspeisung)	109 MWh/a	- 15
Granulat (Brennstoff)	3'773 MWh/a	- 1'249
Emissionen:		
Netzstrombezug	513 MWh/a	+ 72
Erdgasbezug	37 MWh/a	+ 7
Transport Co-Substrate	805'000 tkm	+ 54
Bilanz		- 2'482

Tabelle 18: CO₂-Bilanz der Co-Substrate

Die Bilanz ergibt eine Einsparung von **2'482** Tonnen CO₂ pro Jahr durch die Vergärung der Co-Substrate.

12 VEREINFACHTE ÖKOBILANZ

Der Verein für umweltgerechte Elektrizität (VUE) hat im Rahmen der *naturemade Star* Zertifizierung ein Kennwertmodell für die Biogasproduktion entwickelt. Um eine vereinfachte Ökobilanz zu erarbeiten, wird dieses hier verwendet. Es ist zu bemerken, dass das Modell die Gesamtbiogasproduktion von Anlagen bewertet, also nicht ausschliesslich die Co-Substrate.

12.1 Grundlagen des Kennwertmodells

Zur Bewertung wird die Umweltbelastung der Anlage anhand von EcoIndicator99-Punkten bestimmt und mit jener eines modernen Gas-und-Dampf Kraftwerkes (Referenzsystem) verglichen. Der Grenzwert liegt bei 50 % der Umweltbelastungen resp. der EcoIndicator99-Punkten des Referenzsystems.

Als Ergebnis wird gezeigt, um wie viel Prozent die Umweltbelastung der Anlage über oder unter dem Grenzwert liegt. Ein Vergleich von Anlagen verschiedener Grösse ist anhand des berechneten Prozentwertes möglich. Im Rahmen der Studie ist auch interessant zu sehen, welche Prozesse bzw. Kategorien am stärksten zu den EcoIndicator99-Punkten beitragen.

Die folgenden Kenngrössen werden zur Bewertung:

- Typ der Biogasanlage und Fermentergrösse (m³)
- Detaillierte Auflistung aller Substrate und der Anlieferung (kg, km, CHF)
- Eigenenergiebedarf der Anlage
- Fremdstrom-, Heizöl-, Zündöl-, Diesel- und Erdgasverbrauch (kWh)
- Abwärme, Biogasverbrennung (kWh) und Typ BHKW
- Art und Menge der Gärgutbehandlung und -nutzung, finanzieller Ertrag bzw. Aufwand
- Einfache Auslieferungsdistanz zur Gärgutverwendung (km)

Die Systemgrenzen des Kennwertmodells sind nicht identisch mit jenen der vorliegenden Arbeit, denn es wird die Vergärung von Klärschlamm und Co-Substraten bewertet. Alle Anlagenteile werden berücksichtigt, die direkt für die Biogaserzeugung und evtl. Verbrennung notwendig sind. Bei der Strom- und Wärmeproduktion der Anlage wird der Eigenverbrauch in Abzug gebracht; erfasst wird somit die Nettoproduktion der Anlage. Die Verwendung der verkauften bzw. kostenlos abgegebenen Nebenprodukte aus der Anlage liegt ausserhalb der Systemgrenzen. In Abbildung 13 sind die Systemgrenzen dargestellt.

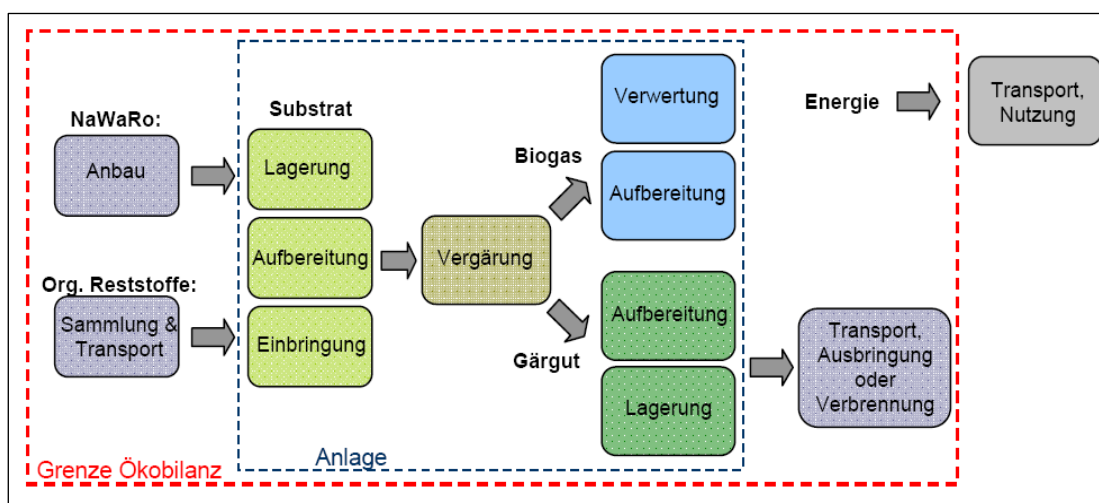


Abbildung 13: Systemgrenzen des KWM (VUE, 2009)

12.2 Resultate und Diskussion

Für die Biogasproduktion in der ARA Bern werden durch das Kennwertmodell 292'800 Ecoindicator99-Punkte errechnet. Dies entspricht 54 % der Punkte des Referenzmodells. Die Zuordnung der Punkte ist in Abbildung 14 dargestellt.

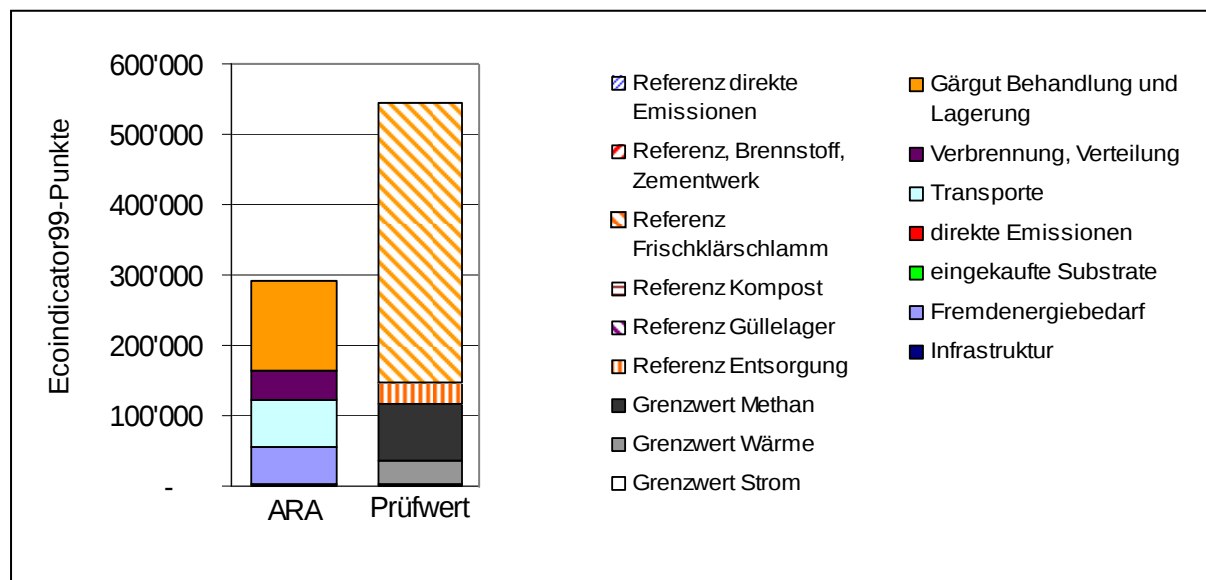


Abbildung 14: Resultate des KWM für die Co-Vergärung der ARA Bern

Am meisten Punkte kommen durch die Kategorie „*Gärgut, Behandlung und Lagerung*“ zustande, was auf die Verbrennung des Gärguts im Zementwerk zurückzuführen ist. Hier ist zu erwähnen, dass das Modell die Umweltbelastung gemäss dem Preis alloziert. Weil die ARA für die Granulatabgabe bezahlen muss, wird das Granulat vom Modell als Abfallprodukt betrachtet, was effektiv nicht der Fall ist. Bei einer Abgabe zum Nulltarif, würde die Kategorie aus den Resultaten verschwinden und es würden nur noch 163'400 Ecoindicator99 - Punkte erreicht, bzw. 30 % des Referenzwertes. Auch der Preis der Co-Substrate beeinflusst das Modell, jedoch nicht die Anzahl der Ecoindicator99-Punkte, aber den Referenzwert. Wenn ein Betrieb gute Tarife aushandeln kann, ist es für diesen also einfacher im Toleranzbereich der Zertifizierung zu sein.

An zweiter Stelle ist die Kategorie „*Transporte*“. Wie auch schon im Kapitel 10 (Energiebilanz) ermittelt wurde, werden die Co-Substrate zum Teil über weite Distanzen zur ARA gebracht, was aus ökologischer Sicht wenig Sinn macht. Auch der Transport des Granulats zu einem Zementwerk beträgt im Schnitt 60 km. Dieser Einfluss wurde im Kapitel 10 jedoch vernachlässigt, mit der Überlegung, dass ein anderer, fossiler Brennstoff auch zum Zementwerk transportiert werden müsste – wahrscheinlich über eine längere Distanz. Im Kennwertmodell wird diese Ersatzfunktion nicht beachtet.

Die Kategorie „*Fremdenergiebedarf*“, an dritter Stelle, ist mit dem hohen Verbrauch an Netzstrom für den Betrieb der Kläranlage in Verbindung zu setzen. Die Stromerzeugung durch das BHKW vermag nur einen Teil des Verbrauchs der Anlage zu decken (ca. ein Drittel), der Rest muss vom Stromnetz bezogen werden. Hier machen sich die unterschiedlichen Systemgrenzen bemerkbar, denn für die Co-Substrate alleine ist der Fremdenergiebezug relativ gering.

13 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die Wirtschaftlichkeit der Co-Vergärung wird in diesem Kapitel analysiert. Dafür wird eine Spartenrechnung für den Bereich „Annahme und Vergärung von Co-Substraten“ für das Jahr 2008 durchgeführt.

Zuerst werden die Kosten und Erlöse der Tätigkeit bestimmt, anhand dieser können dann verschiedene Kennzahlen bestimmt werden. Letztere dienen der Bewertung des Kostenträgers (= Co-Substrate) und der Preispolitik, aber auch als Vergleichsgrößen zur landwirtschaftlichen Co-Vergärung.

13.1 Kosten- und Leistungsrechnung

Die Kostenrechnung ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten wird die Substratannahme betrachtet; dort muss eine Vollkostenrechnung gemacht werden, denn die Annahmestellen, Lagerungsbehälter und Aufbereitungsanlage wurden ausschliesslich für die Co-Substrate eingerichtet.

Die Biomethaneinspeisung wurde erst durch die Co-Vergärung möglich, somit müsste für die Gasaufbereitungsanlage ebenfalls mit den Vollkosten gerechnet werden. Diese wurde jedoch von der EWB finanziert – im Gegenzug verkauft ihnen die ARA das Biomethan zu sehr vorteilhaften Preisen. Über den niedrigen Tarif tragen die Co-Substrate also auch zur indirekten Amortisierung bei.

Bei der Schlammbehandlung und Prozesswasserreinigung wird mit den Grenzkosten gerechnet. Die Anlagen für diese Prozesse wurden für die Klärschlammbehandlung gebaut, somit werden den Co-Substraten nur die zusätzlich anfallenden Kosten (proportionale Kosten) angerechnet.

In der Leistungsrechnung werden die Erlöse durch die Co-Substrate ermittelt.

13.1.1 Vollkostenrechnung der Substratannahme

Zur Substratannahme zählen die Prozesse vom Eintreffen des LKW bis zur Beschickung des Faulturmes mit den organischen Abfällen. Die Kosten werden direkt für den Kostenträger ausgerechnet und dabei nach Kostenarten gegliedert:

- **Personalkosten:** Der Zeitaufwand für die Substratannahme wird ermittelt und mit einem Stundenansatz von 65 CHF/h verrechnet. Dabei wird die Beihilfe zur Annahme, das Betreiben der Hammermühle und der administrative Aufwand (1.5min/ Lieferung) beachtet. Bei 2'266 Lieferungen pro Jahr kommen so 500 Arbeitsstunden resp. 32'500 CHF zusammen.
Zu den Unterhaltsarbeiten (vom Personal der ARA ausgeführt) stehen keine Angaben zur Verfügung und müssen geschätzt werden. Es wird mit 3 % der Investitionssumme (siehe Abschreibungen) gerechnet: 49'000 CHF (entspricht 754 Arbeitsstunden).
Total sind dies 1'254 Arbeitsstunden, bzw. 81'500 CHF/a.
- **Materialkosten:** Im 2008 musste das Sieb der Hammermühle ausgewechselt (6500 CHF) und vier Kolben von Pumpen ersetzt werden (500 CHF/Stück). Für Sonstiges werden zusätzlich 1000 CHF gerechnet. Total: 9'500 CHF/a.
- **Dienstleistungskosten:** Bei den verschiedenen Pumpen, der Hammermühle, und hauptsächlich bei der Aufwärmung der Substrate entstehen Energiekosten. Der Energieverbrauch kann dem Anhang VII entnommen werden, die Kosten betragen im Schnitt 0.117 CHF/kWh. Es wird ein Selbstversorgungsgrad von 95 % bei der thermischen und 29 % bei der elektrischen Energie angenommen (vergl. Kapitel 10.4).

→ Energiekosten der Annahmestelle:

$$\left[258'420 \text{ kWh}_{th} / a \cdot (1 - 0.95) + 22'481 \text{ kWh}_{el} / a \cdot (1 - 0.29) \right] \cdot 0.117 \text{ CHF} / \text{kWh} = 28'883 \text{ CHF}$$

Ebenfalls zu den Dienstleistungskosten gehören die Abfallgebühren, die für die Abgabe der Störstoffe in der KVA bezahlt werden müssen (3-mal pro Woche ein Sack à 200 kg, 173 CHF/t → 5'398 CHF/a). Total: 35'326 CHF/a.

- **Abschreibungen:** Aus den Investitionskosten und der Nutzungsdauer wird die Abschreibesumme berechnet (Tabelle 19):

	Investition [CHF]	Nutzungsdauer [a]	Abschreibung [CHF/a]
Annahmestelle			
- Mechanik	715'599	5	143'120
- El. Installationen	129'007	10	12'900
Total	844'606		156'020

Tabelle 19: Abschreibungen

- **Kapitalkosten:** Die Investitionen wurden aus Eigenkapital finanziert. Es wird mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 4 % gerechnet. Dies entspricht den Erwartungen der Eigenkapitalrentabilität der Kläranlage. Total: 33'784 CHF/a.

13.1.2 Grenzkostenrechnung

Bei der Schlammbehandlung und Prozesswasserbehandlung wird mit den Grenzkosten gerechnet, d.h., nur der entstehende Mehraufwand wird den Co-Substraten angelastet. Die Grenzkosten pro Kostenstelle werden von Herr D. Stammbach (Leiter Dienste) an der ARA ausgerechnet und hier verwendet. Anhand der Stoffflüsse (vergl. Kapitel 9) können die Grenzkosten dem Kostenträger zugeordnet werden (Tabelle 20):

Kostenstelle	Grenzkosten [CHF/Einheit]	Einheit	Menge [Einheit/d]	Kosten [CHF/a]
Entwässerung	1.6	t	70	41'272
Trocknung	10.8	t H ₂ O	3.7	14'527
Entsorgung Klärschlamm	103	t TS	2	74'961
VED	0.1	t	46	2'345
NED	0.2	t	71	3'994
Biologische Reinigung	701.2	t N _{tot}	97	24'827
Gasaufbereitung	0.007	Nm ³	10'000	25'524
Total				187'450

Tabelle 20: Grenzkosten

13.1.3 Erlöspositionen

Erträge werden über die Annahmegebühren, Strom- und Gaseinspeisung erzielt:

- **Annahmegebühren:** Die Annahmegebühr ist vom Substrattyp abhängig und kann bis 139 CHF/t erreichen. Total: 865'483 CHF/a.
- **Gasertrag:** Für die Gaseinspeisung wird mit 0.05 CHF/kWh gerechnet, was dem Durchschnittspreis über die nächsten 10 Jahre entspricht. Total: 343'545 CHF/a.
- **Stromertrag:** Für die Stromeinspeisung wird pro kWh ein Grundpreis (Tag- und Nachttarif) und eine Mehrwertvergütung (Ökobeitrag) erstattet. Im Schnitt entsteht ein Ertrag von 0.638 CHF/kWh. Total: 69'520 CHF/a.

13.2 Kennzahlen

13.2.1 Kalkulatorischer Gewinn

Der kalkulatorische Gewinn bezeichnet die Differenz aus den Erlösen und den Kosten:

Ertrag [CHF]		Kosten [CHF]	
Annahmegebühren	865'483	Substratannahme:	
Gasertrag	343'545	Personalkosten	81'500
Stromertrag	69'520	Materialkosten	9'500
		Dienstleistungskosten	35'326
		Abschreibungen	156'020
		Kapitalkosten	33'784
		Substratbehandlung:	
		Total Grenzkosten	187'450
1'278'548		503'580	

Tabelle 21: Berechnung des kalkulatorischen Gewinns

Für 2008 ergibt sich ein kalkulatorischer Gewinn von **774'968 CHF**. Das Gewicht der Annahmegebühren wird in der Berechnung deutlich.

13.2.2 Arbeitsverwertung

Mit der Arbeitsverwertung wird die tatsächliche Entlohnung des Arbeitseinsatzes bestimmt. Die totalen Kosten werden um die Arbeitskosten reduziert; die Differenz zum Erlös wird dann durch die Anzahl Arbeitsstunden dividiert:

Gewinn exkl. Personalaufwand:	856'468 CHF
Arbeitsstunden	1254 h
Arbeitsverwertung:	683 CHF/h

Tabelle 22: Arbeitsverwertung

Durch die hohen Erträge und den geringen Arbeitsaufwand entsteht eine aussergewöhnlich hohe Arbeitsverwertung.

13.2.3 Strom- und Gasgestehungskosten

Um die Strom- und Gasgestehungskosten zu berechnen, werden die im Kapitel 8.5 beschriebenen Formeln angewendet.

Aufteilung der totalen Kosten nach Strom- und Biomethanproduktion:

- Bruttoenergie für Strom:

$$\frac{\text{eingespiesenerStrom}}{\eta_{elBHKW}} = \frac{109MWh}{0.34} = 321MWh \quad \rightarrow 4.4\%$$
- Bruttoenergie für Biomethan:

$$\text{eingespiesenesBM} + \text{EnergieAufbereitung} = 6823 + 213 = 7036MWh \quad \rightarrow 95.6\%$$
- Kosten für Strom: $4.4\% \cdot 503'580 \text{ CHF} = 2'675 \text{ CHF}$
- Kosten für Biomethan: $95.6\% \cdot 503'580 \text{ CHF} = 481'422 \text{ CHF}$

Damit können die Brutto-Gestehungskosten berechnet werden (Tabelle 23). Weil die Annahmegebühren die totalen Kosten übertreffen, können die Nettogestehungskosten nicht berechnet werden (sie würden negativ ausfallen).

Strom-Bruttogestehungskosten	0.20 CHF/kWh
Gas-Bruttogestehungskosten	0.07 CHF/kWh

Tabelle 23: Bruttogestehungskosten

13.3 Zusammenfassung und Folgerungen

Die Co-Vergärung der ARA Bern erweist sich als äusserst rentabel. Durch tiefe Kosten und gute Erträge wurde im 2008 ein Jahresgewinn von 774'968 CHF erwirtschaftet.

Der Ertrag setzt sich zu 73 % aus den Annahmegebühren, 21 % aus der Gaseinspeisung und 6 % aus der Stromeinspeisung zusammen. Die Annahmegebühren machen einen sehr dominanten Faktor aus; das heisst, Co-Substrate mit hohen Gebühren tragen am stärksten zur Wirtschaftlichkeit bei.

Bei den Kosten fallen die Abschreibungen für die Annahmestelle stark ins Gewicht (31 %). Weitere relevante Kostenpunkte sind die Personalkosten (16 %) und die Granulatentsorgung (Transport und Abgabegebühr, 15 %) sowie die Kapitalkosten (7 %).

14 SOZIALE FAKTOREN

Die gesellschaftlichen Einflüsse einer Tätigkeit werden oft vernachlässigt, sie haben aber einen wichtigen Einfluss auf ihr langfristiges Bestehen. Durch die Befürwortung oder Ablehnung der Bevölkerung wird auch der politische und gesetzliche Rahmen beeinflusst, was sich wiederum auf den Spielraum der Tätigkeit auswirkt. Die verschiedenen Bereiche und der Einfluss der Co-Vergärung sind:

Arbeitsplätze

Die Vergärung der Co-Substrate in der ARA Bern kann mit ca. 1'254 Arbeitsstunden pro Jahr in Verbindung gebracht werden (vgl. Kapitel 13.1.1). Dies entspricht ungefähr einer 60 % Stelle und kann somit nicht als relevanter Einfluss auf die Arbeitsplatzbeschaffung angesehen werden.

Sicherheit

Die Handhabung von Biogas stellt ein gewisses Gefahrenpotential dar; als Beispiel können Explosionen, Biogas-Brände oder das Bersten von Anlageteilen genannt werden. Jedoch ist die Gefahr nicht grösser, als beim Umgang mit Benzin. Bei entsprechendem Verhalten in den Explosionszonen (Ex-Zone 0 mit höchstem Risiko bis 2 mit geringem Risiko) kann ein sehr hohes Mass an Sicherheit gewährleistet werden.

Betriebliches Risiko

Die grösste Unsicherheit bei der Co-Vergärung sind die Lieferanten der Co-Substrate. Ein Betrieb kann Konkurs gehen oder seine Abfälle bei einem Konkurrenten mit niedrigeren Annahmegebühren entsorgen. Die ARA Bern hat zum Beispiel Ende 2008 einen seiner wichtigsten Lieferanten verloren. Nun fallen jährlich gut 10'000 Tonnen Co-Substrat weg und mehr als 300'000 CHF an Annahmegebühren. Sogar in dieser Grossanlage hinterlässt ein solcher Verlust Spuren in der Finanzbuchhaltung. Wie in der Wirtschaftlichkeitsanalyse aber festgestellt werden konnte, ist der finanzielle Spielraum der ARA gross und die Weiterführung der Tätigkeit keineswegs in Frage gestellt.

Das betriebliche Risiko in der ARA ist durch die aktuelle sehr gute finanzielle Lage und die Vielfalt der Lieferanten effektiv sehr klein.

Regionale Wirtschaft:

Die effiziente und rentable Betriebsführung der ARA Bern trägt zur kostengünstigen Produktion von lokaler und erneuerbarer Energie bei. Ausserdem stellt die Anlage mit der Annahme von organischen Abfällen eine wichtige Dienstleistung (Abfallentsorgung) dar. Dank ihrer Dimension ist eine grosse Flexibilität in Bezug auf Substratmengen, Substrattypen und –zusammensetzung vorhanden. Saisonale Schwankungen eines Produzenten, hygienisch problematische Stoffe oder sehr hohe Wassergehalte stellen keine Probleme dar.

Weiter leistet die ARA einen Beitrag zur Ankurbelung der regionalen Wirtschaft, indem die erwirtschafteten Gewinne investiert werden. Dies bringt Arbeit für Unternehmen der näheren und weiteren Umgebung. Als Beispiel kann die naturnahe Gestaltung des Areals (Zertifizierung 24. April 2004), mit Biotop, Obstbäumen und einem Grillplatz für die Mitarbeiter genannt werden. Auch ist der Bau eines neuen Dienstgebäudes nach Minergie-P-ECO-Standard geplant.

Es kann eine sehr positive Bilanz bezüglich Sicherheit, betrieblichem Risiko und der regionalen Wirtschaft gezogen werden. In Bezug auf Arbeitsplätze ist eine neutrale Bilanz zu ziehen. Aus der Betrachtung geht weiter hervor, dass die Co-Vergärung in ARA einen wertvollen Beitrag zur sicheren, langfristigen und wirtschaftlichen Abfallentsorgung sowie zur Energiegewinnung der Region Bern beiträgt.

TEIL III:

CO-VERGÄRUNG IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BETRIEBEN



15 EINLEITUNG

In der Vergärung landwirtschaftlicher Abfallstoffe liegt ein grosses energetisches Potential. Die Biogasgewinnung ist für viele Landwirte neben der traditionellen Tätigkeit zu einem interessanten Betriebszweig geworden. Neben der Produktion von Biogas, bringt die Vergärung der Landwirtschaft weitere, jedoch schwer quantifizierbare Vorteile. Zum Beispiel ist das vergorene Material praktisch geruchsfrei und störende Geruchsemissionen der Gülle können verhindert werden. Weiter werden Nährstoffverhältnisse verbessert und problematische Stoffe werden zu einem gewissen Grad hygienisiert.

Das produzierte Biogas wird mittels Blockheizkraftwerken in Wärme und Elektrizität umgewandelt, welche auf dem Hof verwendet und vermarktet werden können. Eine vollständige Nutzung der Wärme ist mangels Abnehmer oft schwierig. Das Gärgut wird auf dem Betrieb als Dünger verwertet. Wenn zum Ausgleich der Nährstoffbilanz Stickstoff und Phosphor den Hof wieder verlassen müssen (DZV Art. 6), werden Abnehmerverträge mit anderen Landwirten geschlossen.

Die Vergärung von Gülle allein ist nicht rentabel. Die Gasausbeute ist gering und ausser dem Strom- und Wärmeverkauf werden keine Erträge erzielt. Erst die Annahme von fremden organischen Abfällen und den damit verbundenen Annahmehöhen, sowie der höheren Gasproduktion, machen das Geschäft attraktiv. Die KEV garantieren den Produzenten seit Anfang 2009 zudem einen höheren Stromverkaufspreis.

Wegen dem positiven Einfluss der Co-Substrate auf die Wirtschaftlichkeit wird die Konkurrenz immer grösser und folglich sinken die Annahmepreise. Als wichtigste Konkurrenten werden Kläranlagen angesehen, weil diese durch die niedrigen Kosten die Preise nach unten drücken. Ausserdem ist ihnen keine gesetzliche Limite in Bezug auf die Menge und Transportdistanz der angenommenen Co-Substrate gegeben. Die Co-Vergärung in ARA erschwert damit den Landwirten das Geschäft und zusätzlich gehen ihnen dadurch Nährstoffe verloren. Viele Landwirte sind darüber verärgert und rufen nach gesetzlichen Regelungen.

In diesem Teil der Arbeit soll anhand von Fallstudien ermittelt werden, welchen Einfluss die Co-Vergärung in ARA konkret auf die Landwirtschaft hat. Ausserdem wird auch hier die Effizienz und Zukunftsfähigkeit der Tätigkeit untersucht. Damit wird die Grundlage geschaffen für einen sachlichen Vergleich der beiden Vergärungsvarianten und die Ermittlung der Interaktionen.

16 AUSWAHL DER ANLAGEN UND DATENQUELLEN

Für die Untersuchung werden mehrere Anlagen betrachtet, da in der landwirtschaftlichen Vergärung grosse Unterschiede in Bezug auf Grösse, Verfahrensschritte und Effizienz vorliegen. Die Auswahl der Anlagen wurde stark von den verfügbaren Daten beeinflusst, es konnten aber Daten zu Anlagen verschiedener Grössen ausfindig gemacht werden. Eine Beschreibung der betroffenen Anlagen ist in Tabelle 24 gegeben, wobei die Anlagen anonym bleiben. Die Biogasproduktion wird in Betriebskubikmetern angegeben.

Die Daten für die Anlagen A, C und D wurden 2007 im Rahmen von EnergieSchweiz (Programm des BFE für Energieeffizienz und erneuerbare Energien) ermittelt. Die Daten von Anlage B wurden von Nova Energie zur Verfügung gestellt.

Anlage		A	B	C	D
Inbetriebnahme		2004	2005	2001	2000
Elektrische Leistung BHKW	kWh	100	100	80	50
Faulraumvolumen	m ³	470	475	400	300
Gülle	t FS/a	2'500	1'417	3'040	750
Co-Substrate	t FS/a	330	900	366	250
Anteil Co-Substrat	% FS	12	39	11	25
Biogasproduktion	Bm ³ /a	330'000	127'300	101'730	85'131

Tabelle 24: Anlagebeschreibung der landwirtschaftlichen Betriebe

17 PROZESSBESCHREIBUNG

In der landwirtschaftlichen Co-Vergärung sind nicht nur die Dimensionen, sondern auch die Verfahrensschritte deutlich anders als in der ARA. Die üblichsten Verfahren sind hier beschrieben und in Abbildung 15 sind die Vorgänge zusammen mit den Systemgrenzen schematisch dargestellt.

Aufbereitung und Hygienisierung der Co-Substrate

Störstoffe wie Plastik oder Steine werden aussortiert und die organischen Abfälle wenn nötig zerkleinert. Bei der Verwendung von stark Schwimmdeckenbildenden Co-Substraten (z.B. Panseninhalte, Grassilage) sind zusätzliche Einrichtungen notwendig: Häcksler, Mixerpumpe, Mazerator (Zerkleinerung, Homogenisierung) sowie ein effizientes Rührsystem im Vergärer.

Die Hygienisierung wird bei der Vergärung nicht garantiert. Deswegen müssen Anlagen, die mit Lebensmitteln oder bedenklichem Material fahren (Kategorie III nach VTNP), ihre Substrate während einer Stunde bei 70 °C erhitzen oder drucksterilisieren.

Aufbereitung der betriebseigenen Substrate und Beimischung

Die Vollgülle wird bei der Stallreinigung und durch Regenwasser verdünnt, was einen guten Einfluss auf die Fließfähigkeit hat. Je höher der Wassergehalt, desto höher ist aber auch die Prozessenergie. Je nach Güllequalität sollte der TS-Gehalt zwischen 6 und 10 % liegen [13]. Die vorbehandelten Co-Substrate werden in eine Vorgrube geleitet und mit der Gülle vermischt. Der Eintrag in den Fermenter soll mit möglichst gleichmässiger Substratzusammensetzung erfolgen, damit ein kontinuierlicher und stabiler Abbauprozess gewährleistet ist. Die Fördertechnik muss dem Anlagentyp und der Substratcharakteristik angepasst sein, um Verstopfungen zu verhindern.

Faulung

Der Faulraum ist meist mit einer flexiblen Folie abgedeckt und dient auch gleich als Speicher für das Biogas. In der Regel erfolgt eine Nachgärung, was zu einer Verbesserung des Gasertrages und einer Reduktion der Methanemissionen führt.

Biogasaufbereitung und -verwertung

Das Biogas wird entwässert und entschwefelt (z.B. über einen Aktivkohlefilter). Anschliessend wird es durch ein Blockheizkraftwerk in Strom und Wärme umgewandelt. Es kann mit einem thermischen resp. elektrischen Wirkungsgrad von etwa 48 % resp. 36 % gerechnet werden [7].

Von der erzeugten Wärme werden 19 – 31 % benötigt, um den Fermenter auf Betriebstemperatur zu halten. Die restliche Wärme kann zur Warmwasseraufbereitung, Heizwärme, etc. verwendet werden. Der Strom wird zu ungefähr 8 % für den Betrieb der Anlage gebraucht, die anderen 92 % können ins Stromnetz eingespeist werden.

Gärgut: Separierung, Nachbehandlung und Verwertung

Das vergorene Substrat gelangt in ein Endlager. Normalerweise wird auch in landwirtschaftlichen Betrieben die feste von der flüssigen Fraktion getrennt, was mit Hilfe von Zentrifugen oder Schneckenpressen geschieht. Die feste Fraktion kann kompostiert werden, die flüssige wird vorzugsweise in einem geschlossenen Nachgärbehälter mit aufgesetztem Biogasspeicher aufgefangen. Beide Fraktionen können als Dünger auf dem Hof verwendet oder verkauft werden.

Ausbringung des Düngers

Die Ausbringung des Düngers kann über verschiedenste Techniken stattfinden, was einen grossen Einfluss auf die Ammoniakemissionen in die Umwelt hat. Beim Versprühen des Düngers wird die Oberfläche durch die Tröpfchen- und Nebelbildung um mehrere Zehnerpotenzen vergrössert, was den Übertritt von Ammoniak in die Gasphase erleichtert. Zudem wird die Gülle auf der Oberfläche von Pflanzen grossflächig verteilt, was ebenfalls stark emissionsfördernd wirkt [8]. Eine umweltschonendere Methode ist z.B. das Schleppschlauchverfahren. Zudem hat der Zeitpunkt der Ausbringung (Temperatur, Wind, etc.) einen wichtigen Einfluss auf die Umweltbelastung.

18 SYSTEMGRENZEN

Im Gegensatz zur ARA werden in den landwirtschaftlichen Anlagen nicht nur die Co-Substrate betrachtet, sondern die gesamte Vergärung. Dies ist folgendermassen begründet: in der Landwirtschaft kann die Vergärung der Co-Substrate nicht als separates Geschäft betrachtet werden. Die Einnahmen durch die Annahmehöhen und durch das zusätzlich produzierte Biogas werden schon in die Planungsphase integriert und müssen zur Deckung der Investitionskosten beitragen. Ohne die Co-Substrate wäre die Vergärung wirtschaftlich uninteressant.

Alle Verfahrensschritte zur Vorbehandlung der Co-Substrate und zur Nachbehandlung des Gärguts werden in die Studie mit einbezogen. Die Transportwege der Co-Substrate und die Verwertung der Energieträger (Biogas und Gärgut) liegen auch innerhalb der Systemgrenzen. In Abbildung 15 sind die Systemgrenzen schematisch dargestellt.

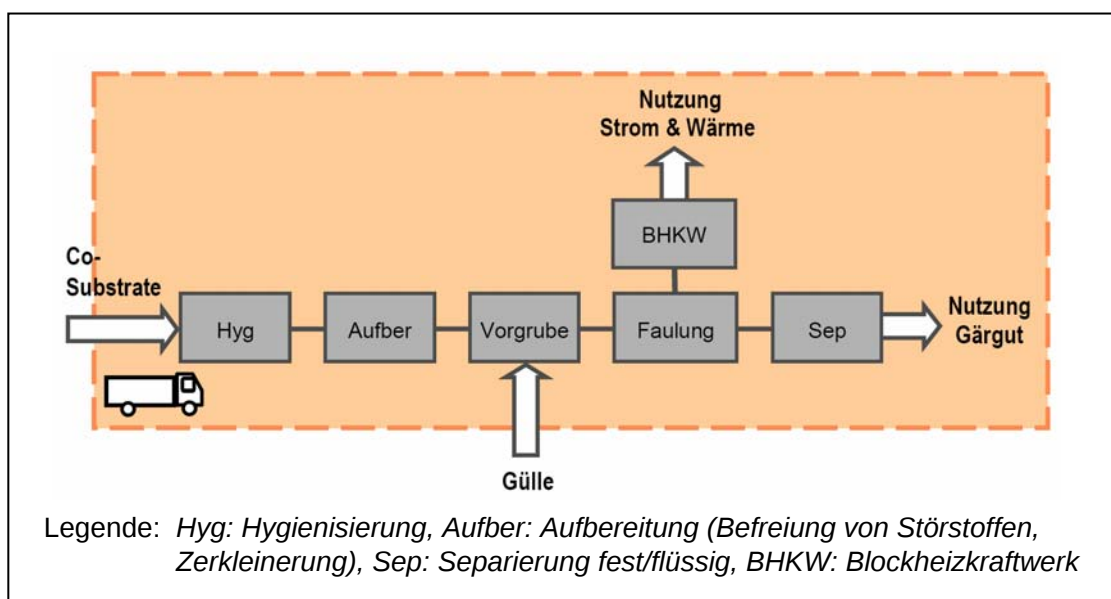


Abbildung 15: Systemgrenzen der landwirtschaftlichen Co-Vergärung

19 VORGEHEN

Anhand von vier Fallstudien wird die landwirtschaftliche Co-Vergärung und der Einfluss der Tätigkeit von ARA auf dieses Milieu untersucht. Für jeden untersuchten Betrieb werden optimierte Situationen simuliert und mit der Ist-Situation verglichen (vgl. Abbildung 16). Damit soll geprüft werden, welche stofflichen, energetischen und wirtschaftlichen Vorteile zusätzliche Co-Substrate den Landwirten bringen könnten.

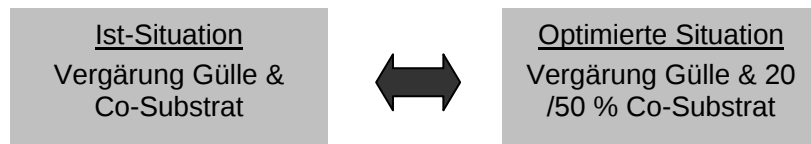


Abbildung 16: Vorgehen

Die Nährstoffwerte der landwirtschaftlichen Substrate werden anhand von Literaturwerten bestimmt (Positivliste Biogasforum). Es werden die organische Substanz, Stickstoff (N_{tot}) und Phosphor (P_{tot}) in Betracht gezogen.

Als zusätzliches Co-Substrat für die Szenarien wird eine theoretische Mischung mit den durchschnittlichen Eigenschaften der Substrate der ARA Bern verwendet. Diese Eigenschaften sind in Tabelle 25 beschrieben:

	TS [%]	oTS [% TS]	N_{tot} [% TS]	P_{tot} [% TS]	Gasausbeute [Nm ³ /t]	CH ₄ [%]
Co-Substrate:	8.8	92	2.2	0.56	131	65

Tabelle 25: Eigenschaften der Co-Substrate für die Szenarien

Für die Szenarien wird jeweils geprüft, ob die Fermenterkapazität ausreichend ist. Eine Verweilzeit von mindestens 20 Tagen [13] und eine maximale Raumbelastung von 4 kg oTS/m³d⁷ werden vorausgesetzt.

19.1 Stoffflüsse

Der Verlust an Nährstoffen durch die Co-Vergärung in der ARA Bern wurde im Kapitel 9 bestimmt. Nun soll weiter untersucht werden, welche Folgen auf lokaler Ebene damit in Verbindung gebracht werden können. Anders gefragt: wie viel Biogas und Nährstoffe könnte ein Landwirt gewinnen, wenn er die nach KEV-Richtlinien (max. 20 %) oder nach Raumplanungsgesetz (max. 50 %) zugelassene Co-Substratmenge vergären würde.

Die organische Substanz, Stickstoff- und Phosphorfrachten im Gärgut der Ist-Situation werden mit den optimierten Varianten verglichen. So wird ermittelt, ob das Potential der Nährstofffrachten durch die Co-Substrate der ARA relevant ist.

Für die Ermittlung der Eigenschaften des Gärguts wird jeweils aufgrund der Substrattypen ein Gesamtabbaugrad der oTS berechnet. Als Richtgrößen werden für Schweinegülle ein Abbau der oTS von 60 % und bei Rindergülle von 25 % verwendet [13]. Stickstoff und Phosphor bleiben während der Gärung im Gärgut erhalten.

⁷ Persönliche Mitteilung von A. Wellinger (Nova Energie)

19.2 Energiebilanz

Der Fremdenergiebezug der Vergärungsanlagen wird der Energieerzeugung gegenübergestellt. Zur Fremdenergie zählen der Transport von Co-Substraten und der Zündölverbrauch. Letzterer wird durch BHKW mit Zündstrahlmotor verursacht, welcher dank seinem guten elektrischen Wirkungsgrad häufig verwendet wird.

Die Ausbringung bzw. Verteilung des Gärguts wird vernachlässigt. Wenn Abnehmerverträge bestehen ist dies zwar ein wichtiger Faktor, aufgrund der Datenlage kann dieser aber nicht einbezogen werden.

Bei der Energieerzeugung wird neben Strom und Wärme auch der Düngerwert beachtet. Dabei werden nur Nährstoffe berücksichtigt, die über Co-Substrate auf den Hof gelangen, denn jene aus der Gülle bleiben unabhängig von der Vergärung auf dem Betrieb.

Die Nettoenergieproduktion wird für die Ist-Situation und die zwei Szenarien ermittelt und verglichen.

19.3 Emissionen

Die CO₂-Bilanz wird erstellt, wobei die Einsparungen durch den Gebrauch des produzierten Biogases und Emissionen durch den Transport und Zündölverbrauch in Betracht gezogen werden. Der Nutzungsgrad der produzierten Energie muss dabei beachtet werden. Wenn die produzierte Wärme nicht genutzt werden kann, darf dafür keine CO₂-Einsparung berechnet werden.

Emissionen von Methan und Ammoniak werden in Zusammenhang mit den verwendeten Techniken beschrieben. Letztere werden nicht quantifiziert; sie werden aber in der vereinfachten Ökobilanz in die Analyse mit einbezogen.

19.4 Vereinfachte Ökobilanz

Das Vorgehen bei der Erstellung der vereinfachten Ökobilanz ist analog zu jenem bei der ARA (vgl. Kapitel 8.4).

19.5 Wirtschaftlichkeit

Um die Wirtschaftlichkeit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu verstehen, werden in einem ersten Schritt die Grundlagen zur Berechnung der Einspeisevergütung dargelegt. Für die Anlagen werden damit die Stromtarife der Ist-Situation und der Szenarien berechnet.

Die Kosten- und Leistungsrechnung der Anlagen werden erstellt, wobei die Vollkosten betrachtet werden. Der kalkulatorische Gewinn, Arbeitsverwertung und Energiegestehungskosten (Berechnung und Bedeutung siehe Kapitel 8.5) werden ermittelt.

Als Stundenansatz wird mit 45 CHF gerechnet (FAT-Ansatz), was in der landwirtschaftlichen Branche ein üblicher Ansatz ist. Bei den Abschreibungen werden die Angaben von den Betreibern übernommen.

19.6 Soziale Faktoren

Hier werden die gesellschaftlichen Auswirkungen der Co-Vergärung in der Landwirtschaft analysiert. Einflüsse auf Arbeitsplätze, Sicherheit, betriebliches Risiko und Unterstützung der regionalen Wirtschaft werden betrachtet. Als Grundlage dafür dienen hauptsächlich Beobachtungen und Diskussionen mit Betroffenen.

20 STOFFFLÜSSE

Die Produkte der Vergärung sind Biogas und Gärgut. Letzteres wird in der Landwirtschaft zu Dünge Zwecken eingesetzt. Soweit möglich findet die Verwertung auf dem eigenen Hof statt, bei einem Überschuss der Nährstoffbilanz wird der Export vom Hof über Abnehmerverträge sichergestellt. In diesem Zusammenhang wird hier ermittelt, welchen Einfluss die Co-Vergärung in der ARA auf die Stoffflüsse in landwirtschaftlichen Betrieben nimmt. Es wird untersucht, wie viel Nährstoffe die einzelnen Landwirte mit zusätzlichen Substraten gewinnen könnten.

Die detaillierten Angaben zu den Substrattypen, -mengen und -eigenschaften der vier Anlagen sind im Anhang VIII aufgeführt: a) Ist-Situation, b) Szenario mit 20 % Co-Substraten und c) Szenario mit 50 % Co-Substraten. Die Eigenschaften des Gärguts („Output“) werden jeweils beschrieben. Für die Szenarien wird auch ermittelt, ob die Kapazität des Fermenters (Verweilzeit, Faulraumbelastung) ausreichend ist.

Im Rahmen der KEV-Richtlinien weisen die Anlagen A und C Spielraum auf, im Rahmen des Raumplanungsgesetzes können alle Anlagen noch mehr Co-Substrate annehmen. Die Fermenterkapazität ist bei allen ausreichend.

20.1 Biogas

Die Biogasproduktion der Anlagen ist in Abbildung 17 beschrieben. Zu erkennen ist die reale Situation („Ist-Situation“), sowie die beiden optimierten Szenarien.

Innerhalb der KEV-Richtlinien ist nicht mehr viel Optimierungsspielraum in Bezug auf die Biogasproduktion. Ganz anders sieht es beim Szenario mit 50 % Co-Substrat aus. Die Produktion kann so um 45 (D) bis 290 % (C) gesteigert werden. Auch der Methan-gehalt des Biogases verändert sich je nach Szenario und damit sein Energiegehalt (wird im Kapitel 21 untersucht).

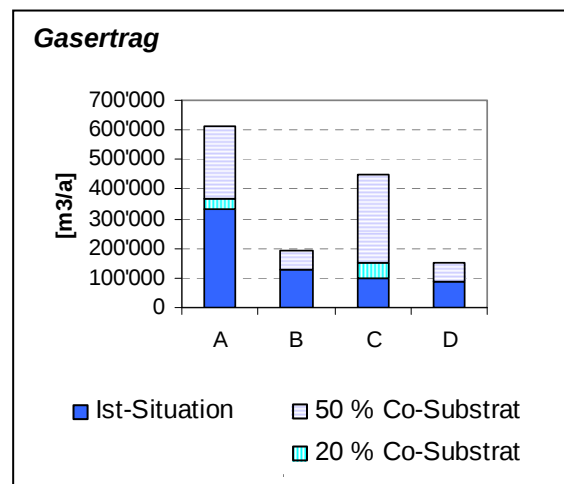


Abbildung 17: Biogasproduktion

20.2 Nährstoffe

Die Nährstoffsituation der Anlagen ist in Abbildung 20 (organische Substanz), Abbildung 20 (Stickstoff) und Abbildung 20 (Phosphor) beschrieben. Die beiden simulierten Szenarien sind jeweils darin zu erkennen.

Generell ist innerhalb der KEV-Richtlinien so gut wie kein Potential zu höheren Nährstofffrachten vorhanden. Innerhalb des Raumplanungsgesetzes ist jedoch ein gewisser Spielraum zu erkennen; vor allem bei den Anlagen A und C, wo die aktuellen Co-Substratanteile am kleinsten sind:

- **oTS (nach Abbau):** 58 t bei A und 83 t bei C können pro Jahr durch die Substrate der ARA dazu gewonnen werden, was einer Erhöhung von 40 resp. 70 % der vorherigen oTS-Fracht entspricht.
- **Stickstoff:** 4.2 t bei A und 5 t bei C können pro Jahr dazu gewonnen werden, was einer Erhöhung von 20 resp. 46 % ausmacht. Es ist davon auszugehen, dass 78 % des Stickstoffs pflanzenverfügbar sind [10], was noch 3.3 und 3.9 t entspricht.
- **Phosphor:** 1.1 t bei A und 1.3 t bei C können pro Jahr dazu gewonnen werden, was einer Erhöhung von 18 resp. 48 % entspricht.

Die Rückführung dieser Nährstoffe in den Boden ist in der landwirtschaftlichen Co-Vergärung gewährleistet; ob die Nährstoffe auf dem jeweiligen Betrieb bleiben können, oder ob sie wegen der Stickstoff- oder Phosphorbilanz den Hof verlassen müssen, kann aufgrund der Datenlage nicht ermittelt werden.

20.3 Zusammenfassung und Folgerungen

In den Anlagen B und D werden die KEV-Richtlinien bereits überschritten. Auch bei den anderen beiden bleibt in diesem Rahmen ein verschwindend kleines Potential, für die Biogasproduktion sowie auch in Bezug auf die Nährstoffe.

Innerhalb des Raumplanungsgesetzes ist noch viel Spielraum vorhanden. In Anlage C ist das Potential mit 300'000 m³ Biogas (+290 %), 6 t Stickstoff (+46 %) und 1.5 t Phosphor (+48 %) pro Jahr am grössten.

Eine Perspektive stellt die Betrachtung der Nährstoffbilanzen der Betriebe dar. Die vorhandenen Daten der Anlagen erlauben es hier nicht. Wenn aber Gärgut vom Hof exportiert werden muss, hat dies Auswirkungen auf die Energiebilanz und die CO₂-Emissionen einer Anlage.

Die Relevanz der Biogas- und Nährstofffrachten wird im Kapitel „Energiebilanz“ weiter untersucht, indem ihnen ein Energiewert zugeschrieben wird und sie in die Energiebilanz integriert werden.

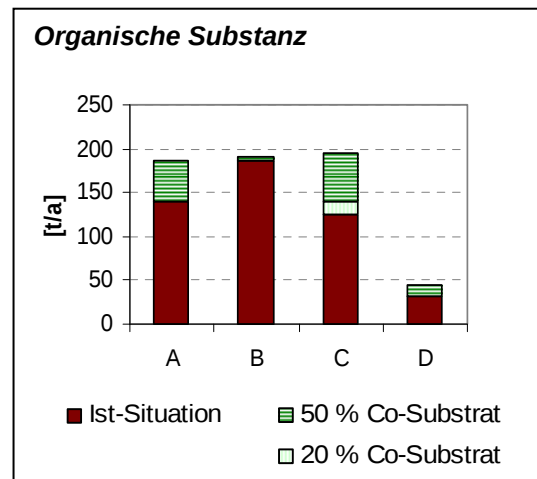


Abbildung 20: Organische Substanz im Gärgut

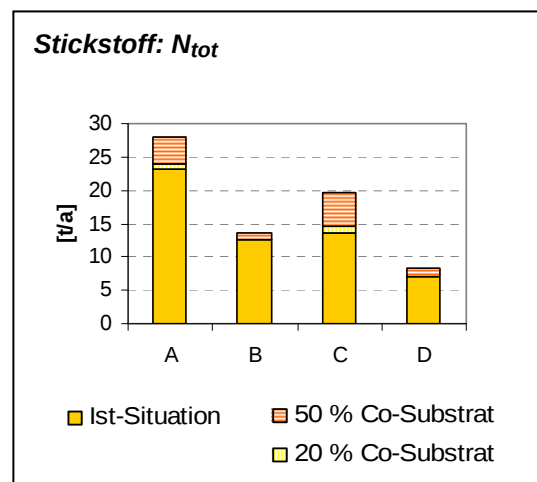


Abbildung 20: Stickstoff im Gärgut

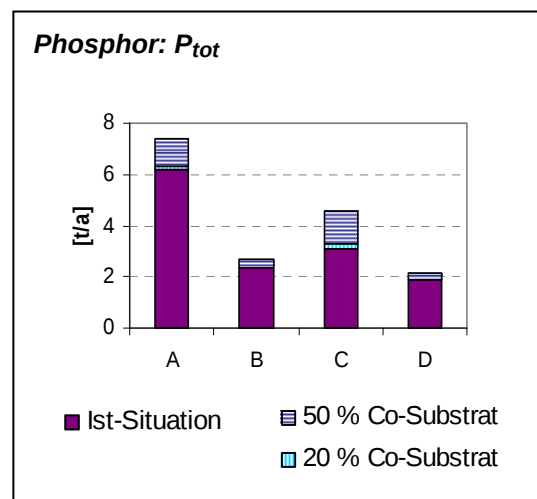


Abbildung 20: Phosphor im Gärgut

21 ENERGIEBILANZ

Um die Nettoenergieproduktion der Anlagen zu berechnen, wird auch hier die Energiebilanz erstellt und dafür der Fremdenergiebezug und die erzeugte Energie berechnet. Über die optimierten Szenarien kann ermittelt werden, welches energetische Potential bei diesen Anlagen vorhanden ist.

Die Energiebilanz für die Anlagen A, C und D werden ermittelt. Die Daten für B sind unzureichend.

21.1 Energieträger

Bei der Vergärung in landwirtschaftlichen Betrieben wird das Biogas in der Regel in einem BHKW verwertet, so auch in den betrachteten Anlagen. Dabei kann mit den folgenden Wirkungsgraden gerechnet werden [7]:

- elektrischer Wirkungsgrad: 36 %
- thermischer Wirkungsgrad: 48 %

Für den Betrieb der Anlage werden 20 bis 30 % der produzierten Wärme und ca. 8 % des Stroms verbraucht [7]. Die sogenannte Prozessenergie wird für die Aufheizung der Substrate (Wärme) sowie für Rührer und Pumpen (Strom) gebraucht.

Im Anhang IX ist die Bruttoenergie des produzierten Biogas und die daraus resultierende Wärme- bzw. Stromproduktion beschrieben; auch der Verbrauch für den Betrieb der Anlagen ist angegeben.

Wichtiger als der Wirkungsgrad ist in der landwirtschaftlichen Vergärung jedoch der Nutzungsgrad, denn für die Landwirte ist es schwierig, externe Abnehmer der Wärme zu finden.

Der Dünger wird ebenfalls als Energieträger betrachtet. Um dessen Wert zu bestimmen, wird für Stickstoff mit 9.6 kWh/kgN [11] gerechnet (entspricht dem Energieverbrauch zur synthetischen Ammoniakherstellung mit dem Haber-Bosch-Verfahren) und für Phosphor mit 13 kWh/kgP [19].

21.2 Nettoenergieproduktion

Da die Anlagen mit der selbst erzeugten Energie gespeist werden, besteht die Fremdenergie ausschliesslich aus dem Zündölverbrauch für das BHKW und der Transportenergie der Co-Substrate. Für Berechnungen werden folgende Werte verwendet:

- Zündöl: Heizwert 10 kWh/l, Verbrauch 0.035 l/kWh_{el} (aus Daten abgeleitet)
- Lieferdistanz der Co-Substrate: 12 km für die aktuellen Co-Substrate, 30 km für die zusätzlichen Co-Substrate (durchschnittliche Lieferdistanz zur ARA)
- Lieferfahrzeuge von 3.5 t, 0.6 kWh/tkm [16]

Zur Energieerzeugung zählen der Verkauf von Strom und Wärme an Dritte, der Verbrauch auf dem Hof (exklusiv des Verbrauchs für die Gärungsanlage) und der Dünger.

Bei den Szenarien muss die Kapazität der BHKW beachtet werden, denn es kann nicht beliebig viel Biogas verarbeitet werden. Im 50%-Szenario der Anlagen A und C kann effektiv nicht die gesamte Biogasmenge umgesetzt werden.

Im Anhang X sind der Fremdbezug und die Erzeugung für die Ist-Situation und die Szenarien beschrieben.

Es fällt auf, dass die Transportenergie mit den zusätzlichen Substraten rasant ansteigt. In der Ist-Situation liegt der Anteil an der Fremdenergie um die 3 %, während im 50 %-Szenario die Anteile auf 9 bis 15 % ansteigen. Weiter ist zu erkennen, dass die Wärmevermarktung einen wichtigen Einfluss auf die Bilanz nehmen kann.

In Abbildung 21 ist die Nettoenergieproduktion der Anlagen dargestellt:

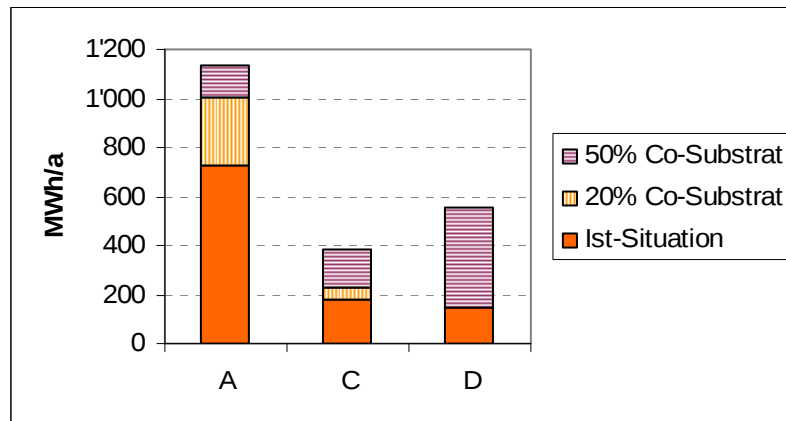


Abbildung 21: Nettoenergieproduktion der landwirtschaftlichen Anlagen

Anlage A produziert eindeutig am meisten Energie (Ist-Situation). Durch die Anwesenheit eines Wärmeabnehmers ist der Nutzungsgrad sehr gross, was hier zum Ausdruck kommt. Bei Auslastung der Anlage könnte die Nettoenergieproduktion um 56 % gesteigert werden. Im 50 %-Szenario wird die Energieerzeugung durch die Kapazität des BHKW limitiert. Um das gesamte produzierte Biogas umsetzen zu können, müsste in ein leistungsstärkeres BHKW investiert werden.

Auch das BHKW der Anlage C weist im 50 % Szenario nicht genügend Kapazität auf. Das Steigerungspotential der Nettoenergieproduktion liegt trotzdem bei 113 %.

Anlage D stösst auch bei voller Auslastung mit Co-Substraten nicht an seine Grenzen. Das gesamte Biogas kann verwertet werden, womit die Nettoenergieproduktion um 188 % gesteigert werden könnte.

22 EMISSIONEN

Durch die Nutzung von Biogas anstelle eines fossilen Energieträgers können Emissionen an klimaschädlichem CO₂ verringert werden. Da in landwirtschaftlichen Betrieben oft kein Wärmeabnehmer vorhanden ist, muss unterschieden werden zwischen folgenden Situationen:

Mit Wärmeabgabe an Dritte: Zur Berechnung der Einsparung an Emissionen wird Erdgas als Ersatzenergie betrachtet, wobei für 1 kWh 198 g CO₂ entstehen würden. Anlagen A und D entsprechen dieser Variante;

Ohne Wärmeabgabe an Dritte: Nur die effektiv genutzte Energie kann zu einer CO₂ Einsparung führen, deswegen wird hier nur der produzierte Strom, sowie die genutzte Wärme für den Vergärungsprozess und auf dem Hof beachtet. Anlage C entspricht dieser Variante.

Emissionen werden durch den Transport der Co-Substrate und den Zündölverbrauch der Blockheizkraftwerke verursacht. Dabei wird mit folgenden Werten gerechnet:

- Transport: Lieferfahrzeuge von 3.5 t mit einem Produktion von 132g CO₂/t km [16]
- Zündöl: Produktion von 265.3 g CO₂/kWh [15]

Die CO₂-Bilanz ist in Tabelle 26 erstellt:

	A	C	D
Ist-Situation			
Energieerzeugung ⁸ [kWh/a]	860'000	257'329	182'606
CO ₂ Einsparung [t/a]	-170	-51	-36
Transport [tkm]	3'960	4'392	3'000
CO ₂ -Produktion [t/a]	+ 0.52	+ 0.58	+ 0.40
Zündölverbrauch [kWh/a]	180'000	75'480	55'000
CO ₂ -Produktion [t/a]	+48	+20	+15
Bilanz	-121	-30	-21
50% Co-Substrat			
Energieerzeugung [kWh/a]	1'281'679	651'782	509'800
CO ₂ Einsparung [t/a]	-274	-129	-101
Transport [tkm]	69'060	84'612	18'000
CO ₂ -Produktion [t/a]	+ 9.12	+ 11.17	+ 2.38
Zündölverbrauch [kWh/a]	306'600	245'280	116'389
CO ₂ -Produktion [t/a]	+81	65	31
Bilanz	-184	-53	-68

Tabelle 26: CO₂-Bilanz der landwirtschaftlichen Anlagen

Bei allen Anlagen fällt die Bilanz negativ aus, das heisst, die Einsparungen sind grösser als die Emissionen.

Der Transport hat einen geringen Einfluss auf die CO₂-Bilanz, es fällt jedoch auf, dass beim 50 % Szenario die Emissionen deutlich zunehmen. Die Bilanz verbessert sich trotzdem beträchtlich, mit bis zu 3-facher CO₂-Einsparung.

In der landwirtschaftlichen Co-Vergärung müssen neben dem CO₂ auch andere Schadstoffe erwähnt werden. Emissionen von Methan und Ammoniak können je nach Lagerungs- und

⁸ Energieerzeugung: Verkauf und Verbrauch auf dem Hof

Ausbringtechnik des Gärguts eine wichtige Dimension erreichen. Der Einfluss der verschiedenen Techniken ist folgendermassen:

Lagertank/ Nachgärung: Wenn der Lagertank des Gärguts abgedeckt ist, kann das Gas aufgefangen und ebenfalls genutzt werden. Diese Massnahme erhöht nicht nur den Energieertrag, sondern reduziert auch die Belastung der Atmosphäre mit Methangas und Ammoniak. Beim Methan handelt es sich um bis zu 20 % der Gesamtproduktion [7].

Ausbringung: Beim Ausbringen der Gülle geht ein Teil des Stickstoffs durch Verflüchtigung des Ammoniaks verloren [13]. Durch die Wahl von geeigneten Ausbringgeräten und günstigen klimatischen und vegetativen Voraussetzungen können die Emissionen um bis zu 60 % gesenkt werden [8]. Dies ist beispielsweise durch den Einsatz des Schleppschlauchverfahrens gegenüber dem Ausbringen mit dem Druckfass zu erreichen. Zusätzlich ist zu beachten, ob das gesamte Gärgut auf dem eigenen Hof ausgebracht wird, oder ob es an andere Betriebe weitergegeben wird. Im zweiten Fall entstehen zusätzliche Emissionen und Kosten durch den Transport.

Die Verfahren der Anlagen sind nicht bekannt. Ausserdem sind Quantifizierungen schwierig, da die Emissionen von vielen Faktoren abhängen: Ammoniumkonzentration und pH-Wert der Gülle, Temperatur, Niederschläge, Feuchtzustand des Bodens, etc. [13]. In der vereinfachten Ökobilanz werden diese Emissionen anhand von Durchschnittswerten in Betracht gezogen.

23 VEREINFACHTE ÖKOBILANZ

Das Kennwertmodell des VUE wird auch für die landwirtschaftlichen Betriebe angewendet, wobei das Prinzip dasselbe bleibt wie bei der ARA (vergl. Kapitel 12). Die Ist-Daten der Anlagen wurden in das Modell eingespiessen. Einige Hypothesen mussten gemacht werden, weil dazu keine Angaben vorhanden waren:

- Es findet eine Nachgärung in geschlossenem Lager statt. *(Die Alternativen wären eine Nachgärung in offenem Lager oder eine Nährstoffseparierung).*
- Es findet eine Entwässerung des Faulschlammes statt. *(Die Alternativen wären eine offene oder geschlossene Kompostierung, eine geheizte Rottetrommel oder keine Behandlung).*
- Es findet keine Kompostierung des festen Gärguts statt
- Das Gärgut wird im Schleppschauchverfahren ausgebracht. *(Die Alternativen wären eine Ausbringung mit dem Schleppschuhverfahren, Cultan-Verfahren oder dem Güllefass).*

23.1 Resultate und Diskussion

Die drei Anlagen erreichen mit dem KWM Prozentwerte für die Ist-Situation von 55 % (A), 60 % (C) und 88 % (D). Das heisst, Anlage A erzielt die besten Resultate, während Anlage D am schlechtesten abschneidet. Jedoch schneiden alle besser ab, als das Referenzszenario und würden somit den Zertifizierungstest bestehen. Die detaillierten Resultate sind in der Abbildung 22 dargestellt.

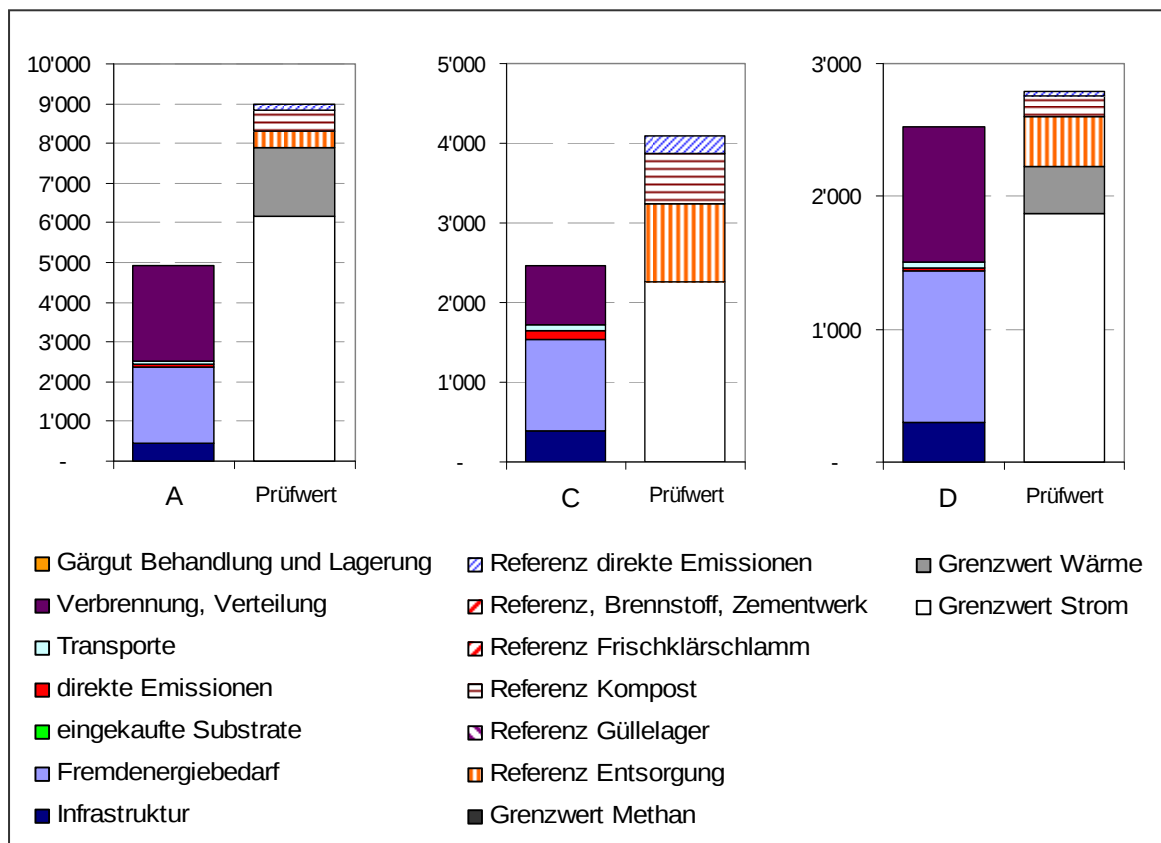


Abbildung 22: Resultate des KWM für die landwirtschaftliche Co-Vergärung

Obwohl die Prozentwerte der Anlagen verschieden sind, nehmen bei allen die gleichen zwei Kategorien am meisten Gewicht ein:

- **Fremdenergieverbrauch:** Die hohen Werte sind auf den Zündölverbrauch für die Blockheizkraftwerke zurückzuführen.
- **Verbrennung, Verteilung:** Diese Kategorie ist hauptsächlich von der Verwertung des Biogases abhängig - die Wärmenutzung hat einen schwachen Einfluss. Eine Verbesserung würde sich bei einer direkten Abgabe des Biogases zeigen, in diesem Falle liegen die Umwandlungsverluste und eventuelle NO_x-Emissionen (BHKW) ausserhalb der Systemgrenzen.

Das beste Resultat erzielt Anlage A dank seiner hohen Stromeinspeisung, denn dies bringt den Referenzwert beträchtlich in die Höhe. Aus dem gleichen Grund weist die Anlage D ein relativ schlechtes Resultat auf: nur wenig Elektrizität wird ins Netz eingespeisen.

23.2 Sensitivität der Resultate

Für die Anwendung des KWM mussten Hypothesen gemacht werden, welche die Resultate beeinflussen. Deswegen wurde die Sensitivität der Resultate bei einer Änderung der Hypothesen getestet. Relevante Unterschiede der Resultate konnten festgestellt werden bei den folgenden Änderungen:

- | | |
|--|----------------------------------|
| - <i>Nachgärung in offenem Lager:</i> | Prozentwert 5 - 11 % schlechter |
| - <i>Keine Behandlung des Faulschlammes:</i> | Prozentwert 10 - 19 % schlechter |
| - <i>Offene Kompostierung:</i> | Prozentwert 15 - 27 % schlechter |
| - <i>Gärgutbehandlung in Rottetrommel:</i> | Prozentwert 9 – 20 % schlechter |

Die Gärgutbehandlung spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung. Im schlechtesten Fall erhalten die Anlagen die folgenden Prozentwerte: A - 77 %, B - 108 %, D - 119 %.

Die Anlagen B und C würden also nicht mehr im Zertifizierungsbereich liegen.

Es wurden nur die Resultate der Ist-Situation beschrieben. Die Szenarien mit 20 und 50 % Co-Substraten wurden auch durchgeführt, haben aber die Resultate nicht wesentlich beeinflusst. Es fand in der Regel eine leichte Verbesserung des Prozentwertes statt, wobei die Kategorie „Transport“ zunahm, die Kategorie „Entsorgung“ des Referenzwertes jedoch um etwa gleichviel zunahm.

23.3 Zusammenfassung und Folgerungen

Das KWM beurteilt Anlage A als die umweltfreundlichste der drei. Das gute Resultat wird primär durch die hohe Stromeinspeisung erzielt. Anlage D hat einen relativ hohen Fremdenergieverbrauch und eine tiefe Stromeinspeisung, was zu einem schlechteren Resultat führt.

24 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Aus energetischer Sicht ist die Co-Vergärung in landwirtschaftlichen Betrieben durchaus sinnvoll. Unter welchen Bedingungen sie auch auf wirtschaftlicher Ebene interessant ist, wird in diesem Kapitel analysiert.

Durch den Vergleich der Ist-Situation mit den optimierten Szenarien wird ermittelt, welchen finanziellen Vorteil zusätzliche Co-Substrate der Landwirtschaft bringen könnten. Weiter kann so ermittelt werden, ob es sinnvoll ist, die KEV-Richtlinien einzuhalten, falls mehr Co-Substrate zur Verfügung stehen.

24.1 Grundlagen

Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Einer davon ist die Einspeisevergütung, welche auch politisch ein hoch aktuelles Thema ist. Bis Ende 2008 waren die Energieversorger verpflichtet, den Strom aus Biogasanlagen zu einem Durchschnittspreis von 0.15 CHF/kWh abzunehmen. Die Differenz zum niedrigeren Marktpreis wurde aus einem Ausgleichsfond finanziert. Zusätzlich erhielten die Produzenten eine Vergütung für den ökologischen Mehrwert (Tarif verhandelbar) des Stroms.

Am 1. Januar 2009 ist die neue Energieverordnung in Kraft getreten, welche Biogasanlagen betrifft, die nach dem 1. Januar 2006 in Betrieb genommen wurden. Sie können von der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) profitieren, welche sich folgendermassen zusammensetzt:

- Grundvergütung, welche von der Anlagegrösse (Leistungsklasse) abhängt
- Landwirtschaftsbonus, wenn der Anteil Co-Substrate weniger als 20 % beträgt
- WKK-Bonus, wenn mehr als 20 % der Wärme extern genutzt werden

In Tabelle 27 sind die entsprechenden Tarife beschrieben:

Leistungsklasse [kW]	0 - 50	51 - 100	101 - 500	501 - 5000	> 5000
Grundvergütung [CHF/kWh]	0.24	0.215	0.19	0.16	0.15
Landwirtschaftsbonus [CHF/kWh]	0.15	0.135	0.11	0.04	0
WKK Bonus [CHF/kWh]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Tabelle 27: Kostendeckende Einspeisevergütung

Der ökologische Mehrwert des Stroms ist damit bereits vergütet und kann nicht nochmals eingefordert werden [1]. Anlagen, die mehr als 20 % Co-Substrat vergären, vermarkten ihren Strom auf dem freien Markt, die Garantie von 0.15 CHF/kWh gilt für sie nicht mehr [1]. Eine gute ökologische Mehrwertvergütung ist deswegen für sie von Bedeutung.

Anlagen, die vor dem 1. Januar 2006 in Betrieb genommen wurden, erhalten weiterhin 0.15 CHF/kWh und verhandeln über den ökologischen Mehrwert [1].

Alle hier betrachteten Anlagen sind vor 2006 in Betrieb genommen worden und können in der Realität nicht von der KEV profitieren. Um die Wirksamkeit der KEV zu beurteilen, wird dies jedoch für die Studie ignoriert.

24.2 Kosten- und Leistungsrechnung

Die Kosten der Co-Vergärungsanlagen bestehen aus dem Aufwand für Personal, Material und Unterhalt, Kapital, Dienstleistungen und Abschreibungen. Die Daten zur Berechnung dieser Grössen sind detailliert im Anhang XI aufgeführt.

In Abbildung 23 sind die Kosten und die Relevanz der Komponenten ersichtlich. Bei den optimierten Szenarien ändern sich ausschliesslich die Unterhalts- und Materialkosten (BHKW Wartung und Zündölverbrauch).

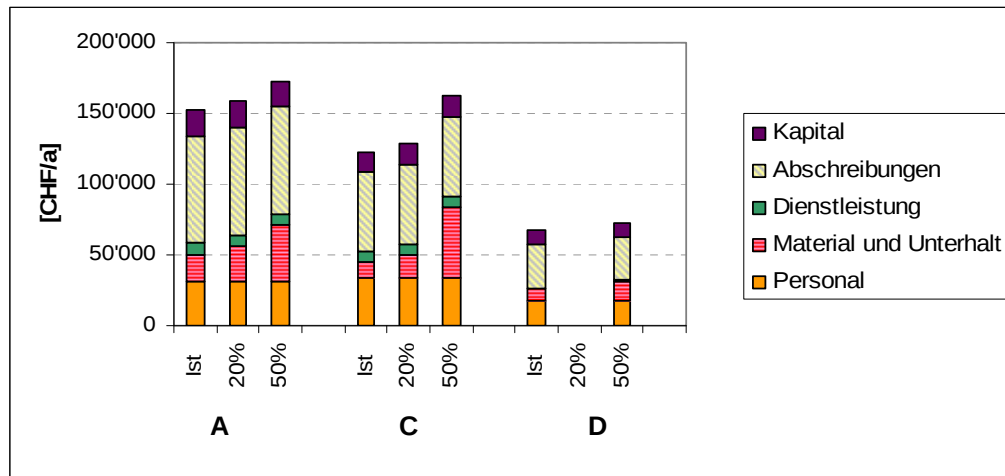


Abbildung 23: Kosten der landwirtschaftlichen Anlagen

Die Abschreibungen sind die wichtigsten Kostenfaktoren. Letztere sind direkt von der angenommenen Nutzungsdauer abhängig und somit von den Angaben des Betreibers. Bei Anlage C werden die längsten Nutzungszeiten angenommen, was sich durch die kleinsten Abschreibungen widerspiegelt.

Die Erträge setzen sich aus dem Stromverkauf, Wärmeverkauf und den Annahmegebühren zusammen. Auch gezählt werden die Einsparungen durch die Wärme und Stromnutzung auf dem Bauernhof (ausserhalb der Biogasanlage). Bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung der optimierten Szenarien gilt:

- Annahmegebühren für die zusätzlichen Co-Substrate 31 CHF/t (Durchschnittspreis ARA)
- Der zusätzlich produzierte Strom wird ins Netz eingespeist
- Einsparungen durch den Verbrauch auf dem Hof bleiben konstant
- Wenn ein Wärmeabnehmer vorhanden ist (A und C) kann auch die zusätzlich produzierte Wärme vermarktet werden.

In Abbildung 24 sind die Erträge der Anlagen dargestellt (detaillierte Angaben im Anhang XI):

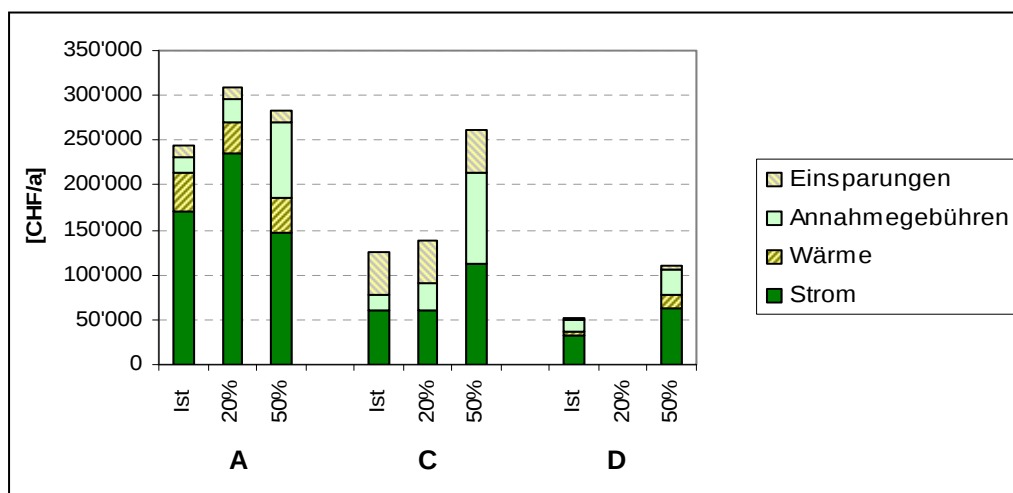


Abbildung 24: Erträge der landwirtschaftlichen Anlagen

Die wichtigste Erlösposition ist bei allen Anlagen und Szenarien der Stromverkauf. Bei A sinken die Einnahmen durch den Stromverkauf im 50%-Szenario, weil die Mehrproduktion an Strom gering ist (Kapazitätslimite BHKW), jedoch der Einspeisetarif von 38 auf 20 Rp./kWh sinkt, da die KEV-Richtlinien nicht erfüllt werden.

Der Ertrag durch Annahmegebühren nimmt mit mehr Co-Substraten zu. Im 50 %-Szenario der Anlage C machen sie knapp 40 % aus.

Der Wärmeverkauf kann wirtschaftlich auch interessant sein, wie bei Anlage A zu erkennen ist. Bis zu 40'000 CHF können jährlich damit eingenommen werden (50 %-Szenario).

24.3 Kennzahlen

Die berechneten Kennzahlen sind in Tabelle 28 aufgeführt:

	Einheit	A	C	D
Ist-Situation				
Kalkulatorischer Gewinn	CHF/a	91'581	2'999	-15'557
Arbeitsverwertung	CHF/h	149	49	5
Stromgestehungskosten				
- Brutto	CHF/kWh	0.24	0.46	0.44
- Netto	CHF/kWh	0.18	0.35	0.35
20% Co-Substrat				
Kalkulatorischer Gewinn	CHF/a	149'798	9'693	
Arbeitsverwertung	CHF/h	220	58	
Stromgestehungskosten				
- Brutto	CHF/kWh	0.20	0.32	
- Netto	CHF/kWh	0.16	0.20	
50% Co-Substrat				
Kalkulatorischer Gewinn	CHF/a	109'161	100'351	36'348
Arbeitsverwertung	CHF/h	171	179	147
Stromgestehungskosten				
- Brutto	CHF/kWh	0.18	0.21	0.18
- Netto	CHF/kWh	0.10	0.11	0.15

Tabelle 28: Kennzahlen der landwirtschaftlichen Anlagen

Es wird deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit sehr stark variieren kann. Anlage A, die grösste der drei, ist am rentabelsten. Sie wirft in der Ist-Situation und in den Szenarien einen stattlichen Jahresgewinn ab, weist relativ tiefe Gestehungskosten und eine sehr gute Arbeitsverwertung auf. In dem spezifischen Fall erweist sich die Annahme von 20 % Co-Substraten sinnvoller als 50 % Co-Substrate, weil das BHKW für letzteres zu leistungsschwach ist und das Biogas nicht vollständig verstromt werden kann.

Anlage C ist auch rentabel, weist aber in der Ist-Situation einen sehr kleinen finanziellen Spielraum auf. Durch die Steigerung der Co-Substrate auf 20 %, können die Kennzahlen wesentlich verbessert werden. Mit 50 % Co-Substraten, also ohne KEV, sieht die Situation nochmals relevant besser aus, obwohl auch hier das BHKW nicht das gesamte Biogas umsetzen kann.

Bei Anlage D ist die Ist-Situation sehr unvorteilhaft. Der Gewinn ist negativ (Verlust), die Gestehungskosten werden durch die Vergütung nicht gedeckt und der Betreiber hat für 5

CHF pro Stunde gearbeitet. Durch Auslastung der Anlage kann die Situation verbessert werden. Bei 50 % Co-Substraten wird auch hier eine gute Wirtschaftlichkeit erreicht.

24.4 Zusammenfassung und Folgerungen

Die drei untersuchten Anlagen zeigen sehr gut die Variabilität der Wirtschaftlichkeit von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Die Resultate sind einerseits von den Umständen und der Betriebsführung abhängig, andererseits von den Hypothesen für die Berechnungen.

Die wichtigsten Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit beeinflussen sind die folgenden:

- **Co-Substrate:** Die Menge, Annahmepreise und Gasausbeute der Co-Substrate sind wichtige Faktoren.
- **Einspeisevergütung:** Die Stromeinspeisung ist eine sehr wichtige Erlösposition der landwirtschaftlichen Anlagen. Der Vergütungstarif beeinflusst massgeblich den Ertrag und ist abhängig von der Grösse der Anlage (Grundvergütung), dem Anteil Co-Substraten (Landwirtschaftsbonus), und externer Wärmenutzung (WKK-Bonus).
- **Anlagegrösse:** In der Regel sind Anlagen je grösser desto rentabler, weil damit die spezifischen Kosten pro produzierte kWh sinken.
- **Nutzungsdauer:** Der Aufwand für Abschreibungen wird über die Nutzungsdauer berechnet. Die Verwendung einer längeren Nutzungsdauer führt zu geringeren Abschreibungskosten.
- **Stundenansatz:** Der Stundenansatz muss wie die Abschreibedauer festgelegt werden und kann das Resultat in die eine oder andere Richtung beeinflussen. Mit der Arbeitsverwertung ist jedoch eine Kenngrösse gegeben, die unabhängig vom Stundenansatz ist.
- **Zinssätze:** Die Kapitalkosten werden über die Zinssätze berechnet. Für das Eigenkapital wird in der Regel mit relativ tiefen (kalkulatorischen) Zinsen gerechnet; auch Fördergelder bzw. zinslose Darlehen haben einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Hingegen fallen die Kapitalkosten von Fremdkapital schnell ins Gewicht.
- **Dimensionierung:** Eine optimale Auslastung der Anlage (v.a. des BHKW) führt zu tieferen spezifischen Produktionskosten.

Damit die landwirtschaftliche Biogasproduktion rentabel und zukunftsfähig ist, braucht es eine sorgfältige Planung der Anlage, gute Kenntnisse der Rechtslage und Richtlinien, sowie eine aufmerksame und aktive Betriebsführung. Mit diesen Grundlagen kann die Co-Vergärung durchaus ein wirtschaftlich interessanter Betriebszweig sein.

Bei grosser Verfügbarkeit von Co-Substraten muss sorgfältig erwogen werden, ob die KEV in Anspruch genommen werden soll. Die Analyse hat gezeigt, dass die Variante mit 50 % Co-Substraten wesentlich interessanter sein kann.

25 SOZIALE ASPEKTE

In den letzten Jahrzehnten mussten viele Landwirte in der Schweiz ihren Betrieb aufgeben, hauptsächlich wegen der ausländischen Konkurrenz und dem immer steigenden Preisdruck. Der ständige Überlebenskampf führt zur Suche nach neuen Betriebszweigen und Einkunfts-möglichkeiten, wie zum Beispiel der Co-Vergärung.

Die Unterstützung von landwirtschaftlichen Projekten wird in der Öffentlichkeit schnell als sozial und positiv gewertet. Es muss jedoch beachtet werden, dass auch diese Tätigkeit mit einem Risiko verbunden ist und genauso zum Misserfolg wie zum Erfolg beitragen kann.

25.1 Einflussbereiche

Arbeitsplätze

Wenn eine Anlage Gewinn abwirft, kann sie zum Überleben eines Landwirtschaftlichen Betriebs beitragen und so einen sehr positiven Einfluss auf die Arbeitsplatzerhaltung nehmen. Bei einem Verlustgeschäft ist der Einfluss jedoch genau umgekehrt.

Sicherheit

Die Sicherheit wird in der Regel so weit als möglich durch sinnvolle Anordnung, Dimensionierung und Werkstoffwahl der Anlagekomponenten gewährleistet. Durch ein angemessenes Verhalten der Betreiber ist auch in der Landwirtschaft die Sicherheit gewährleistet.

Betriebliches Risiko

In kleineren Betrieben, wie den meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen, ist die Abhängigkeit von Co-Substratlieferanten gross. Über die Mitgliedschaft bei Ökostrom Schweiz (Verband der landwirtschaftlichen Biogasanlagenbetreiber) können sich Landwirte aber vor diesem betrieblichen Risiko schützen. Über den Verband wird die Verteilung von Substraten auf die verschiedenen Betriebe geregelt. Transportdistanzen und der Bedarf der Landwirte werden dabei beachtet.

Regionale Wirtschaft

Mit der Voraussetzung, dass die Co-Vergärung ein erfolgreiches Geschäft darstellt, hat sie durchaus einen positiven Einfluss auf die regionale Wirtschaft im landwirtschaftlichen Bereich. Die Biogasproduktion kann einen neuen Betriebszweig und eine neue Einnahmequelle für Landwirte darstellen und somit der Branche einen Aufschwung verschaffen.

25.2 Zusammenfassung

Bei einer guten Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage kann eine durchwegs positive Bilanz in Bezug auf die gesellschaftlichen Einflüsse gezogen werden. Es liegt auf der Hand, dass hingegen eine unrentable Anlage negative Auswirkungen auf Arbeitsplätze und regionale Wirtschaft nimmt. Es ist daher von grosser Wichtigkeit, Biogasanlagen optimal zu konzipieren und zu betreiben.

TEIL IV:
AUSWERTUNG –
VORTEILE UND GRENZEN DER CO-
VERGÄRUNG

26 VERGLEICH DER CO-VERGÄRUNG IN ARA UND LANDWIRTSCHAFT

Die Co-Vergärung in ARA und landwirtschaftlichen Betrieben weist grosse Unterschiede auf – Rahmenbedingungen, Dimensionen, Verfahrensschritte, Biogas- und Gärgutnutzung, Betriebsführung, u.s.w. Ein sachlicher Vergleich ist deswegen eine grosse Herausforderung. Das Bedürfnis dazu ist aus der Konkurrenzsituation auf leicht abbaubare Industrie- und Lebensmittelabfälle entstanden. Die Kenntnis der spezifischen Vor- und Nachteile bietet die Grundlage für die Beurteilung der beiden Varianten und erlaubt zu entscheiden, ob eine Grenzziehung aufgrund von Substrateigenschaften sinnvoll ist.

Die Resultate der untersuchten Aspekte der Co-Vergärung in ARA und Landwirtschaft werden hier nochmals aufgegriffen und einander gegenübergestellt. Die Resultate beziehen sich immer auf die untersuchten Fallstudien und können deshalb nur bedingt verallgemeinert werden.

26.1 Umwelteinflüsse

26.1.1 Stoffflüsse

Bei den Stoffflüssen werden die Nährstoffkreisläufe, die Gärgutverwertung und die Biogasproduktion verglichen. Der qualitative Vergleich ist in Tabelle 29 dargestellt:

	ARA	Landwirtschaft
Biogas	Strom, Wärme, Biomethan → <i>Vollständige Nutzung</i>	Strom, Wärme → <i>Wärme teils ungenutzt</i>
Gärgut	Brennstoff für Zementfabrik → <i>Vollständige Nutzung</i>	Dünger → <i>Vollständige Nutzung</i>
Nährstoffe	Prozesswasser: Entstickung Granulat: Verbrennung → <i>Unterbruch des Kreislaufs</i>	Rückführung in den Boden → <i>Schliessung des Kreislaufs</i>

Tabelle 29: Qualitativer Vergleich der Stoffflüsse

Wegen des Kreislaufunterbruchs in ARA werden bei den Nährstoffen auch die Quantitäten in Betracht gezogen. Die Darstellung in Tabelle 30 erlaubt die Sicht aus dem Blickwinkel der ARA und der Landwirtschaft. Beim lokalen Einfluss auf die Landwirtschaft wird Bezug genommen auf das Szenario „50% Co-Substrat“, damit wird die maximale Nährstofffracht beschrieben, die durch zusätzliche Co-Substrate auf den Betrieb gelangen könnte.

	Verlust durch Co-Vergärung ARA	Lokaler Einfluss auf Landwirtschaft
Phosphor (P_{tot})	13.9 t/a	0.3 – 1.3 t/a
Anteil an Gesamt	4.8 %	12 – 42 %
Stickstoff (N_{tot} , pflanzenverfügbar)	38.7 t/a	0.9 – 3.9 t/a
Anteil an Gesamt	4.6 %	9 – 37 %
oTS	683 t/a	5 – 55 t/a
Anteil an Gesamt	16.3 %	3 – 44 %

Tabelle 30: Quantitativer Vergleich der Stoffflüsse

Die Beurteilung dieser Zahlen ist sehr subjektiv. Ein Nährstoffverlust von mehreren Tonnen pro Jahr ist natürlich nicht vernachlässigbar. Dies gilt besonders für Phosphor, der weltweit als schwindende Ressource gilt.

Bei Betrachtung des Anteils am Gesamtverlust von Nährstoffen in der ARA relativieren sich die Zahlen aber wieder. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es sinnvoll ist, eine Regelung zu erlassen, wenn das 20-Fache davon in der ARA sowieso verloren geht.

Weiter ist der lokale Einfluss auf die Landwirtschaft ermittelt worden. Diese Werte beschreiben, wie viel Nährstoffe ein Landwirt dazu gewinnen würde, wenn er zusätzliche Substrate zur Verfügung hätte und damit seine Anlage auslasten könnte. Zusätzliche Nährstoffe sind aber nicht ausschliesslich positiv zu werten: wenn die Nährstoffbilanz eines Betriebs einen Überschuss aufweist, muss die entsprechende Menge an Gärgut wieder zu einem Abnehmer transportiert werden.

Die Relevanz des Nährstoffverlusts wird im Kapitel 27 weiter diskutiert.

26.1.2 Energie

Die Nettoenergieproduktion ist in Tabelle 31 (ARA) und Tabelle 32 (Landwirtschaft) dargestellt. Weil bei der ARA nur die Energie aus den Co-Substraten, bei den landwirtschaftlichen Anlagen jedoch die gesamte Produktion beachtet wird (vergl. Systemgrenzen), können die Grössen nicht direkt verglichen werden. Um die Energieeffizienz zu beurteilen, wird die Nettoenergieproduktion auf die organische Substanz normalisiert. Dies ist eine Vereinfachung, denn die Biogasproduktion hängt nicht nur von der Menge oTS ab, sondern auch von ihrer Abbaubarkeit und Bioverfügbarkeit.

ARA	
Nettoenergieproduktion [MWh/a]	9'903
Nettoenergieproduktion Pro t oTS [kWh/t oTS]	4'111

Tabelle 31: Nettoenergieproduktion ARA (Co-Substrate)

Landwirtschaft		
Nettoenergie- produktion [MWh/a]	179 – 726	<i>Ist-Situation</i>
	229 – 1'000	20% Co-S.
	381 – 1'134	50% Co-S.
Nettoenergie- produktion pro t oTS [kWh/t oTS]	857 – 2'092	<i>Ist-Situation</i>
	949 – 2'696	20% Co-S.
	897 – 3'079	50% Co-S.

Tabelle 32: Nettoenergieproduktion Landwirtschaft (Gesamtproduktion)

Es erstaunt nicht, dass die Nettoenergieproduktion der ARA um ein Vielfaches grösser ist als bei den landwirtschaftlichen Anlagen. Dies unterstreicht die grosse Bedeutung der Co-Vergärung in der ARA und der damit verbundenen Energieproduktion.

Die normalisierte Nettoenergieproduktion ist in der ARA ebenfalls deutlich grösser als in den landwirtschaftlichen Anlagen (Ist-Situation). Im 50 %-Szenario erreicht Anlage D über 3000 kWh/t oTS. Es ist zu erwarten, dass Anlagen A und C, wenn sie nicht durch die Kapazität des BHKW limitiert würden, eine Nettoenergieproduktion in der gleichen Grössenordnung wie die ARA erreichen würden.

Obwohl in der ARA das Prozesswasser energieaufwändig entstickt werden muss und die Transportwege der Co-Substrate lange sind, wird eine höhere Nettoenergieproduktion erreicht. Die Dimension der Anlage trägt sicher zu der effizienteren Energieumsetzung bei. In der Landwirtschaft hemmt der hohe Zündölverbrauch der BHKW die Nettoenergieproduktion. Tatsächlich werden heute praktisch nur noch Gasmotoren oder mit Pflanzenölen betriebene Motoren eingesetzt.

26.1.3 Emissionen

Die CO₂-Einsparungen der Anlagen (total und auf die Nettoenergieproduktion normalisiert) können anhand von Tabelle 33 verglichen werden.

	ARA	Landwirtschaft	
Total [t/a]	2'482	21 – 121	<i>Ist-Situation</i>
		36 – 169	<i>20% Co-S.</i>
		53 – 184	<i>50% Co-S.</i>
Pro kWh (Netto) [t/MWh]	0.25	0.15 – 0.17	<i>Ist-Situation</i>
		0.16 – 0.17	<i>20% Co-S.</i>
		0.14 – 0.16	<i>50% Co-S.</i>

Tabelle 33: Vergleich CO₂-Einsparungen

Wegen der weit höheren Energieproduktion der ARA ist auch die totale CO₂-Einsparung viel grösser. Normalisiert ist sie jedoch auch noch grösser. Zwar sind die Transportdistanzen länger, die Verwertung des Granulats im Zementwerk führt aber zu grossen Einsparungen. In der Landwirtschaft hat wieder der Zündölverbrauch einen relevanten Einfluss, was die Einsparungen nach unten drückt.

26.1.4 Vereinfachte Ökobilanz

In Tabelle 34 sind die Resultate des Kennwertmodells zusammengefasst:

	ARA [t/a]	Landwirtschaft
Prozentwert:	54 %	55-90 %
Wichtigste Einflussfaktoren:	- Gärgut, Behandlung und Lagerung - Transporte	- Fremdenergieverbrauch - Verbrennung, Verteilung

Tabelle 34: Vergleich Resultate KWM

Die ARA erzielt das beste Resultat, aber auch die landwirtschaftlichen Anlagen werden vom Modell als umweltfreundlich eingeschätzt (Prozentwert < 100 %).

Über das KWM werden die Anlagen in der gleichen Reihenfolge eingestuft, wie bei den eigenen Analysen. Die Resultate heben auch analoge ökologische Schwachpunkte der Co-Vergärung hervor, wie die Analyse der Stoffflüsse und der Energiebilanz dieser Studie belegen. In der ARA führen die Verbrennung des Gärguts und die weiten Transporte der Co-Substrate zu einem negativen Umwelteinfluss, während es in der Landwirtschaft der Fremdenergieverbrauch (Zündöl) und die Verwertung des Biogases im BHKW (was mit dem Zündölverbrauch in Verbindung steht) sind.

Ein grundlegender Unterschied in der Bewertung des Kennwertmodells ist die Beurteilung über das Preissystem. Der ökologische Wert der Entsorgung wird über den Preis der Co-Substrate bewertet. Je höher die Annahmegebühren der Co-Substrate, desto besser das Resultat der Anlage. Das gleiche Prinzip gilt bei der Gärgutabgabe. Weil die ARA für die Granulatlieferung ans Zementwerk bezahlen muss, gilt letzteres als Abfallprodukt. Dies verschlechtert die Bilanz der ARA relevant.

Mit der Bewertungsmethode des Kennwertmodells können zwei verfahrenstechnisch identische Anlagen verschiedene Resultate erzielen, falls ihre Annahme- und Abgabegebühren verschieden sind. Ihr tatsächlicher Umwelteinfluss ist aber der gleiche. Bei einer Bewertung über das Preissystem müssten fixe anstatt reale Preise verwendet werden, denn die wirtschaftliche Lage kann sich ändern und ist oft auch politisch beeinflusst.

26.2 Wirtschaftlichkeit

26.2.1 Kennzahlen

Die ARA Bern weist eine sehr gute Wirtschaftlichkeit aus. Durch die Vergärung der Co-Substrate werden im Jahre 2008 rund 775'000 CHF eingenommen. In der landwirtschaftlichen Co-Vergärung, wo mit den Vollkosten gerechnet werden muss, werden bei den drei Anlagen grosse Unterschiede verzeichnet:

- Ist-Situation: -15'557 – 91'581 CHF/a
- 20% Co-Substrate: 9'693 – 149'798 CHF/a
- 50% Co-Substrate: 36'348 – 109'161 CHF/a.

Die Arbeitsverwertung und die Stromgestehungskosten sind in Tabelle 35 einander gegenübergestellt.

	ARA	Landwirtschaft	
Arbeitsverwertung [CHF/h]	683	5 – 149 58 – 220 147 – 171	<i>Ist-Situation</i> <i>20% Co-S.</i>
Stromgestehungskosten			
- Brutto [CHF/kWh]	0.20	0.24 – 0.46 0.20 – 0.32 0.18 – 0.21	<i>Ist-Situation</i> <i>20% Co-S.</i> <i>50% Co-S.</i>
- Netto [CHF/kWh]	-	0.18 – 0.35 0.16 – 0.20 0.10 – 0.15	<i>Ist-Situation</i> <i>20% Co-S.</i> <i>50% Co-S.</i>

Tabelle 35: Vergleich Wirtschaftlichkeit

Wie zu erwarten war, weist die ARA bessere Kennzahlen aus. Der Gewinn und die Arbeitsverwertung sind so gut, dass die landwirtschaftliche Vergärung, auch in den optimierten Szenarien, weit unterliegt. Dies ist unter anderem auf die Betrachtungsweise zurückzuführen. Bei einer Grenzkostenrechnung werden die Kapitalkosten und Abschreibungen nicht beachtet – Faktoren, welche bei einer Vollkostenrechnung viel Gewicht einnehmen.

Die Stromgestehungskosten der ARA fallen eher hoch aus. Gerade weil mit Grenzkosten gerechnet wurde, wäre hier ein tieferer Wert zu erwarten. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die ARA nicht darauf ausgerichtet ist, Strom ins Netz einzuspeisen. Nur Überschüsse werden verkauft, was im Vergleich zur Gaseinspeisung eine sehr kleine Energiemenge darstellt.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt auch, dass landwirtschaftliche Betriebe ausgezeichnete Kennzahlen ausweisen können und dass, bei Auslastung ihrer Anlagen, die Rentabilität noch wesentlich gesteigert werden kann. Bei Verfügbarkeit von Co-Substraten, muss von Anlage zu Anlage ermittelt werden, ob es sinnvoll ist, die KEV-Richtlinien einzuhalten. Dabei ist die Faulraum- und BHKW- Kapazität in Betracht zu ziehen. Es kann durchaus sein, dass die 50 % Co-Substrat Variante für einen Betrieb wirtschaftlich interessanter ist.

26.2.2 Vergleich der Annahmegebühren

Für einen umfassenden Preisvergleich sind die vorhandenen Daten ungenügend. Es stellte sich als schwierig heraus, für ein gleiches Substrat die Preise in ARA und Landwirtschaft in Erfahrung zu bringen. Folglich werden nur die Durchschnittspreise verglichen (Tabelle 36):

Ø-Preis:	ARA	Landwirtschaft (Ist-S.)
Pro t FS	31 CHF	38 CHF

Tabelle 36: Durchschnittspreise

Die Durchschnittspreise liegen nahe beieinander, sind in der ARA jedoch leicht tiefer als in der Landwirtschaft. Dazu kann erwähnt werden, dass die ARA in der Regel flüssigere Substrate als die Landwirtschaft annimmt.

Der Durchschnittswert ist nicht ausreichend für eine Beurteilung, ob oder wie stark die ARA die Preise nach unten drücken. Ausschlaggebend dafür ist die Preisstruktur, bzw. die Annahmegebühren für jene Substrate, die auch an andere regionale Abnehmer geliefert werden könnten.

26.3 Soziale Faktoren

Bei den gesellschaftlichen Faktoren weisen ARA und Landwirtschaft generell eine sehr positive Bilanz aus. Die Unterschiede, welche die beiden Milieus aufweisen, sind in Tabelle 37 beschrieben:

	ARA	Landwirtschaft
Betriebliches Risiko	Grosser finanzieller Spielraum & breite Kundschaft. Risiko verschwindend klein	Weniger finanzieller Spielraum. Rentabilität von diversen Faktoren abhängig
Arbeitsplätze	Vernachlässigbare Auswirkung auf die Arbeitsplatzbeschaffung	Durch das zusätzliche Einkommen der Co-Vergärung können landw. Betriebe eher überleben.
Regionale Wirtschaft	Durch Flexibilität und Dimension wichtige Dienstleistung (Abfallentsorgung und Energieprod.) der Region	Positiver Einfluss auf landw. Gewerbe

Tabelle 37: Vergleich soziale Faktoren

26.4 Folgerungen: Spezifische Vor- und Nachteile

Nach dem Vergleich aller Aspekte können die spezifischen Vor- und Nachteile der Co-Vergärung in ARA und landwirtschaftlichen Betrieben erörtert werden. In Tabelle 38 sind sie zusammengefasst und jeweils die wichtigen variablen Einflussgrössen genannt.

Beurteilung (+/-) / Variable Einflussgrössen (→)				
	ARA		Landwirtschaft	
Stofffluss	-	Nährstoffverlust bei Lieferungen mit hohen Nährstofffrachten (Flotat, Speisereste) → Nährstoffkonzentrationen	+	Schliessung der Stoffkreisläufe → Nährstoffbilanz, Export Gärgut
Nettoenergie-Produktion	+	Sehr hohe Energieproduktion, optimierte Nutzung und Vermarktung → Transportdistanz Co-Substrate	+/-	Wärmeabnehmer oft nicht vorhanden → Nutzungsgrad der Energie → Transportdistanz Co-Substrate
Emissionen	+	CO ₂ Einsparungen durch Biogas- und Granulatnutzung (CO ₂ -neutral)	+	CO ₂ Einsparungen durch Biogasnutzung
			+/-	Methan und Ammoniakemissionen → Nutzungsgrad der Energie → Lager- und Ausbringtonik
Wirtschaft	+	Ausgezeichnete Rentabilität → Co-Substratmenge → Annahmegebühren	+/-	Wirtschaftlichkeit sehr variabel → Einspeisevergütung → Auslastung → Annahmegebühren
Gesellschaft	+	Positive Bilanz	+	Positive Bilanz, mit der Voraussetzung einer guten Wirtschaftlichkeit

Tabelle 38: Spezifische Vor- und Nachteile

Die ARA Bern leistet mit ihrer Tätigkeit einen sehr wichtigen Beitrag zur Abfallentsorgung und der Produktion einer erneuerbaren Energie. In Bezug auf die Nachhaltigkeit sind zwei negative Punkte zu nennen: der Unterbruch der Stoffkreisläufe und grosse Transportdistanzen. Wegen der hohen Energieproduktion gehen letztere in der Energiebilanz unter, sollten deswegen aber nicht ausser Acht gelassen werden.

Die landwirtschaftliche Co-Vergärung leistet in kleinerem Rahmen, jedoch nicht weniger wichtig, einen Beitrag zur Produktion erneuerbarer Energie. Von Anlage zu Anlage bestehen grosse Differenzen bezüglich der Nachhaltigkeit. Einen negativen Einfluss haben die Absenz von Wärmeabnehmern, ungenügende Auslastung und unangemessene Lager- und Ausbringtonen. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit muss für jeden Betrieb die optimale Lösung gefunden werden. Je nach Situation muss der Vorteil durch mehr Annahmgebühren (mehr Co-Substrate) oder durch höhere Einspeisevergütung (weniger Co-Substrate) ermittelt werden.

Es wird deutlich, dass die Nachhaltigkeit nicht nur davon abhängt, ob ein Substrat in der ARA oder in einem landwirtschaftlichen Betrieb vergärt wird. Viele Faktoren sind vom jeweiligen Betrieb abhängig.

27 STOFFLICHE GRENZEN

Die Problematik der Stoffkreisläufe stellt eine der grundlegenden Motivationen dieser Arbeit dar. Wegen dem Verlust von Nährstoffen durch die Co-Vergärung in ARA wird diese von der landwirtschaftlichen Konkurrenz negativ beurteilt. In diesem Zusammenhang wird versucht eine Grenze festzulegen, wann es sinnvoll ist, aufgrund der stofflichen Zusammensetzung eines Co-Substrats von einer Vergärung in ARA abzusehen. Dazu werden die Co-Substrate der ARA Bern untersucht, wobei die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor in Betracht gezogen werden.

Für die Grenzziehung wird folgendes Vorgehen gewählt: die Nettoenergieproduktion je Substrat wird ermittelt und dem energetischen Wert seiner Nährstoffe gegenübergestellt. Ist die Nettoenergieproduktion grösser, kann gesagt werden, dass eine Wertschöpfung gewährleistet wird. Ist aber der energetische Verlust durch die Nährstoffverbrennung grösser, wird von der Vergärung in einer ARA abgeraten.

Die Nettoenergieproduktion der einzelnen Substrate wird anhand der Biogas- und Granulatproduktion sowie der Prozessenergie und der Transportenergie bestimmt:

- Strom und Biomethan: Die eingespiesene Energie wird proportional zur Gasausbeute je Substrat aufgeteilt.
- Granulatproduktion: die oTS-Fracht der Co-Substrate und der Abbaugrad bei der Faulung sind bekannt. Damit kann die Granulatmenge und die entsprechende Energie berechnet werden.
- Prozessenergie: Die Energie für die Entstickung (SBR und Biostyr) wird proportional zur Stickstofffracht, für die Gasaufbereitung proportional zur Gasfracht und die restliche Prozessenergie (Annahme, Aufwärmung, VED, NED, Entwässerung, Trocknung) proportional zur Co-Substratmenge berechnet.

Zur Berechnung des Energiewertes der Nährstoffe wird (analog zu Kapitel 21) mit 9.6 kWh/kg Stickstoff und 13 kWh/kg Phosphor gerechnet. Beim Stickstoff wird nur der pflanzenverfügbare Anteil (78 %) beachtet.

Im Anhang XII sind die Berechnungen detailliert beschrieben, wobei nur jene Co-Substrate erwähnt werden, die Stickstoff und/oder Phosphor enthalten. In Tabelle 39 kann die Nettoenergieproduktion mit dem Energiewert der Nährstoffe je Substrat verglichen werden.

	Nettoenergieproduktion [kWh/a]	Energiewert N und P [kWh/a]
Hefezellwände	1'124'185	75'400
Speisereste	3'856'099	263'006
Kaffeepresswasser	58'565	19'074
Flotat	3'600'204	197'860
Milchserum	373'671	24'471
Ethanol	399'040	749

Tabelle 39: Nettoenergieproduktion vs. Energiewert N und P pro Co-Substrat

Es stellt sich heraus, dass in allen Fällen die Nettoenergieproduktion weit höher ist als der Energiewert der Nährstoffe. Bei den Speiseresten und dem Flotat, wo die Nährstofffrachten am grössten sind (vergl. Kapitel 9.3), ist sie sogar 15- bzw. 18 -mal höher. Folglich kann für die Co-Substrate der ARA Bern aufgrund stofflicher Eigenschaften keine Empfehlung zum Verzicht der Annahme vorgenommen werden.

28 PARAMETER DER NACHHALTIGKEIT

Bei der Untersuchung und dem Vergleich der Fallstudien hat sich gezeigt, dass der Nährstoffkreislauf nur einer von vielen Faktoren der Nachhaltigkeit der Co-Vergärung ist. In diesem Kapitel werden die weiteren Einflussgrössen betrachtet und ihre Relevanz beurteilt.

Einerseits sind dies Parameter, welche direkt mit dem Substrat in Verbindung gesetzt werden können (Substrateigenschaften), andererseits Parameter, die von den Eigenschaften der Vergärungsanlage oder den Standort abhängen. Aspekte in Zusammenhang mit Nährstoffen werden nicht nochmals aufgegriffen.

28.1 Gasausbeute der Co-Substrate

Organische Abfälle aus der Industrie und dem Lebensmittelgewerbe weisen sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Deswegen kann auch ihr Einfluss auf die Vergärung stark variieren.

Die Konzentration der Trockensubstanz, bzw. der darin enthaltenen organischen Substanz und deren Abbaubarkeit, sind verantwortlich für die Gasausbeute eines Substrats und den Methangehalt des entstehenden Biogases, was wiederum den Energieertrag bestimmt.

Die Energiebilanz und die Wirtschaftlichkeit (Energievermarktung) werden durch Co-Substrate mit guten Gasausbeuten positiv beeinflusst, was die wachsende Konkurrenz auf diese erklärt.

28.2 Annahmegebühren

Die Einnahmen durch die Substratannahme haben einen wichtigen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage. Die Gebühren sind von den Substrateigenschaften (Gasausbeute, TS) und dem Markt (Konkurrenz) abhängig.

Eine Konkurrenzsituation, welche die Annahmegebühren nach unten drückt, ist klar zum Nachteil von kleineren Vergärern.

28.3 Transportdistanz

Die Distanz, über welche die Co-Substrate transportiert werden, beeinflusst die Energie-, und CO₂-Bilanz einer Anlage. Der Standort eines Betriebs spielt dafür eine grosse Rolle.

28.4 Anlagegrösse und Auslastung

Die Anlagegrösse beeinflusst den Kapazitätsspielraum, Flexibilität bei saisonalen Schwankungen der Substratmenge und logistisches Angebot (Annahme, Effizienz). Für Grosskunden sind kleine Anlagen deswegen weniger attraktiv.

In der Regel sinken mit der Grösse einer Anlage die spezifischen Betriebskosten, was zu einer günstigeren Energieproduktion führt. Eine gute Auslastung der Anlage ist eine grundlegende Voraussetzung dafür.

28.5 Gärgutverwertung

Die Verwertung des Gärguts nimmt Einfluss auf verschiedene Emissionen. Bei einem Einsatz als Brennstoff (ARA) können fossile Energieträger ersetzt und die CO₂-Bilanz der Anlage verbessert werden. In der ARA hat die Gärgutverwertung auch einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Für die Abgabe des Granulats an das Zementwerk muss eine Gebühr bezahlt werden, die Tendenz der Gebühr ist jedoch sinkend.

Bei einer Verwertung des Gärguts als Dünger (Landwirtschaft) werden Nährstoffkreisläufe geschlossen und Kunstdünger kann ersetzt werden. Je nach Lagerungs- und Ausbringtechnik können aber Emissionen von anderen Schadstoffen (Methan, Ammoniak) hervorgerufen werden.

28.6 Biogasverwertung

Als Möglichkeiten zur Biogasverwertung wurden die Umwandlung zu Strom und Wärme im BHKW, die Verbrennung im Heizkessel und die Aufbereitung zu Biomethan mit anschliessender Einspeisung ins Erdgasnetz gesehen. Der entscheidende Punkt für die Nachhaltigkeit ist jedoch der Nutzungsgrad: Wenn bei der Verwertung im BHKW kein Abnehmer der Wärme vorhanden ist, geht diese ungenutzt in die Umwelt. Es hat sich gezeigt, dass die Wärmenutzung nicht nur ökologischen Vorteil bringt, sondern auch einen guten Beitrag zur Wirtschaftlichkeit leistet.

29 LÖSUNGSANSÄTZE

In Laufe der Studie stellte sich heraus, dass eine Beurteilung alleine nach Vergärungsbranche – ARA oder Landwirtschaft – nicht sinnvoll ist. Zwar gibt es klare Unterschiede (Nährstoffkreislauf), aber es gibt viele weitere anlagenspezifische und situationsabhängige Faktoren, welche einen Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Co-Vergärung nehmen. Bei den Lösungsansätzen wird also von der eigentlichen Idee, der branchenspezifischen Beurteilung, Abstand genommen. Es werden verschiedene Handlungsmöglichkeiten vorgeschlagen, welche sich auf die Analysen der Kapitel 27 und 28 ausgearbeiteten Parameter beziehen.

29.1 Ergänzung der gesetzlichen Regelungen

Es besteht schon eine Vielzahl von gesetzlichen Regelungen in Bezug auf die Co-Vergärung – allgemein und spezifisch für ARA oder Landwirtschaft (siehe Kapitel 3). Mögliche Ergänzungen in den verschiedenen Bereichen werden hier kommentiert:

- **Nährstoffe:** Bei allen untersuchten Co-Substraten war die Nettoenergiegewinnung grösser als der Energieverlust durch die Verbrennung der Nährstoffe. Folglich wird in Bezug auf die Nährstoffe von einer Empfehlung zur gesetzlichen Regelung abgesehen.
Langfristig ist an eine Nährstoffrückgewinnung im Klärschlamm zu denken. Der Stand der Technik erlaubt dies zwar heute schon, jedoch ist das Kosten/Leistungsverhältnis noch uninteressant.
- **Transportdistanz:** Bei der landwirtschaftlichen Vergärung ist die Transportdistanz schon geregelt; Co-Substrate müssen aus einem Umkreis von 50 km stammen. Für die ARA besteht diesbezüglich keine Limite. Um Transporte quer durch die Schweiz zu verhindern, wäre hier eine analoge Regelung vorstellbar. Zu bedenken gilt jedoch, dass gewisse Abfallproduzenten aufgrund grosser Mengen oder unattraktiver Substrate nur schwer einen Abnehmer in der Region finden. Durch eine Regelung der Distanz könnte sich ein solcher Produzent gezwungen sehen, eine unökologischere Entsorgung seiner Abfälle zu wählen (z.B. Verbrennung).
- **Gärgutverwertung:** In der Landwirtschaft wäre die Forderung nach ökologischen Lagerungs- und Ausbringtechniken sinnvoll.
- **Wärmeverwertung:** Ob die Wärme verwertet werden kann, ist hauptsächlich vom Standort abhängig.
- **Annahmegebühren:** Eine Preisregelung ist nicht empfehlenswert. In einer Marktwirtschaft pendeln sich die Preise über Angebot und Nachfrage ein; ein Eingriff wäre effizienzhemmend.

Problematisch bei gesetzlichen Regelungen ist, dass sie allgemein formuliert werden müssen und spezifischen Situationen nicht Rechnung tragen können. Daraus können kontraproduktive Wirkungen entstehen und deshalb wird davon abgeraten.

29.2 Anreize bei den Co-Vergärungsanlagen

Anstelle von gesetzlichen Regelungen können Lenkungsmassnahmen verstärkt werden, welche zum nachhaltigen Verhalten anregen.

Das Prinzip der „*nachhaltigen Produktion und des effizienten Einsatzes von Strom*“ wird schon im grösseren Rahmen vom Verein für umweltgerechte Elektrizität über die *naturemade star* Zertifizierung verfolgt. Die Stromerzeugung von 20 landwirtschaftlichen Betrieben und 4 Kläranlagen der Schweiz sind *naturemade star* zertifiziert (Stand 04/09, [20]). Neben dem guten Image bringt sie den Anlagen bessere Abnehmertarife, die jedoch ausgehandelt werden

müssen. Eine Steigerung der Vorteile durch die Zertifizierung könnte diese attraktiver machen. Denkbar wäre die Zusicherung eines minimalen Tarifs für Ökostrom.

Die Zunahme der zertifizierten Betriebe würde einen flächendeckenderen Einfluss erlauben und zusätzliche Massnahmen, z.B. zur besseren Kommunikation und Koordination zwischen ARA und Landwirtschaft könnten ergriffen werden.

Eine weitere bestehende Infrastruktur stellt der Verband der landwirtschaftlichen Biogasbetreiber - Ökostrom Schweiz - dar. Die zentrale Koordination der organischen Abfälle führt zur Minimierung der Transportwege für die dezentrale Energieproduktion. Aus- und Weiterbildung für landwirtschaftliche Vergärer sorgen für das nötige Know-How und eine Plattform für Diskussionen und Informationsaustausch. Eine analoge Infrastruktur für die Co-Vergärung in ARA würde auch in dieser Branche zu einer effizienteren Handhabung der Co-Substrate führen und könnte die Aufgabe der Kommunikation mit den landwirtschaftlichen Vergärrern übernehmen.

29.3 Anreize bei den Abfallproduzenten

Ein neuer Ansatz ist die Schaffung von Anreizen direkt bei den Abfallproduzenten, die nachhaltigste Entsorgungsmöglichkeit zu wählen. In Bezug auf die Vergärung besteht noch keine Infrastruktur, welche diese Anreize umsetzen könnte. Es existieren aber verschiedenste nationale und internationale Betriebs- oder Produkt-zertifizierungen (Valais excellence, ISO 14001, etc.), welche diese Kriterien in ihr Verfahren integrieren könnten.

Eine andere Möglichkeit ist die Einführung einer Transporttaxe für vergärbare Abfälle, die weiter als 50 km transportiert werden. Damit wären nur Lieferungen an ARA betroffen. Die Taxe könnte direkt von der Vergärungsanlage eingezogen werden und in einen Fond laufen, der für die Förderung der nachhaltigen Vergärung eingesetzt würde.

30 PERSPEKTIVEN

In dieser Arbeit sind eine Kläranlage und vier landwirtschaftliche Betriebe untersucht worden. Es hat sich gezeigt, wie unterschiedlich Co-Vergärungsanlagen in der Landwirtschaft sein können. Doch auch in ARA bestehen solche Unterschiede. Die ARA Bern stellt eine der grössten und fortschrittlichsten Kläranlagen der Schweiz dar, was zu den meist ausgezeichneten Resultaten beigetragen hat. In kleineren, weniger modernen ARA wäre wahrscheinlich ein grösseres Potential zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und zur Ermittlung von Schwachstellen ausfindig zu machen.

In Bezug auf die landwirtschaftliche Co-Vergärung konnten die Nährstoffbilanzen der Betriebe infolge mangelnder Datenverfügbarkeit nicht erstellt werden. Die Ermittlung der Anzahl Landwirte, die verpflichtet sind, einen Abnehmer für ihr Gärgut zu finden sowie dessen Einfluss auf die Energie- und CO₂-Bilanz und auf die Wirtschaftlichkeit wäre eine interessante Ergänzung zu dieser Arbeit. Auch der Einfluss der Lagerungs- und Ausbringtonstechniken des Gärguts stellt eine Vertiefungsmöglichkeit dar. Eine Quantifizierung und Beurteilung der Emissionen würde Aufschluss über das Ausmass der Umwelteinflüsse der verschiedenen Techniken geben.

Im Kapitel 29 „Lösungsansätze“ wurden Ideen zur Umsetzung der Resultate in die Realität angedeutet. Für konkrete und effiziente Vorschläge müsste aber eine separate Studie geführt werden, welche die Möglichkeiten und deren Auswirkungen genau analysieren würde.

31 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit war die Erarbeitung der Grundlagen, welche es erlauben, Vorteile und Grenzen der Vergärung von leicht abbaubaren Industrie- und Lebensmittelabfällen in Abwasserreinigungsanlagen zu bestimmen und den Vergleich zur landwirtschaftlichen Vergärung zu erstellen. Das Projekt kam zustande dank dem Engagement von Nova Energie und der ARA Bern, mit dem Interesse, eine Beurteilung der Co-Vergärung zu erlauben, die sich auf Fakten und sachliche Argumente stützt.

Die Aufgabenstellung zeigte sich als eine vielseitige und interessante Herausforderung. Die technische, politische und soziale Dimension der Thematik bietet unendliche Untersuchungs- und Vertiefungsmöglichkeiten, wodurch die Notwendigkeit entsteht, die Studie klar einzugrenzen und die Ziele präzise zu formulieren.

Die grösste Schwierigkeit der Arbeit war, einen gerechten Vergleich von zwei Vergärungsbranchen zu erstellen, bei denen unterschiedliche Rahmenbedingungen, Dimensionen und Prozessabläufe herrschen. Dieser Vergleich ist jedoch gerechtfertigt bzw. notwendig wegen der Konkurrenzsituation auf dieselben Co-Substrate und den daraus folgenden Bestrebungen zu politischen Lenkungsmaßnahmen und eventuell weiteren gesetzlichen Regelungen. Durch differenzierte Betrachtungen, oft aus verschiedenen Blickwinkeln, wurde versucht, dieser Herausforderung Rechnung zu tragen.

Eine weitere Schwierigkeit war die Verfügbarkeit und Vertrauenswürdigkeit von Daten. Zum Einen musste mit sehr grossen Datenmengen umgegangen werden, oft auch mit widersprüchlichen Informationen, andere Daten hingegen waren schwierig zu ermitteln. Die Vertrauenswürdigkeit der Daten ist essentiell für die Qualität der Arbeit und deshalb wurde diesem Aspekt viel Aufmerksamkeit geschenkt. Auch die Plausibilität der Resultate wurde regelmässig überprüft.

Die grundlegenden Ziele der Arbeit wurden erreicht, wenn auch noch Potential zur Vertiefung von verschiedenen Punkten besteht. Die Vor- und Nachteile der Co-Vergärung in ARA und landwirtschaftlichen Betrieben wurden aufgezeigt, quantifiziert und beurteilt. Ein Vorgehen zur Festlegung einer Grenzziehung in Bezug auf die Problematik der Nährstoffkreisläufe in ARA wurde vorgeschlagen. Für die ARA Bern führt die Grenzziehung jedoch zu keinen Limitierungen der Co-Substrate.

Weil sich in der Studie gezeigt hat, dass die Nachhaltigkeit der Vergärung nicht davon abhängt, ob sie in ARA oder Landwirtschaft stattfindet, wurde in der Auswertung von der eigentlichen Idee, der branchenspezifischen Beurteilung, Abstand genommen. An ihrer Stelle wurden die anlagenspezifischen Parameter erarbeitet, welche Einfluss auf die Umweltverträglichkeit und die Rentabilität eines Betriebs nehmen und welche Relevanz ihnen zuzuschreiben ist. Diese Betrachtungsweise erlaubt eine Beurteilung von Fall zu Fall, die der jeweiligen Situation gerecht wird.

32 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Angele H., Serafimova K. (2008). *Biomasse-Strom: Perspektiven für Energieversorger*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Bulletin SEV/AES 2008-8.
- [2] Braun R., Wellinger A. (2003). *Potential of Co-digestion*. IEA Bioenergy, Task 37.
- [3] Bréthaut Y., Gremaud D., Margot J. (2007). *Traitement de l'ammonium du lisier digéré après biométhanisation*. Design Project Section Sciences et Ingénierie de l'environnement, EPF Lausanne.
- [4] Baserga U. (2000). *Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, FAT-Berichte Nr. 546, Ettenhausen.
- [5] Baserga U. (1998). *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, FAT-Berichte Nr. 512, Ettenhausen.
- [6] Charles R., Flisch R., Richner W., Sinaj S. (2009). *Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau*. Forschungsanstalten Agroscope Reckenholz-Wädenswil und Agroscope Reckenholz-Tänikon, Agrarforschung 16(02), 2-54.
- [7] Dux D., Engeli H., Gazzarin C., Gubler N. (2007). *Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, ART-Berichte Nr. 676, Ettenhausen.
- [8] Edelmann W., Baier U., Engeli H., Schleiss K. (2001). *Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas*. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 210146.
- [9] Engeli H., Membrez Y., Ndoh M., Nussbaumer T., Sommerhalder M., Tacchini C. (2006). *Wirtschaftlichkeit von heutigen Biomasse-Energieanlagen*. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 270006.
- [10] Holm-Nielson J. (2009). *Biofertilizer optimal recycling, processing digestate to valuable products*. Seminar programme IEA Bioenergy, Task 37.
- [11] Mulder A. (2003). *The quest for sustainable nitrogen removal technologies*. Water Science and Technology Vol 48, 1: 67-75.
- [12] Oettli B., Blum M., Peter M., Schwank O., Bedniaguine D., Dauriat A., Gnansounou E., Chételat J., Golay F., Hersener J. L., Meier U., Schleiss K. (2004). *Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz*. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 240180.
- [13] Wellinger A., Baserga U., Edelmann W., Egger K., Seiler B. (1991). *Biogas Handbuch, Grundlagen-Planung-Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen*. Verlag Wirz AG, Aarau.
- [14] Wiedenhöft C. (2000). *Mitbehandlung von biogenen Abfällen in Faulbehältern*. Merkblätter Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW), ISSN 0947-5788.

Internetseiten:

- [15] Bundesamt für Energie: www.bfe.ch
- [16] ESU-services, fair consulting in sustainability: www.esu-services.ch
- [17] IEA Bioenergy, www.iea-biogas.net
- [18] Informationsstelle von EnergieSchweiz, www.biomasseenergie.ch
- [19] Landwirtschaft und Wald Luzern, www.lawa.lu.ch/phosphor-word.pdf
- [20] Naturemade! www.naturemade.ch
- [21] Schweizerischer Biogas Fachverband, www.biogas.ch

33 LISTE DER TABELLEN

Tabelle 1:	Wichtigste Gesetzestexte zur Co-Vergärung	15
Tabelle 2:	Anlagedaten der ARA Bern.....	18
Tabelle 3:	Co-Substrate der ARA Bern.....	18
Tabelle 4:	Bilanzierung des Massenflusses.....	26
Tabelle 5:	Granulatproduktion	27
Tabelle 6:	Gasproduktion nach Klärschlamm und Co-Substraten	27
Tabelle 7:	Bilanzierung des Massenflusses, Nullwert.....	28
Tabelle 8:	Bilanzierung des Massenflusses, Co-Substrate.....	29
Tabelle 9:	Stofffluss der Co-Substrate	32
Tabelle 10:	Einfluss der einzelnen Co-Substrate auf den Stofffluss	32
Tabelle 11:	Bruttoenergieproduktion durch das Biogas	33
Tabelle 12:	Bruttoenergieproduktion durch das Granulat	34
Tabelle 13:	Energieverbrauch durch die Co-Substrate	35
Tabelle 14:	Fremdenergie für die Co-Substrate.....	35
Tabelle 15:	Energieverbrauch durch den Transport der Co-Substrate	35
Tabelle 16:	Energieerzeugung durch die Co-Substrate	36
Tabelle 17:	Energiebilanz der Co-Substrate	36
Tabelle 18:	CO ₂ -Bilanz der Co-Substrate	37
Tabelle 19:	Abschreibungen	41
Tabelle 20:	Grenzkosten.....	41
Tabelle 21:	Berechnung des kalkulatorischen Gewinns	42
Tabelle 22:	Arbeitsverwertung	42
Tabelle 23:	Bruttogestehungskosten	43
Tabelle 24:	Anlagebeschreibung der landwirtschaftlichen Betriebe.....	47
Tabelle 25:	Eigenschaften der Co-Substrate für die Szenarien	49
Tabelle 26:	CO ₂ -Bilanz der landwirtschaftlichen Anlagen.....	55
Tabelle 27:	Kostendeckende Einspeisevergütung.....	59
Tabelle 28:	Kennzahlen der landwirtschaftlichen Anlagen.....	61
Tabelle 29:	Qualitativer Vergleich der Stoffflüsse	65
Tabelle 30:	Quantitativer Vergleich der Stoffflüsse	65
Tabelle 31:	Nettoenergieproduktion ARA	66
Tabelle 32:	Nettoenergieproduktion Landwirtschaft.....	66
Tabelle 33:	Vergleich CO ₂ -Einsparungen	67
Tabelle 34:	Vergleich Resultate KWM	68
Tabelle 35:	Vergleich Wirtschaftlichkeit	69
Tabelle 36:	Durchschnittspreise	69
Tabelle 37:	Vergleich soziale Faktoren.....	70
Tabelle 38:	Spezifische Vor- und Nachteile	70
Tabelle 39:	Nettoenergieproduktion vs. Energiewert N und P pro Co-Substrat	72

LISTE DER ABBILDUNGEN

Abbildung 1:	Aufbau der Arbeit	12
Abbildung 2:	Prozessbeschreibung der Co-Vergärung in ARA.....	19
Abbildung 3:	Systemgrenzen der Co-Vergärung in ARA	21
Abbildung 4:	Massenfluss der ARA [t/d].....	26
Abbildung 5:	Nullwert des Massenflusses.....	28
Abbildung 6:	Massenfluss der Co-Substrate	29
Abbildung 7:	Stickstoffbilanz der ARA [kgN/d]	30
Abbildung 8:	Stickstoffbilanz für Nullwert und Co-Substrate [kgN/d].....	30
Abbildung 9:	Phosphorbilanz der ARA [kgP/d].....	31
Abbildung 10:	Phosphorbilanz für Nullwert und Co-Substrate [kgP/d]	31
Abbildung 11:	Energiebilanz der ARA Bern [MWh/a]	33
Abbildung 12:	Verwendung des Biogases	34
Abbildung 13:	Systemgrenzen des KWM (VUE, 2009)	38
Abbildung 14:	Resultate des KWM für die Co-Vergärung der ARA	39
Abbildung 16:	Vorgehen	49
Abbildung 17:	Biogasproduktion	51
Abbildung 18:	Organische Substanz im Gärgut.....	51
Abbildung 29:	Stickstoff im Gärgut.....	51
Abbildung 20:	Phosphor im Gärgut.....	51
Abbildung 21:	Nettoenergieproduktion der landwirtschaftlichen Anlagen	54
Abbildung 22:	Resultate des KWM für die landwirtschaftliche Co-Vergärung.....	57
Abbildung 23:	Kosten der landwirtschaftlichen Anlagen	60
Abbildung 24:	Erträge der landwirtschaftlichen Anlagen.....	60

ANHÄNGE TEIL II:

ABWASSERREINIGUNGSANLAGEN (ARA BERN)

ANHANG I GASAUSBEUTEVERSUCHE

Chemische Analyse:

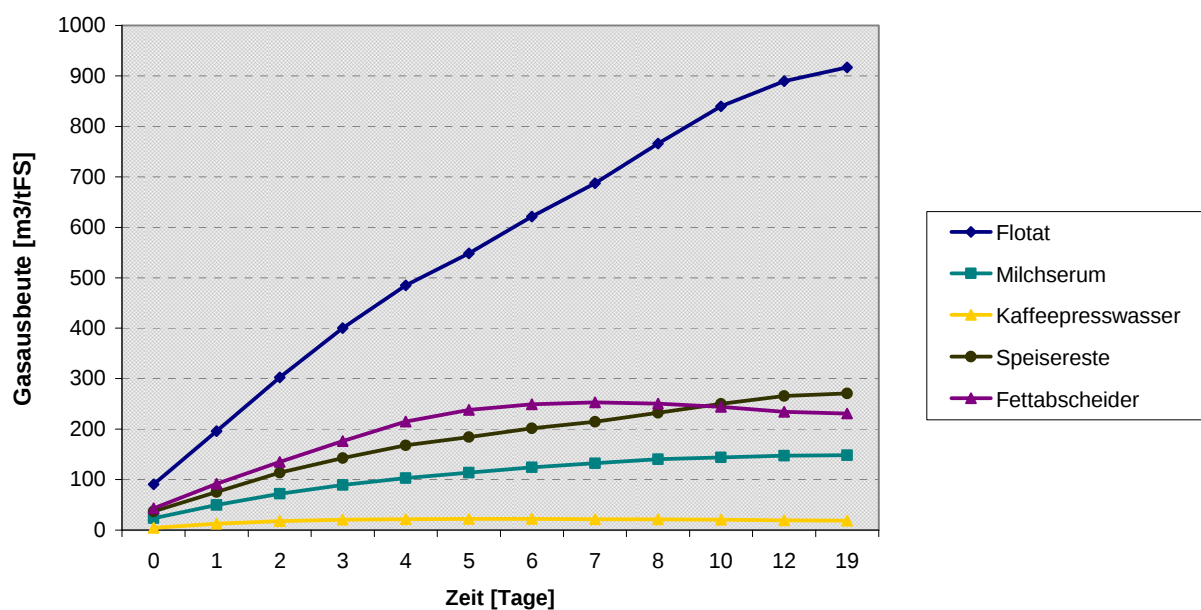
	Einheit	Flotat	Milchserum	Kaffeepr.	Speisereste	Fettabs.	Grenzwert
TS	% FS	17.00	7.09	1.00	17.40	5.06	
oTS	% TS	88.8	69.9	94.7	90.1		
PB	mg/kg TS	<12	<12	<12	<12	<12	120
Cd	mg/kg TS	0.13	<0.1	<0.1	<0.1	0.18	1
Cu	mg/kg TS	23	<10	52	<10	46	100
Ni	mg/kg TS	9	<3	7	<3	16	30
Hg	mg/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1
Zn	mg/kg TS	188	<40	87	54	195	400

Gasausbeute:

Einwaage: 600 g total

	Einheit	Flotat	Milchserum	Kaffeepr.	Speisereste	Fettabs.
Verhältnis Substrat/Klärschlamm	g/g	10/590	35/565	50/550	25/575	15/585
Anzahl Proben	-	3	3	1	3	3
Gasproduktion Netto	L/Flasche	9.2	5.2	0.9	6.8	3.5
Gasausbeute	m³/t	917	148	18.9	270	231

Nettoproduktion aus Co-Substraten



ANHANG II TS-FLUSS DER SCHLAMMBEHANDLUNG / GRANULATPRODUKTION

Gesamtfluss:

		Input Faulung	Abbau bei Faulung	Output Faulung	Input FremdS	Ver- dünnung	Rückläufe SBR +Bios.	Input Trocknung	Brüden	Granulat
Total	t/d	706.5		695	173	84	876	76	51.9	24.1
	t TS/d	29.5	34 %	19.6	8.9		0.6	28	4.5	22.3
	t oTS/d	17.1	58 %	7.2	4.3		0.03	11.6	0.1	11.5

Aufschlüsselung nach Klärschlamm und Co-Substraten:

		Input Faulung	Abbau bei Faulung	Output Faulung	Input FremdS	Ver- dünnung	Rückläufe SBR +Bios.	Input Trocknung	Brüden	Granulat
Klärschlamm	t/d	630		624	173	77	804	69.9	47.8	22.1
	t TS/d	22.4	24 %	17.1	8.9		0.6	25.5	5.1	20.4
	t oTS/d	10.5	50 %	5.3	4.3		0.03	9.6	0	9.6

Co-Substrate	t/d	76.5		71.8	0	6.9	72.7	6.1	4	2
	t TS/d	7.1	66 %	2.4			0.1	2.4	0.45	1.93
	t oTS/d	6.6	71 %	1.9			0	1.9	0	1.88

Bemerkung: Die TS – Gehalte der einzelnen Co-Substrate sind im Anhang III beschrieben

ANHANG III ZUSAMMENSETZUNG UND GASAUSBEUTE DER CO-SUBSTRATE

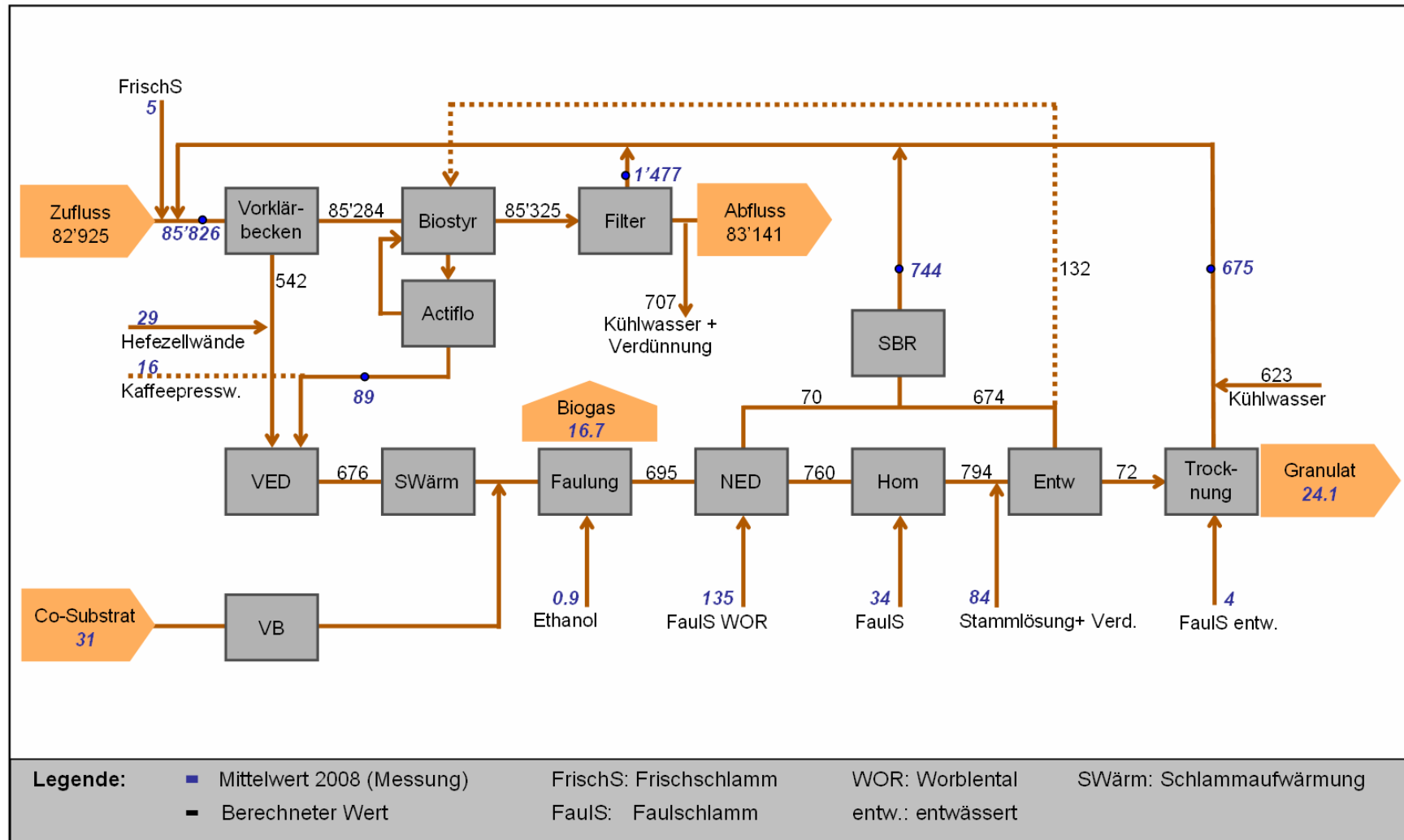
Konzentrationen	Co-Substrat	TS [%]	oTS [%TS]	N _{tot} [% TS]	P _{tot} [% TS]	Gasausbeute [Nm ³ /t FS]	Methangehalt [%]
	Hefezellwände	8 ⁽⁷⁾	96	0 ⁽⁵⁾	0.7 ⁽⁵⁾	9 ⁽²⁾	55 ⁽⁷⁾
	Speisereste	18.9 ^{(3), (4)}	92.7	3.1 ⁽³⁾	0.4 ⁽¹⁾	270 ⁽⁴⁾	61 ⁽¹⁾
	Kaffeepresswasser	1 ^{(3), (4)}	91.7	3.9 ⁽³⁾	0.33 ⁽³⁾	19 ⁽⁴⁾	61 ⁽⁷⁾
	Fettabscheider	5.1 ⁽⁴⁾	84	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	231 ⁽⁴⁾	68 ⁽¹⁾
	Flotat	21 ^{(3), (4)}	88.3	6.0 ⁽³⁾	1.1 ⁽³⁾	916 ⁽⁴⁾	68 ⁽⁷⁾
	Milchserum	6.9 ^{(3), (4)}	65.9	3.2 ⁽³⁾	0.7 ⁽³⁾	148 ⁽⁴⁾	60 ⁽¹⁾
	Enteisungswasser	1 ⁽⁷⁾	72	0 ⁽⁷⁾	0 ⁽⁷⁾	9 ⁽²⁾	61 ⁽⁷⁾
	Ethanol-Wassergemisch	40 ⁽⁷⁾	97	< 2 ⁽⁶⁾	0 ⁽⁶⁾	330 ⁽²⁾	63 ⁽¹⁾
	Getränke Abfall	5 ⁽⁷⁾	75	0 ⁽⁷⁾	0 ⁽⁷⁾	9 ⁽²⁾	61 ⁽⁷⁾
	Speiseöl	99 ⁽¹⁾	99	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	776 ⁽¹⁾	67 ⁽¹⁾

- Quellen:
- ¹⁾ Positivliste Biogas Forum
 - ²⁾ Oppliger S. (2008)
 - ³⁾ Laboranalyse (von ARA Bern in Auftrag gegeben)
 - ⁴⁾ Laboranalyse (von Nova Energie durchgeführt)
 - ⁵⁾ Beuker Tierfutter. (Werte angepasst, da Abfall- nicht Futterprodukt: -30% P). Laboranalyse nicht möglich (nicht mehr geliefert).
 - ⁶⁾ Angaben des Lieferanten
 - ⁷⁾ Schätzung / sonstige Quellen

Frachten	Co-Substrat	Menge [t/a]	TS [t/a]	oTS [t/a]	N _{tot} -Fracht [t/a]	P _{tot} -Fracht [t/a]	Gasausbeute [Nm ³ /a]
	Hefezellwände	10'698	899	863	0	5.8	96'282
	Speisereste	4'895	925	858	28.7	3.7	1'321'650
	Kaffeepresswasser	5'658	57	52	2.2	0.2	106'936
	Fettabscheider	2'456	125	105	0	0	567'336
	Flotat	1'584	333	294	20	3.7	1'450'944
	Milchserum	1'073	74	49	2.4	0.5	158'804
	Enteisungswasser	958	10	7	0	0	8'622
	Ethanol-Wassergemisch	314	126	122	0.1	0	103'620
	Getränke Abfall	309	15	12	0	0	2'781
	Speiseöl	32	32	31	0	0	24'832
	TOTAL	27'977	2'595	2'392	53.3	13.9	3'841'807

ANHANG IV MASSENFLUSS

a) Gesamtfluss (Einheit: [t/d])

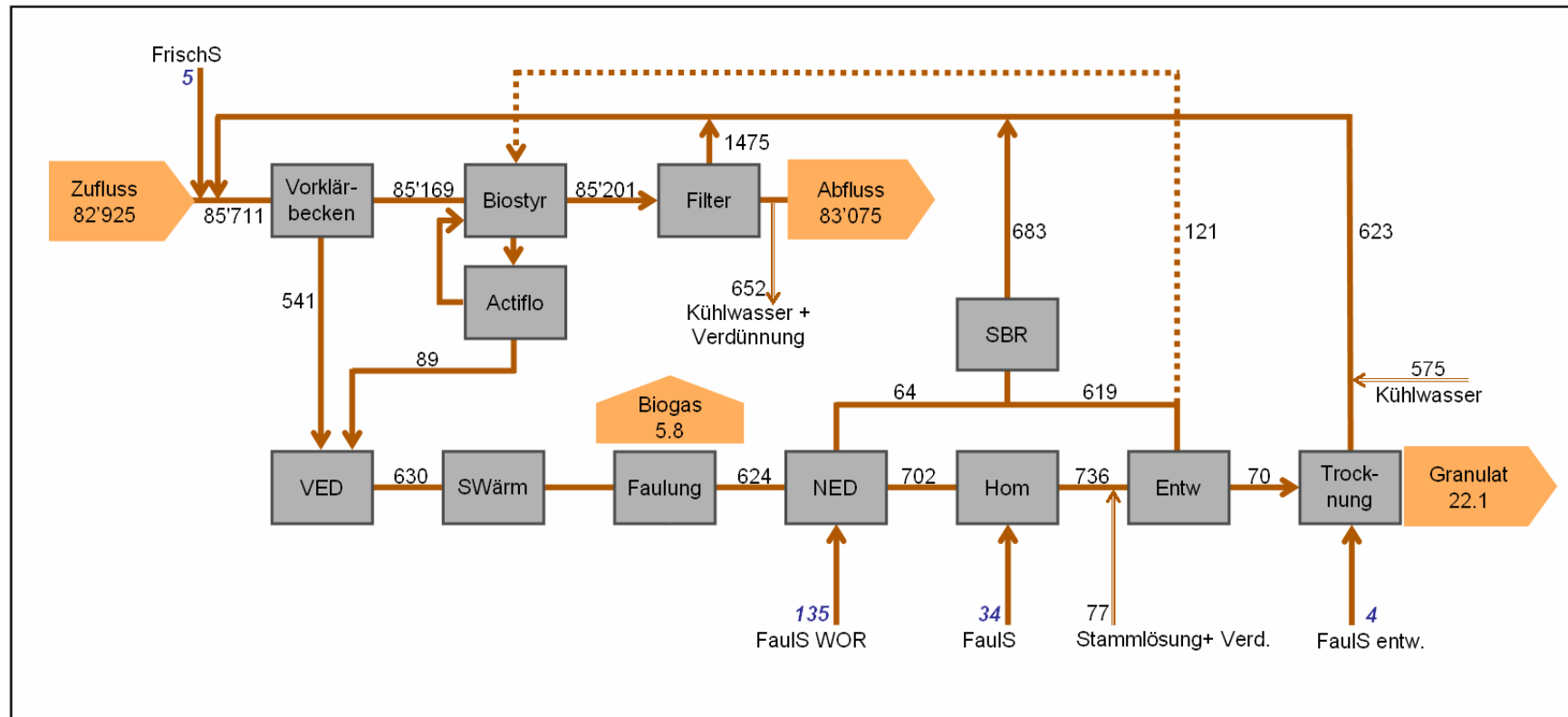


b) Nullwert (Einheit: [t/d])

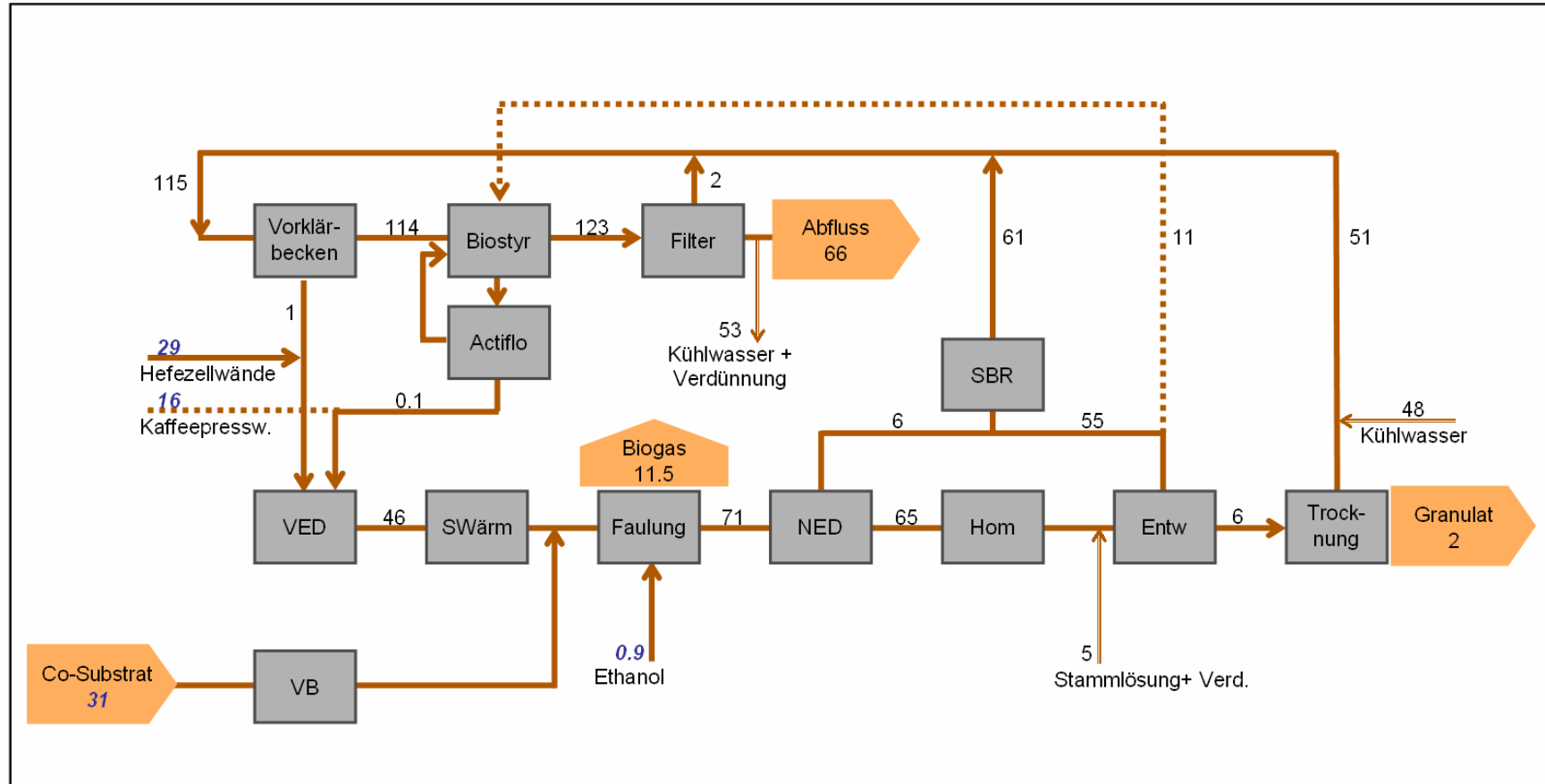
Massenverteilungsgrade [%]

(anhand des Gesamtflusses berechnet):

Verfahrensschritt	Abwasser	Schlamm	Rücklauf Zufluss
Vorklärung	99.4	0.6	
Biostyr / Actiflo	99.9	0.1	
Filter	98.3		1.7

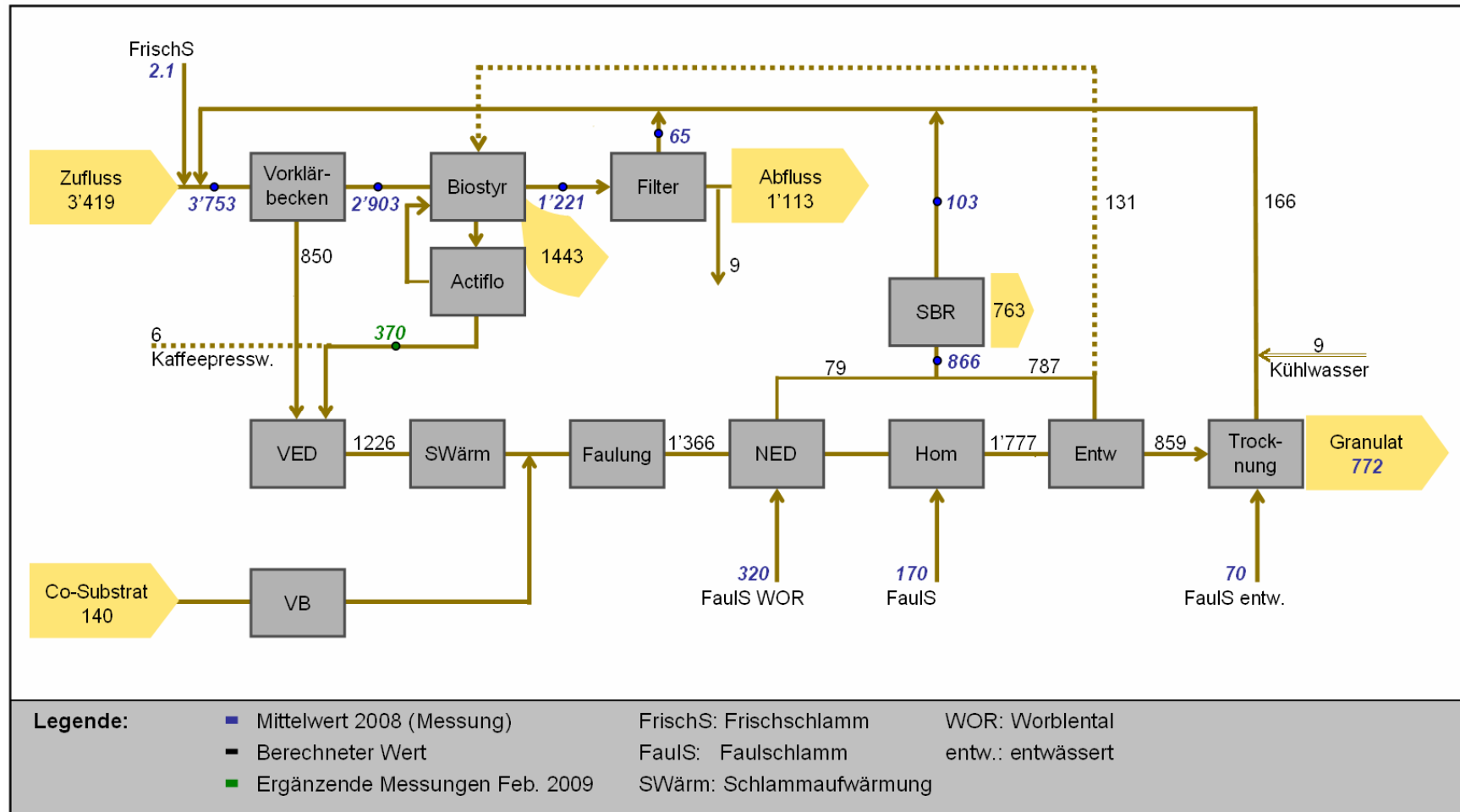


c) Co-Substrate (Einheit: [t/d])



ANHANG V STICKSTOFFFLUSS

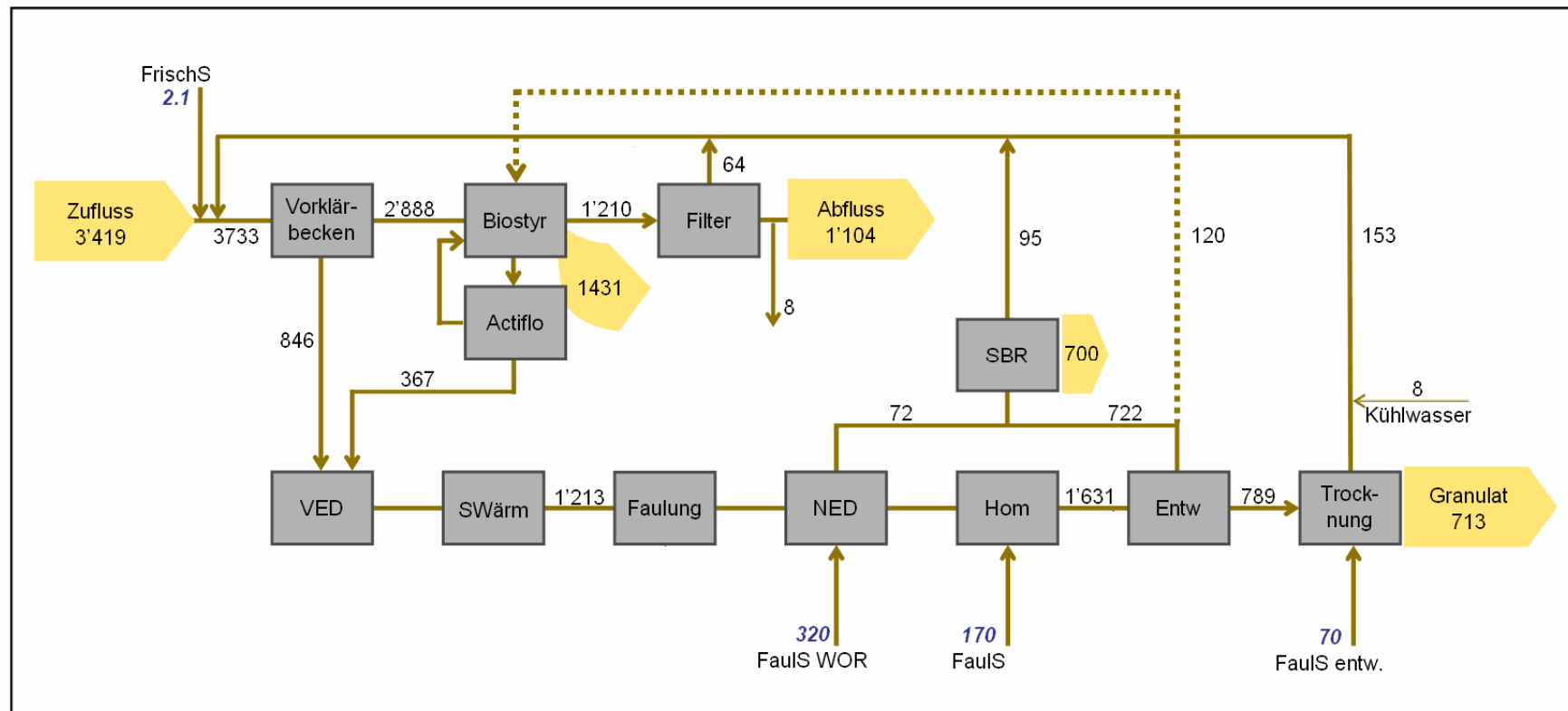
a) Gesamtfluss (Einheit: [kg/d])



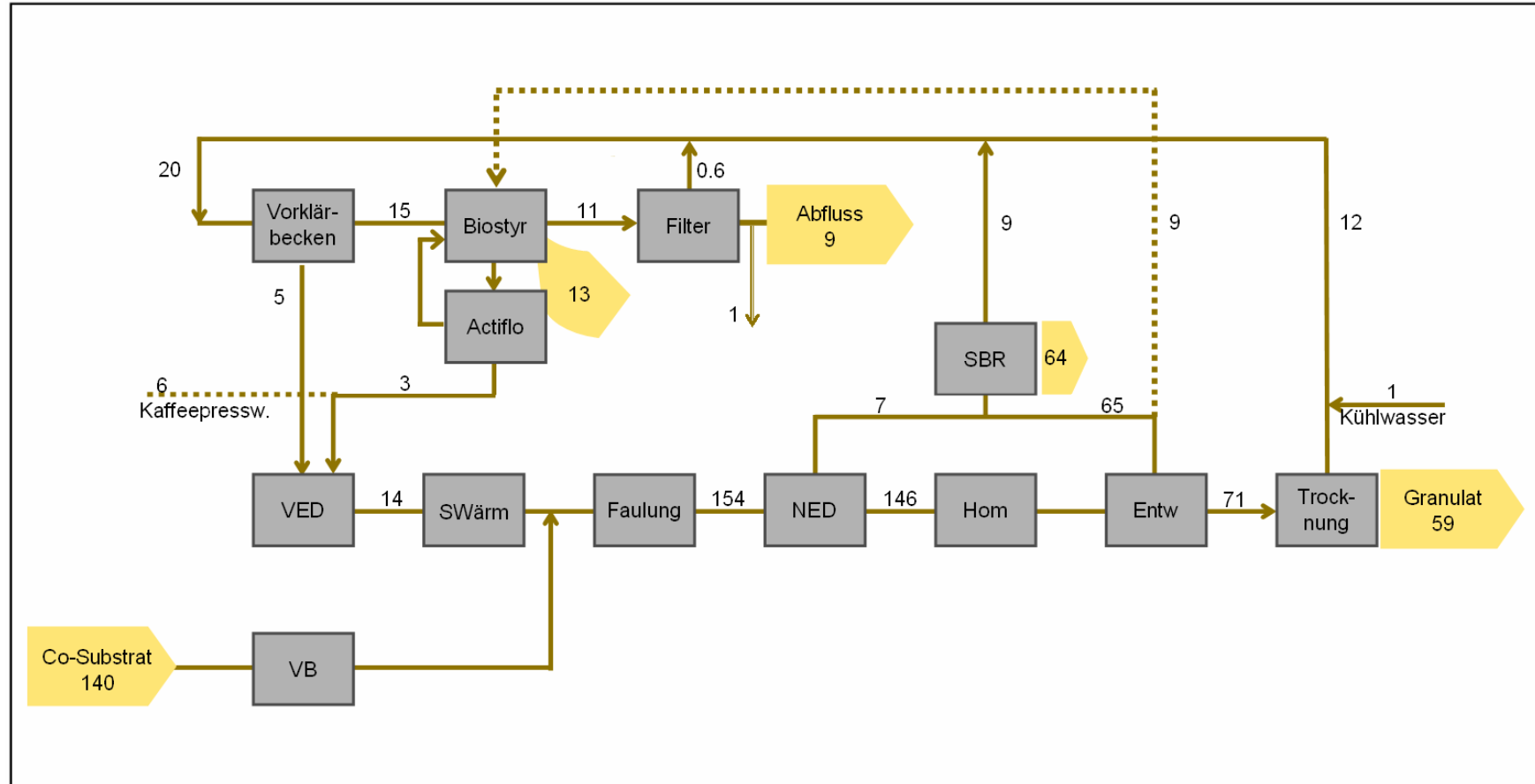
b) Nullwert (Einheit: [kg/d])

Massenverteilungsgrade [%]
(anhand des Gesamtflusses berechnet):

Verfahrens-schritt	Abwasser	Schlamm	Rücklauf Zufluss	Rücklauf SBR	Rücklauf Biostyr	Luft
Vorklärung	77.4	22.6				
Biostyr / Activflo	39.8	12.0				48.2
Filter	91.9		5.3			
NED		95.3		4.7		
Entwässerung		48.3		43.4	9.3	
SBR			11.9			88.1
Trocknung		81.7	16.4			

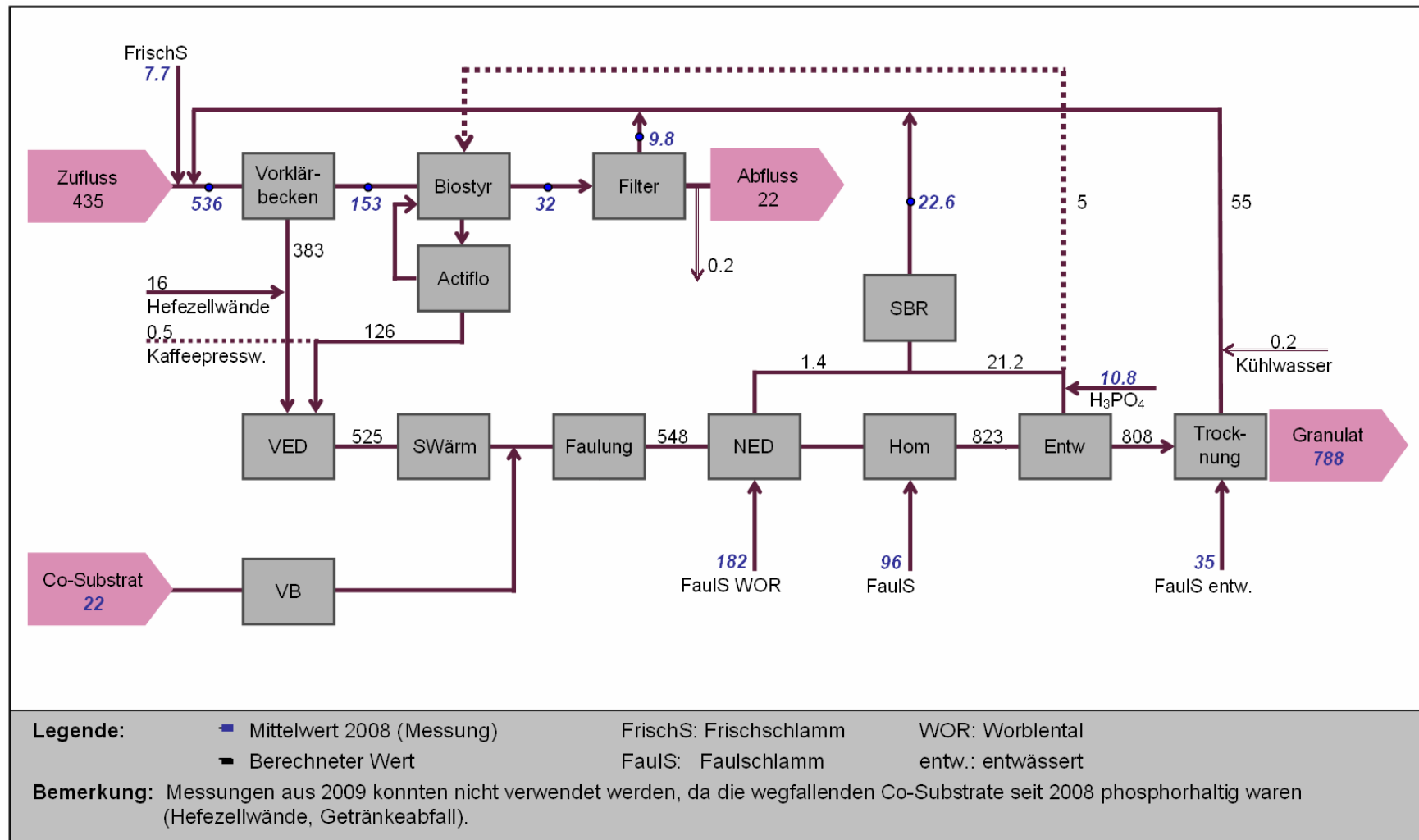


c) Co-Substrate (Einheit: [kg/d])



ANHANG VI PHOSPHORFLUSS

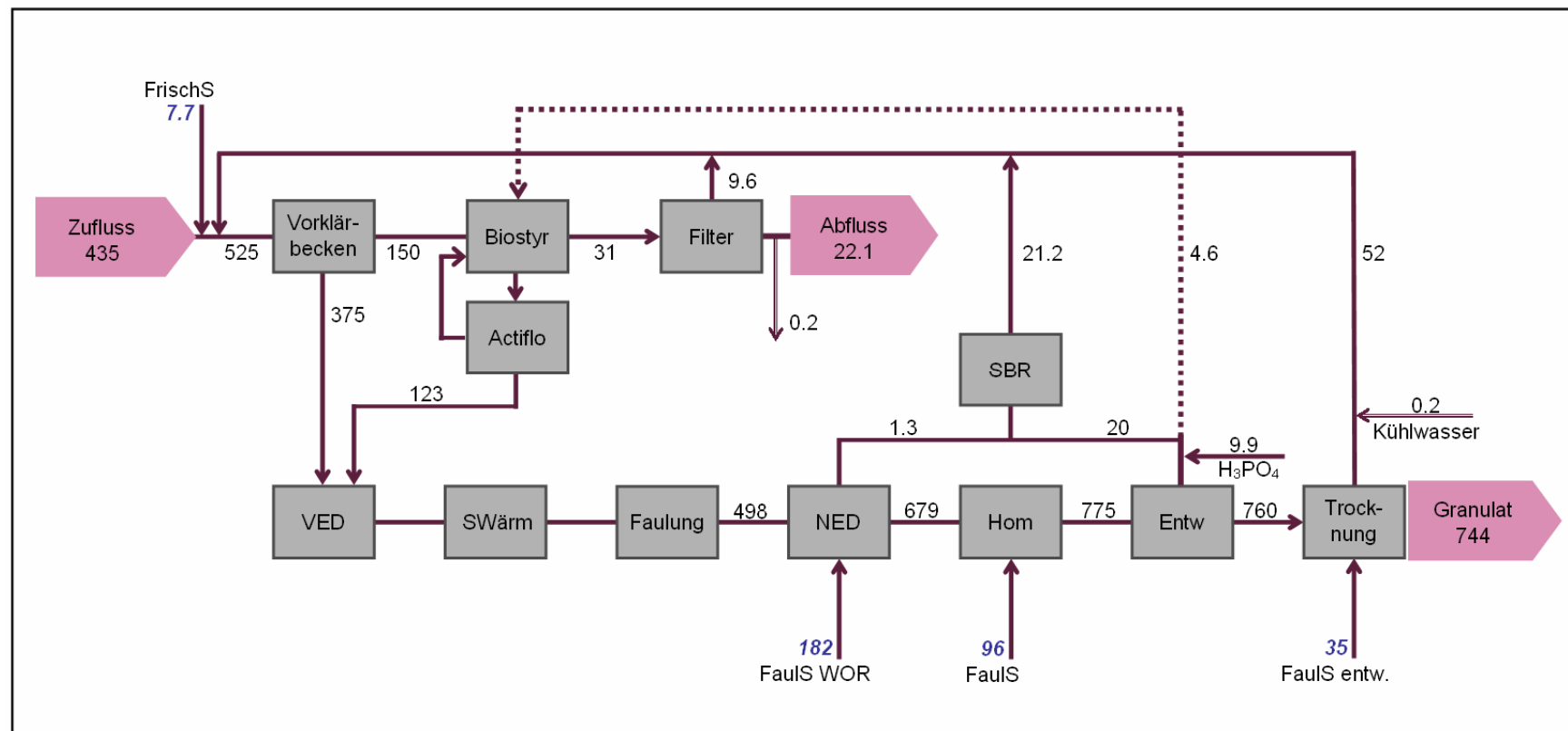
a) Gesamtfluss (Einheit: [kg/d])



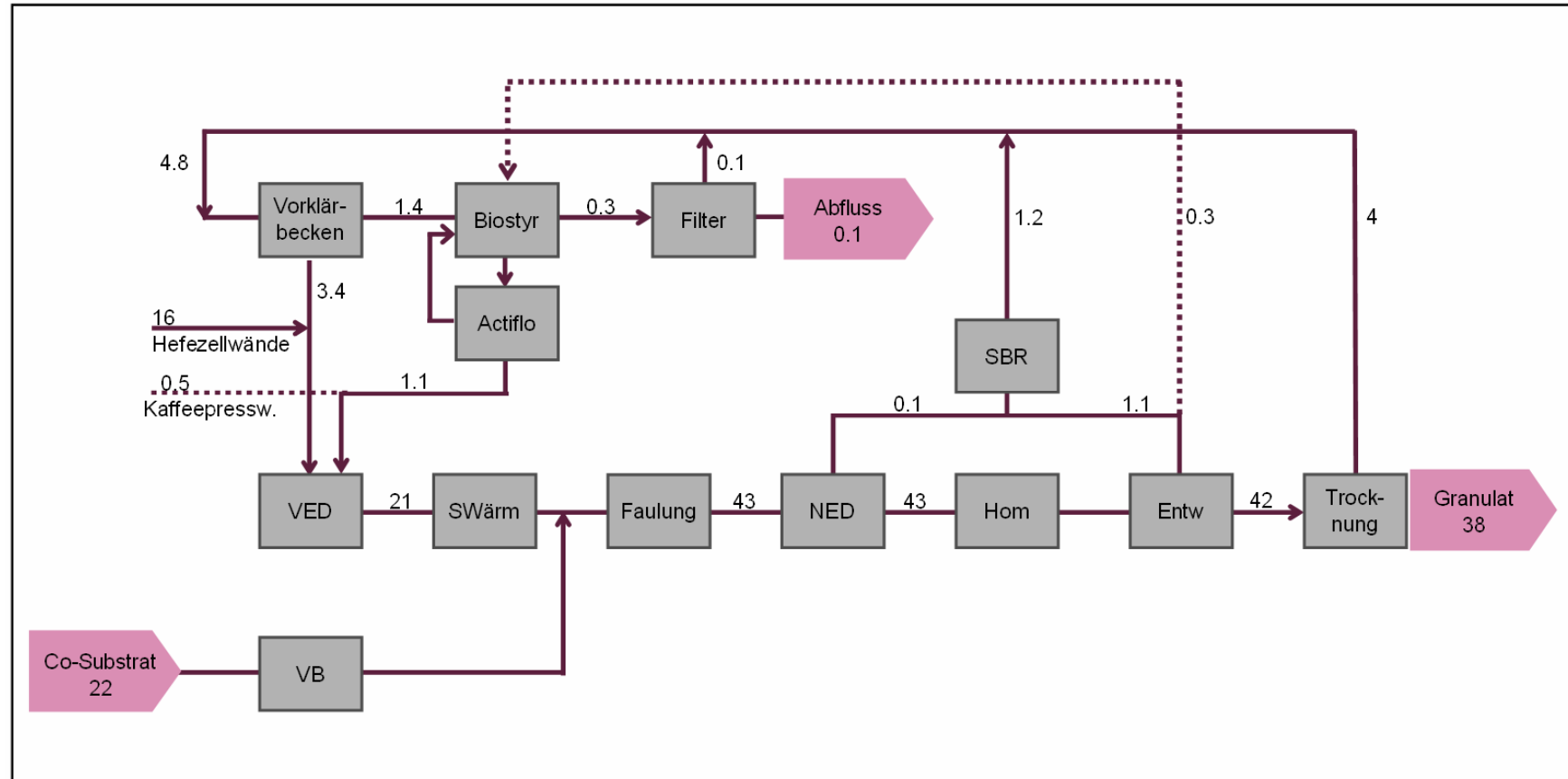
b) Nullwert (Einheit: [kg/d])

Massenverteilungsgrade [%]
(anhand des Gesamtflusses berechnet):

Verfahrensschritt	Abwasser	Schlamm	Rücklauf Zufluss	Rücklauf SBR	Rücklauf Biostyr
Vorklärung	28.6	71.4			
Biostyr / Actiflo	20.4	79.6			
Filter	69.9		30.1		
NED		99.8		0.2	
Entwässerung		98.1		2.5	0.6
SBR			2.5		
Trocknung		93.0	7.0		



c) Co-Substrate (Einheit: [kg/d])



ANHANG VII ENERGIEVERBRAUCH DER CO-SUBSTRATE

	Bezugsgrösse	Gesamtverbrauch [kWh/a]	Anteil Co-S. [%]	Verbrauch Co-S. [kWh/a]
Elektrische Energie:				
Prozess FFS (Annahme, Aufbereitung, VB Rührwerk, Pumpen)	-	22'481	100	22'481
NED (Pumpen)	Massenanteil (%)	336'205	9.1	30'595
Entwässerung (inkl. TW-Pumpen)	Massenanteil TS (% TS)	440'237	12.1	53'269
Trocknung	Anteil H ₂ O (%)	1'837'413	5	91'871
SBR	Gesamtstickstoff (% N _{tot})	710'141	10.2	72'434
Biostyr (inkl. Gebläse)	Gesamtstickstoff (% N _{tot})	5'739'352	3.5	200'877
Actiflo (Pumpen, Zentrifugen)	Massenanteil (%)	718'148	0.2	1'436
Schlammawförmung (Pumpe)	Massenanteil (%)	203'187	6.8	13'817
VED (Rührwerk, Pumpen)	Massenanteil (%)	392'553	6.8	26'694
Gasaufbereitung	Volumenanteil (%)	319'598	66.7	213'172
Total elektrische Energie:				726'645
Thermische Energie:				
Beheizung VB	-	258'420	100	258'420
Trocknung	Anteil H ₂ O (%)	12'283'900	5	614'195
Total thermische Energie:				872'615

ANHÄNGE TEIL III:

LANDWIRTSCHAFTLICHE BETRIEBE

ANHANG VIII INPUT/OUTPUT DER FERMENTER

a) Ist-Situation:

	FS [t/a]	TS [t/a]	oTS [t/a]	N _{tot} [t/a]	P _{tot} [t/a]	CH ₄ [%]
Anlage A						
Substrate landw. Herkunft						
Schweinegülle	2'200	143	115	17.2	3.7	60
Schweinemist	220	50	41	1.9	0.6	60
Rindermist	50	10	7.2	0.23	0.3	55
Pferdemist	30	8	6	0.17	0.1	55
Substrate nicht landw. Herkunft						
Mühlestaub	230	207	163	3.3	1.4	53
Gras	100	16	15	0.5	0.1	54
Total Input	2'830	434	347	23.3	6.2	
Total Output	2'622	226	139	23.3	6.2	56
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	61 d, 2 kg oTS/m³d → o.k.					
Anlage B						
Substrate landw. Herkunft						
Rindergülle	900	77	57	3.4	0.7	55
Schweinegülle	480	31.2	25.1	3.7	0.8	60
Hühnermist	37	13	9.3	0.7	0.1	65
Substrate nicht landw. Herkunft						
Getreideabfall	220	196	153	3.2	0.6	53
Pflanzenöl	40	39.6	39.2	0	0	67
Gemüseabfälle	100	11.4	9.5	0.5	0.04	52
Darminhalt (Schwein)	300	40.5	33.2	1.1	0.2	55
Glycerin	240	150	138	0	0	50
Total Input	2'317	559	465	12.6	2.4	
Total Output	2'038	280	186	12.6	2.4	55
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	75 d, 2.6 kg oTS/m³d → o.k.					
Anlage C						
Substrate landw. Herkunft						
Rindergülle	2'200	187	140	8.8	1.6	55
Schweinegülle	840	55	44	4.9	1.4	60
Substrate nicht landw. Herkunft						
Fettabscheider	366	30	25	0	0	68
Total Input	3'406	272	209	13.7	3.1	
Total Output	3'322	188	125	13.7	3.1	58
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	43 d, 1.4 kg oTS/m³d → o.k.					
Anlage D						
Substrate landw. Herkunft						
Schweinegülle	750	49	39	5.9	1.3	60
Substrate nicht landw. Herkunft						
Rüstabfälle	250	63	54	1.3	0.6	61
Total Input	1000	112	93	7.2	1.9	
Total Output	939	51	33	7.2	1.9	60
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	110 d, 0.8 oTS/m³d → o.k.					

- **Abbau der oTS** (Berechnung nach [15]):
 - Anlage A: 60 %, Anlage B: 60 %, Anlage C: 40 %, Anlage D: 65 %
- **Quelle für Nährstoffwerte:**
 - Positivliste Biogasforum, Messungen Nova Energie

b) 20 % Co-Substrate:

	FS [t/a]	TS [t/a]	oTS [t/a]	N _{tot} [t/a]	P _{tot} [t/a]]	CH ₄ [%]
Anlage A						
Substrate landw. Herkunft						
Schweinegülle	2'200	143	115	17.2	3.7	60
Schweinemist	220	50	41	1.9	0.6	60
Rindermist	50	10	7.2	0.23	0.3	55
Pferdemist	30	8	6	0.17	0.1	55
Substrate nicht landw. Herkunft						
Mühlestaub	230	207	163	3.3	1.4	53
Gras	100	16	15	0.5	0.1	54
Zusätzliche Co-Substrate	295	26	24	0.6	0.1	65
Total Input	3125	460	371	23.9	6.3	
Total Output	2893	228	139	23.9	6.3	57
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	55 d, 2.2 kg oTS/m³d → o.k.					
Anlage C						
Substrate landw. Herkunft						
Rindergülle	2'200	187	140	8.8	1.6	55
Schweinegülle	840	55	44	4.9	1.4	60
Substrate nicht landw. Herkunft						
Fettabscheider	366	30	25	0	0	68
Zusätzliche Co-Substrate	394	35	32	0.9	0.2	65
Total Input	3800	307	241	14.6	3.3	
Total Output	3699	205	140	14.6	3.3	59
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	38 d, 1.7 kg oTS/m³d → o.k.					

- **Annahmen zum Abbau der oTS:**
 - Anlage A: 63 %, Anlage C: 43 %

c) 50 % Co-Substrate:

	FS [t/a]	TS [t/a]	oTS [t/a]	N _{tot} [t/a]	P _{tot} [t/a]	CH ₄ [%]
Anlage A						
Substrate landw. Herkunft						
Schweinegülle	2'200	143	115	17.2	3.7	60
Schweinemist	220	50	41	1.9	0.6	60
Rindermist	50	10	7.2	0.2	0.3	55
Pferdemist	30	8	6	0.2	0.1	55
Substrate nicht landw. Herkunft						
Mühlestaub	230	207	163	3.3	1.4	53
Gras	100	16	15	0.5	0.1	54
Zusätzliche Co-Substrate	2170	191	175.7	4.8	1.2	65
Total Input	5000	625	523	28	7	
Total Output	4663	288	186	28.1	7.4	59
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	34 d, 3 kg oTS/m³d → o.k.					
Anlage B						
Substrate landw. Herkunft						
Schweinegülle	900	77	57.4	3.4	0.7	55
Rindergülle	480	31	25.1	3.7	0.8	60
Hühnermist	37	13	9.3	0.7	0.1	65
Substrate nicht landw. Herkunft						
Getreideabfall	220	196	153	3.2	0.6	53
Pflanzenöl	40	40	39	0	0	67
Gemüseabfälle	100	11	10	0.5	0.04	52
Darminhalt (Schwein)	300	41	33	1.1	0.2	55
Glycerin	240	150	138	0	0	50
Zusätzliche Co-Substrate	517	45	41.9	1.1	0.3	65
Total Input	2834	604	507	13.7	2.7	
Total Output	2518	288	191	13.7	2.7	55
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	61 d, 2.9 kg oTS/m³d → o.k.					
Anlage C						
Substrate landw. Herkunft						
Rindergülle	2'200	187	140	8.8	1.6	55
Schweinegülle	840	55	44	4.9	1.4	60
Substrate nicht landw. Herkunft						
Fettabscheider	366	30	25	0	0	68
Zusätzliche Co-Substrate	2674	235	216.5	5.9	1.5	65
Total Input	6080	507	426	19.6	4.6	
Total Output	5850	277	195	19.6	4.6	61
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	24 d, 2.9 kg oTS/m³d → o.k. (Verweilzeit etwas kurz)					
Anlage D						
Substrate landw. Herkunft						
Schweinegülle	750	49	39.2	5.9	1.3	60
Substrate nicht landw. Herkunft						
Rüstabfälle	250	63	54	1.3	0.6	61
Zusätzliche Co-Substrate	500	44	40.5	1.1	0.3	65
Total Input	1500	156	134	8.3	2.2	
Total Output	1410	66	44	8.3	2.2	62
Verweilzeit, Faulraumbelastung:	73 d, 1.2 kg oTS/m³d → o.k.					

• **Annahmen zum Abbau der oTS:**

- Anlage A: 65 %, Anlage B: 63 %, Anlage C: 56 %, Anlage D: 67 %

ANHANG IX ENERGIE: PRODUKTION UND EIGENVERBRAUCH

Einheit: [kWh/a]

	Ist-Situation	20 % Co-Substrat	50 % Co-Substrat
Anlage A			
Biogas Brutto	1'846'753	2'080'540	3'600'051
Stromproduktion	550'000	748'994	873'600 *
- Verbrauch für Vergärung	45'000	56'175	65'520
Wärmeproduktion	770'000	998'659	1'048'320 *
- Verbrauch für Vergärung	385'000	385'000	366'912
Anlage C			
Biogas Brutto	582'449	891'045	2'740'103
Stromproduktion	206'535	320'776	698'880 *
- Verbrauch für Vergärung	15'000	24'058	52'416
Wärmeproduktion	318'000	427'702	873'600 *
- Verbrauch für Vergärung	225'557	225'557	305'760
Anlage D			
Biogas Brutto	507'721		923'723
Stromproduktion	147'507		332'540
- Verbrauch für Vergärung	10'950		24'941
Wärmeproduktion	223'500		443'387
- Verbrauch für Vergärung	134'100		155'185

* Produktion durch die Kapazität des BHKW limitiert

ANHANG X NETTOENERGIEPRODUKTION

Einheit: [kWh/a]

	Ist-Situation	20 % Co-Substrat	50 % Co-Substrat
Anlage A			
Zündöl	- 180'000	- 262'148	- 305'760
Transport	- 2'376	- 7'686	- 41'436
Verkauf : - Strom - Wärme	+ 450'000 + 250'000	+ 618'000 + 438'570	+ 720'720 + 497'612
Verbrauch landw. Betrieb: - Wärme	+ 160'000	+ 160'000	+ 160'000
Dünger	+ 48'300	+ 53'440	+ 100'720
Bilanz	+ 725'024	+ 999'156	+ 1'131'856
Anlage C			
Zündöl	- 75'480	- 112'272	- 224'608
Transport	- 2'635	- 9'727	- 50'767
Verkauf : - Strom - Wärme	+ 165'522 -	+ 256'300 -	+ 558'440 -
Verbrauch landw. Betrieb: - Wärme	+ 91'807	+ 91'807	+ 91'807
Dünger	0	+ 2'600	+ 26'220
Bilanz	+ 179'214	+ 228'708	+ 381'092
Anlage D			
Zündöl	- 55'000		-116'389
Transport	- 1'800		-10'800
Verkauf : - Strom - Wärme	+ 136'557 + 46'049		+307'600 +202'200
Verbrauch landw. Betrieb: - Wärme	-		-
Dünger	+ 17'400		+ 29'940
Bilanz	+ 142'906		+ 411'981

Berechnungen der Szenarien:

- Verkauf Strom: Stromproduktion – Verbrauch Vergärung(Anhang IX) – Verlust (aus Ist-Situation abgeleitet)
- Verkauf Wärme: Falls ein Abnehmer vorhanden ist, ist das Vorgehen gleich wie beim Strom. Falls kein Abnehmer vorhanden ist, gibt es auch bei den Szenarien kein Wärmeabsatz.
- Verbrauch lanw. Betrieb: Der Verbrauch ändert sich nicht mit den Szenarien
- Dünger: Den Nährstoffen werden Energiewerte zugeschrieben
N: 9.6 kWh/kg [11]
P: 13 kWh/kg [19]

ANHANG XI BASISDATEN DER WIRTSCHAFTLICHKEITSRECHNUNG

	Einheit	A	C	D
Tarife				
Stromverkauf ¹⁾				
- Ist-Situation	Ø CHF/kWh	0.38	0.36	0.202
- 20 % Co-Substrat	Ø CHF/kWh	0.38	0.36	-
- 50 % Co-Substrat	Ø CHF/kWh	0.202	0.202	0.202
Wärmeverkauf	CHF/kWh	0.08	-	0.08
Stundenansatz	CHF/h	45	45	45
Spez. Kosten BHKW	CHF/kWh	0.006	0.028	0.01
Abschreibedauer				
Gebäudeteile	Jahre	15	10	20
Elektro-mechanische Teile	Jahre	8	7	8
Finanzierung				
Eigenkapital	CHF	165'000	80'000	0
Anteil	%	24	21	0
Fremdkapital	CHF	417'000	252'000	250'000
Anteil	%	61	66	100
Förderbeiträge	CHF	98'000	48'000	0
Anteil	%	14	13	0
Zinssatz EK	%	3	4	-
Zinssatz FK	%	3.25	4.5	4

¹⁾ Ökobeitrag: Es wurde mit einem Mehrwert von 5.2 Rp./kWh gerechnet (falls keine KEV). Dies entspricht dem Durchschnitt des real vergüteten Ökobeitrags der Anlagen.

ANHÄNGE TEIL IV:

AUSWERTUNG – VORTEILE UND GRENZEN DER CO-VERGÄRUNG

ANHANG XII STOFFLICHE GRENZEN DER VERGÄRUNG

Einheit: [kWh/a]

	Produktion Biogas	Produktion Granulat	Verbrauch Annahme/ Vergärung	Verbrauch Entstickung	Verbrauch Gasauf- bereitung	Verbrauch Transport	Nettoenergie je Substrat
Hefezellwände	177'082	1'498'036	425'510	0	5'623	119'800	1'124'185
Speisereste	2'695'955	1'541'361	194'697	79'030	77'189	30'300	3'856'099
Kaffeepresswasser	218'132	94'981	225'045	6'058	6'245	17'200	58'565
Flotat	3'299'331	554'890	63'003	55'073	84'740	51'200	3'600'204
Milchserum	318'624	123'309	42'678	6'609	9'275	9'700	373'671
Ethanol	218'298	209'958	12'489	275	6'052	10'400	399'040

	Energiewert Stickstoff	Energiewert Phosphor	Total Nährstoffe
Hefezellwände	0	75'400	75'400
Speisereste	214'906	48'100	263'006
Kaffeepresswasser	16'474	2'600	19'074
Flotat	149'760	48'100	197'860
Milchserum	17'971	6'500	24'471
Ethanol	749	0	749